
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA E EFICIÊNCIA TÉCNICA NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA ANÁLISE DAS LAVOURAS TEMPORÁRIAS

Agricultural Productivity and Technical Efficiency in the Brazilian Northeast: An Analysis of Temporary Crops

Maria Jadenice de Santana Silva

Economista. Mestre em Economia pelo Programa Acadêmico de Pós-graduação em Economia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. jadenice.santana@gmail.com

José Ricardo de Santana

Economista. Doutor em Economia de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas. Professor Adjunto do Programa Acadêmico de Pós-graduação em Economia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. jrsantana.ufs@gmail.com

Fábio Rodrigues de Moura

Economista. Doutor em Economia. Professor Adjunto do Programa Acadêmico de Pós-graduação em Economia, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, Brasil. fabiromoura@gmail.com

Resumo: Este estudo busca analisar o comportamento da eficiência técnica sobre a produtividade agrícola das lavouras temporárias no Nordeste do Brasil, a partir da investigação dos seus principais fatores determinantes, bem como de elementos que podem reduzir a ineficiência. Utiliza-se o modelo de fronteira estocástica de produção (SFA) e, alternativamente, o teste de verossimilhança mediante a forma funcional flexível do tipo translog para responder se as variáveis explicativas influenciam a eficiência da produção. Foram utilizados dados do Censo Agropecuário 2017. Foram considerados os municípios como unidade de referência de produção, depois agregados por estados. Os achados mostram que elementos como a precipitação contribuem para reduzir a ineficiência técnica média das lavouras temporárias, além de outros que podem ser objeto mais direto de políticas, como financiamento e tecnologia, que se mostraram relevantes para aumentos de produtividade. Constatou-se que os estados mais eficientes são Maranhão, Piauí e Bahia, que abrangem a maior parte do bioma Cerrado na região. Este estudo pode orientar produtores e formuladores de políticas a respeito de suas ações, visando à melhora do desempenho agrícola e ao crescimento econômico da região.

Palavras-chave: Agricultura, Fronteira Estocástica, Nordeste do Brasil.

Abstract: This study seeks to analyze the behavior of technical efficiency on the agricultural productivity of temporary crops in Northeast Brazil, based on the investigation of its main determining factors, as well as the elements that can reduce inefficiency. The stochastic production frontier model (SFA) is used and, alternatively, the likelihood test through the flexible functional form of the translog type to answer whether the explanatory variables influence production efficiency. Data from the 2017 Agricultural Census were used. Municipalities were considered as the production reference unit, then aggregated by states. The findings show that elements such as precipitation contribute to reducing the average technical inefficiency of temporary crops, in addition to others that may be a more direct object of policies, such as financing and technology, which are relevant to increases of productivity. It was found that the most efficient states are Maranhão, Piauí and Bahia, which cover most of the Cerrado biome in the region. This study can guide producers and policy makers regarding their actions, aiming at improving agricultural performance and economic growth in the region.

Keywords: Agriculture, Stochastic Frontier, Northeast of Brazil.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem sido protagonista na composição do PIB brasileiro, apesar das adversidades enfrentadas. O crescimento do setor agropecuário, em 2017, foi de 14,5%; resultado dos ganhos de produtividade agrícola, que tem mantido projeções positivas (MAPA, 2021). De acordo com o Sistema de Contas Nacionais, o crescimento real acumulado no valor adicionado do setor agrícola entre 2011 e 2021 foi de 79,26% (IBGE, 2024). No Nordeste brasileiro a agricultura apresenta também um papel relevante na economia regional, com destaque nacional na produção de lavouras temporárias, como cana de açúcar, fruticultura a mandioca e grãos. Entretanto a participação da produção agrícola nordestina no total do País ainda é baixa.

No caso da produção de grãos, por exemplo, o Centro-Oeste é a principal região produtora, com 46,2% da participação nacional, mas ocorreu no Nordeste o maior crescimento, de 15%, aumentando sua participação para 8,8% da produção nacional, em 2020. O bom desempenho pode ser atribuído a melhores condições de clima, com emprego de técnicas modernas de produção (ETENE, 2020).

Assim, uma análise desagregada por municípios, abrangendo os diversos biomas da região, como o Cerrado e o Semiárido, pode revelar com maior detalhe os determinantes da eficiência técnica agrícola. Embora haja uma heterogeneidade dos biomas e uma diversidade produtiva intrarregional no Nordeste, a abordagem agregada por estados para identificar padrões gerais de eficiência agrícola e suas associações com variáveis estruturais e de políticas públicas, com possíveis orientações também para gestores dos governos estaduais.

O desempenho da agricultura no país, com ganhos de produtividade consideráveis, é influenciado por importantes políticas públicas, são exemplos o crédito rural e a garantia de preços mínimos, além da incorporação de novas práticas e equipamentos pelos produtores, com a modernização do setor. O aperfeiçoamento contínuo da qualidade e a ampliação da eficiência técnica, com a disseminação de novos conhecimentos e aparatos técnicos, geraram diversos resultados que contribuíram para o crescimento da produtividade. Como ilustração, vale mencionar que o aumento em 1% nos gastos com pesquisa desenvolvida pela Embrapa eleva em 0,2% o índice de produtividade (Gasques et al., 2010).

No caso do Nordeste, o processo de modernização da agricultura ocorreu de forma mais acentuada a partir da década de 1960, impulsionado pelo fortalecimento de sistemas de financiamento fortemente subsidiados, ou seja, com juros baixos e incentivos governamentais. Essas políticas estimularam a inserção de máquinas e insumos modernos na produção rural, com o objetivo de aumentar a eficiência técnica (Furstenau, 1987). A principal finalidade era elevar a produtividade, reduzir os custos e diversificar as atividades agropecuárias na região. No entanto, embora essas medidas tenham promovido a modernização agrícola, também acentuaram as desigualdades no meio rural, uma vez que beneficiaram, sobretudo, os médios e grandes produtores, que possuíam maior acesso ao crédito formal e capacidade de investimento. Com isso, os pequenos agricultores foram excluídos do acesso ao crédito rural oficial e, conseqüentemente, ficaram à margem desse processo. Esse modelo contribuiu para a concentração de renda no campo, ampliando as disparidades sociais no meio rural nordestino.

Em resposta aos desafios históricos enfrentados pela agricultura no Nordeste, especialmente a exclusão dos pequenos produtores do acesso ao crédito e à modernização, o Brasil tem implementado diversas iniciativas recentes para melhorar a produtividade agrícola de forma mais inclusiva e sustentável.

O Plano Safra 2024/2025, lançado com o objetivo de facilitar o acesso ao crédito e à mecanização para pequenos produtores é um dos esforços recentes. A iniciativa introduziu fundos garantidores e incentivou a aquisição de máquinas agrícolas de pequeno porte, com a finalidade de aumentar a produtividade e reduzir o êxodo rural (BRASIL, 2024).

Considerando que os pequenos produtores predominam em diversas regiões, especialmente no Nordeste, elevar sua competitividade deve estar entre os pontos principais das políticas públicas do setor, o que requer o aumento da eficiência produtiva. Identificar os fatores que afetam o desempenho das lavouras temporárias é fundamental para contribuir para melhorias na alocação de recursos, aumentar

a produtividade e elevar a qualidade de vida no meio rural.

Nessa perspectiva, estudar a eficiência técnica da agricultura no Nordeste é de fundamental importância. Tal análise pode oferecer subsídios relevantes para uma melhor alocação dos recursos produtivos na região, promovendo ganhos em eficiência e competitividade. Segundo Gasques et al. (2004), fatores como avanços tecnológicos e aumento da empregabilidade desempenham papel essencial na determinação da eficiência da agricultura dentro da economia. No entanto, apesar das vantagens viabilizadas pelo progresso técnico, ainda persistem desigualdades na distribuição de recursos financeiros e tecnológicos, especialmente em favor dos setores voltados ao comércio exterior.

Considerando isso, levanta-se a hipótese de que o aumento da eficiência técnica das lavouras temporárias pode impulsionar o desempenho da agricultura no Nordeste, gerando ganhos de produtividade e desenvolvimento agrícola da região. Esse é o tema de interesse do estudo. O objetivo é analisar o desempenho da eficiência técnica agrícola nordestina nas lavouras temporárias, visando identificar os seus principais fatores determinantes, bem como os elementos que podem reduzir a ineficiência.

O trabalho está organizado em cinco seções incluindo a introdução. A segunda apresenta uma visão geral do tema abordado, oferecendo uma introdução ao contexto da produtividade agrícola e eficiência técnica. A terceira seção descreve a metodologia adotada para estimar a eficiência técnica na agricultura, detalhando as técnicas, modelos e métodos utilizados. A quarta seção reúne os resultados alcançados, abordando os principais fatores determinantes da eficiência e os elementos que podem reduzir a ineficiência, além de apresentar resultados da eficiência em termos espaciais. Por fim, na quinta seção, são apresentadas as considerações finais.

2 DISCUSSÃO SOBRE PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA TÉCNICA NO NORDESTE

Nesta seção abordam-se elementos relacionados à produtividade da agricultura no Nordeste, a partir de estudos empíricos relacionados ao tema da eficiência. Apesar da disponibilidade de tecnologias modernas, parte considerável da região é formada por pequenos produtores, em geral vinculados à agricultura de subsistência, cuja produtividade é limitada por fatores estruturais como a ausência de políticas eficazes de comercialização, assistência técnica, logística e inclusão digital (Araújo; Araujo, 2016). É importante considerar, entretanto, que a região Nordeste não é homogênea do ponto de vista produtivo, há contrastes significativos entre áreas inseridas no bioma Semiárido, onde predomina a Caatinga, e regiões como o Cerrado, abrangendo os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA) marcadas por estabelecimentos maiores, com uso intensivo de tecnologia e inserção em cadeias de valor agroindustriais. A produtividade agrícola desempenha papel fundamental no tocante à propagação do crescimento econômico, na geração de bem-estar, na distribuição de renda e redução da pobreza. Ao introduzir inovações nos sistemas de produção, ocorrem mudanças que são capazes de induzir o aumento da produtividade na agricultura, possibilitando seu maior e melhor desempenho diante das adversidades, tais efeitos, contudo, variam conforme o contexto ecológico e socioeconômico das regiões (Souza et al., 2020).

Nesse contexto, é de grande importância explorar os fatores e mecanismos influenciadores da eficiência técnica na agricultura, objetivando melhorar o desempenho do setor. O progresso tecnológico promovido por altos índices de investimentos, por exemplo, pode promover a eficiência técnica no campo por meio dos programas de incentivo ao transporte, à mecanização dos fatores de produção, à assistência técnica, além do nível de escolaridade que aperfeiçoa o capital humano, entre outros, gerando produtores mais hábeis na empregabilidade e manejo de novas tecnologias agrícolas (Freitas, 2014).

As disparidades no processo de desenvolvimento entre as regiões brasileiras despertam atenção, sobretudo ao atraso em que ainda se encontra a região Nordeste. No entanto essa heterogeneidade não se dá apenas entre as regiões, pois o Nordeste apresenta contrastes significativos entre sub-regiões agrícolas, biomas e tipos de estabelecimento produtivo. Áreas como o Cerrado nordestino (MATOPIBA) possuem maior capitalização e acesso a crédito, enquanto o Semiárido enfrenta limitações estruturais históricas. A identificação de variáveis que explicam as diferenças de eficiência torna-se essencial à for-

mulação de alternativas mais efetivas. Dessa maneira, autores buscaram explicar as possibilidades de aumento da produtividade por meio da análise de eficiência, uma vez que o aumento da produtividade está diretamente associado à alocação dos fatores de produção.

Santos (2002) procurou analisar o setor agropecuário do Nordeste, utilizando dados procedentes do Censo Agropecuário 1995/1996 e do Censo Demográfico 2000. Por meio das medidas de eficiência técnica e de escala, buscou identificar os condicionantes das diferenças de eficiência entre as áreas em estudo. O autor emprega a Análise Envoltória de Dados (DEA) para discriminar as áreas em eficientes e ineficientes e, com isso, foi constatado que a inserção de insumos tecnológicos além de técnicas de manejo do solo contribui para melhores níveis de produção e produtividade agrícola.

Luna et al. (2021) investigaram a produtividade agropecuária de 115 estabelecimentos do Ceará, visando identificar como o aumento dessa produtividade está diretamente associado à alocação dos fatores de produção. Para isso, os autores utilizaram dados secundários e compilados do Censo Agropecuário 2017 e, como instrumento de análise, adotaram o modelo de fronteira de produção estocástica em sua forma funcional Cobb-Douglas, admitindo ineficiência técnica. Com base nos resultados, os autores concluíram que os municípios cearenses apresentam baixa eficiência técnica e forte heterogeneidade tecnológica.

Concomitantemente, Souza et al. (2020), por meio da análise envoltória de dados, concluíram que houve um aumento na eficiência do uso dos fatores de produção agrícola das mesorregiões cearenses de 2008 a 2012. Utilizando o Índice de Malmquist, verificou-se que os maiores ganhos de eficiência técnica e tecnológica ocorreram nos anos de 2010 e 2011, enquanto que as maiores perdas dessas variações ocorreram em 2009. Contudo, como a análise considera agregações por mesorregiões, as conclusões podem mascarar diferenças relevantes entre zonas produtivas inseridas em distintos contextos ecológicos e sociais, como as variações entre municípios do semiárido e do litoral cearense.

Mariano e Pinheiro (2009) buscaram identificar as fontes da ineficiência técnica da agricultura familiar no Projeto de Irrigação do Baixo Açu - RN. Para isso, usaram os modelos de análise envoltória de dados (DEA-C, DEA-V), e o modelo Free Disposal Hull (FDH). Chegaram à conclusão que a eficiência dos agricultores é baixa, com a suposição de que, com retornos constantes de escala, apenas 6,7% foram eficientes; 24% com retornos variáveis de escala; e 54,7% com livre descarte de recursos. Esse estudo é relevante por focar numa experiência localizada e irrigada: um tipo de arranjo agrícola que contrasta fortemente com outros modelos produtivos dominantes no Nordeste, como a agricultura de sequeiro no Semiárido.

Silva et al. (2019) analisam as diferenças tecnológicas da produção agropecuária entre os municípios situados no semiárido e no não semiárido do Nordeste brasileiro. O modelo adotado foi o de meta-fronteira tecnológica, proposta por Battese et al. (2004) e O'Donnell et al. (2008). Os autores concluíram que, quando comparadas as duas regiões, o não semiárido possui a maior eficiência técnica média com referência à metafronteira. Os resultados baseiam-se nos censos agropecuários do IBGE de 1975 a 2006. Esse trabalho representa um avanço metodológico ao considerar fronteiras tecnológicas distintas entre grupos de produtores, captando a heterogeneidade regional, abordagem que contorna uma das principais limitações dos estudos baseados em fronteiras únicas.

Araújo e Mancal (2015) analisaram o crescimento da agricultura na Região Nordeste do Brasil, no período de 1970 a 2006, utilizando um modelo de fronteira estocástica para decompor a produtividade total dos fatores (PTF) por estado. Os autores adotaram o índice de produtividade total dos fatores (PTF) de Malmquist, distinguindo variações de eficiência técnica e de progresso tecnológico. As conclusões indicam que nos estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte e Alagoas, os ganhos se deram mais por avanços tecnológicos, ao passo que, no Piauí, a eficiência técnica foi mais relevante. De modo geral, a região Nordeste obteve ganhos de produtividade total dos fatores no período.

Estudos que avaliam a eficiência técnica da agricultura brasileira frequentemente adotam os estados como unidade de análise para capturar as heterogeneidades regionais. Por exemplo, Gazzola et al. (2009) avaliou a eficiência técnica dos 27 estados brasileiros nos anos de 1995/96 e 2006, utilizando o

modelo de fronteira estocástica, a partir de dados dos censos agropecuários e informações de custeio e capital obtidas no Banco Central. Os resultados mostraram variações significativas entre os estados, com o Distrito Federal apresentando a maior eficiência técnica em 2006, enquanto o Piauí teve o desempenho mais baixo. Essa abordagem permite identificar as especificidades de cada estado, facilitando a formulação de políticas públicas mais direcionadas

Gomes et al. (2009) investigaram as mudanças ocorridas na agropecuária do Nordeste brasileiro, identificando as fontes de alterações na produtividade total dos fatores. Utilizam dados de 187 microrregiões nordestinas, de 1996 e 2006. As mudanças na produtividade total dos fatores foram mensuradas pelo índice de Malmquist, o qual pôde ser decomposto em mudanças na eficiência técnica e tecnológica. Os autores verificaram que 52% das microrregiões nordestinas apresentaram ganhos na produtividade dos fatores. Nas regiões onde ocorreu redução na produtividade, houve perda considerável de eficiência, mesmo diante de avanços tecnológicos. Apesar da desagregação em microrregiões representar um avanço em relação a estudos estaduais ou regionais, a ausência de uma tipologia produtiva ou de uma segmentação por bioma limita a capacidade explicativa do modelo quanto aos fatores estruturais das desigualdades observadas, isso evidencia que mesmo estudos mais desagregados têm limitações epistemológicas relevantes.

Em suma, os trabalhos revisados avaliam empiricamente os impactos do uso de tecnologias e recursos técnicos sobre a produção no Nordeste, com foco nos ganhos de produtividade via eficiência técnica. Ainda assim, observa-se que muitos estudos se baseiam em modelos que não captam plenamente a heterogeneidade socioeconômica da região. No presente trabalho, o uso das observações a partir dos municípios busca captar as particularidades espaciais que podem contribuir para influenciar a eficiência, além dos fatores explicitamente expressos no modelo de estimação.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são expostos o método paramétrico embasado pela fronteira estocástica de produção (SFA) e os elementos utilizados para a montagem da base de dados da pesquisa.

3.1 Mensuração de Eficiência e Fronteira Estocástica de Produção

O processo produtivo pode ser representado em termos de uma função de produção, em que cada nível de produto está associado a diferentes combinações de insumos. A fronteira de produção indica a máxima quantidade de produto que pode ser obtida a partir de uma dada quantidade de insumos a partir das tecnologias disponíveis (Zanini, 2004). Desse modo, a função de produção representa o conjunto de combinações de produtos para as quais a economia atinge a eficiência.

Um produtor possui eficiência técnica (ET) quando consegue alcançar o produto ótimo, dada uma certa quantidade de insumos. Para se obter eficiência econômica, o produtor deve ser tecnicamente eficiente e empregar insumos menos onerosos, isto é, ter eficiência alocativa (EA). Quando o produto ótimo é definido em termos da fronteira de custo, sujeito às restrições de quantidades e de preços, a eficiência em questão é a eficiência alocativa (EA) (Pinto, 2013).

As fronteiras são referências que possibilitam classificar os produtores comparando seus desempenhos, almejando a eficiência econômica (Kumbhakar; Lovell, 2000). Para se mensurar a eficiência por meio das fronteiras de produção, há duas abordagens consolidadas na literatura: a não paramétrica, representada pela Análise Envoltória de Dados (DEA), e a paramétrica, que é a análise de fronteira estocástica (SFA). No caso da DEA, que é um método de programação linear não paramétrico, são ignoradas as perturbações aleatórias do processo produtivo. Ou seja, está sujeito a incertezas nos dados devido a erros de medição ou previsão, gerando resultados potencialmente não confiáveis (Coelli et al., 1998). Ademais, a DEA não estima o impacto da perturbação aleatória nas atividades de produção e apresenta vies de estimativa na medição da eficiência técnica (Yin; Wu, 2021).

No modelo de fronteira estocástica (SFA), consideram-se os impactos de perturbações aleatórias nas atividades de produção, isto é, o método admite eventos aleatórios e indeterminados (Biage, 2012). Esse

modelo reconhece que desvios em relação à fronteira de produção podem ocorrer tanto por ineficiência técnica quanto por fatores aleatórios, como condições climáticas adversas ou erros de medição.

O modelo determinístico de fronteira de produção é representado pela equação

$$y_i = f(x_i; \beta) \exp(-u_i), i=1, \dots, I, u_i \geq 0, \quad (1)$$

em que representa a produção da i -ésima unidades tomadora de decisão (UTD), x_i é um vetor $K \times 1$ contendo as entradas ou insumos, β é um vetor de parâmetros desconhecidos que captura a tecnologia de produção e u_i é uma variável aleatória associada à ineficiência técnica orientada ao produto, que segue uma distribuição não negativa com ponto de truncamento em zero; em geral, admite-se que u_i segue uma distribuição meio-normal, normal truncada ou exponencial, e expressa quanto uma UTD está afastada da fronteira ótima de produção. A fronteira de produção expressa pela equação (1) é determinística, pois, todos os desvios de y_i em relação à fronteira $f(x_i; \beta)$ são atribuídos exclusivamente à ineficiência produtiva. Ao considerar $u_i \sim N(0, \sigma_{ui}^2)$ também um termo aleatório que representa ruído estocástico (por exemplo, eventos climáticos ou erros estatísticos), chega-se à forma mais completa do modelo SFA. Assim, todos os desvios da fronteira de eficiência são considerados sob o controle da UTD e denominados de ineficiência, ou seja, são atribuídos aos produtores tecnicamente ineficientes. Aigner et al. (1977) propuseram o modelo de fronteira de produção estocástica:

$$y_i = f(x_i; \beta) \exp(e_i), \quad (2)$$

$$e_i = v_i - u_i,$$

em que $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$ é o termo de erro simétrico e $u_i \sim N^+(\mu, \sigma_u^2)$ é o termo não negativo de ineficiência técnica. A função de fronteira estocástica (2) incorpora, portanto, dois componentes: um erro aleatório simétrico, que captura choques externos, e um termo de ineficiência, que reflete o desvio sistemático da UTD em relação à fronteira ótima de produção. Juntos, esses dois termos compõem o erro composto. Pelo fato de v_i e u_i serem geralmente admitidas como variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), a ineficiência média presente na distribuição é refletida na assimetria de e_i . Wang (2002) propôs alternativamente modelar a média e a variância do termo de ineficiência técnica a partir de um conjunto de regressores exógenos:

$$u_i \sim N^+(\mu_p, \sigma_{ui}^2), \mu_i = z_i' \delta, \sigma_{ui}^2 = \exp(z_i' \gamma) \quad (3)$$

em que z_i é um vetor de covariáveis relacionadas à ineficiência que explicam a média de u_i , δ é um vetor de coeficientes que captura os efeitos de ineficiência e γ identifica os efeitos sobre a incerteza do processo produtivo sujeito à ineficiência. Ao parametrizar tanto a média como a variância de u_i utilizando-se do mesmo vetor de variáveis exógenas, Wang (2002) demonstra que é possível identificar efeitos não monotônicos dos regressores exógenos sobre a ineficiência. Isso permite estimar, por exemplo, eventuais efeitos decrescentes das variáveis selecionadas sobre a ineficiência, ou o intervalo em que o efeito sobre a redução da ineficiência atinge seu ponto ótimo (e.g., tamanho ótimo da propriedade, nível ótimo de financiamento). Admitindo-se que $f(x_i; \beta)$ segue uma especificação translog:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \ln(x_{ji}) + 1/2 \sum_{(j=1)}^k \sum_{(h=1)}^k \beta_{jh} \ln(x_{ji}) \ln(x_{hi}) + v_i - u_i \quad (4)$$

Nessa função, o desvio entre o logaritmo do nível de produção y_i e a parte determinística da fronteira de produção é dado pela combinação de dois componentes v_i (ruído) e u_i (ineficiência). A especificação como função de produção translog permite modelar estruturas de produção mais complexas em relação a Cobb-Douglas e possibilita empregar múltiplos produtos sem violar as propriedades de convexidade. Além disso, a funções translog é considerada flexível, por não impor qualquer restrição aos valores de substituição nem pressupor homogeneidade. Ao mesmo tempo, apesar de permitir maior flexibilidade, pode haver problemas de multicolinearidade quando vários regressores são incluídos no modelo. Os parâmetros do modelo (4) podem ser estimados por máxima verossimilhança (ML), e em geral utiliza-se como critério de decisão entre a forma funcional translog e a Cobb-Douglas o teste de razão de verossimilhança (teste LR). Lovell (1993) considera que o grau de eficiência técnica de um produtor é dado pela razão entre o nível de produto observado e o produto correspondente na fronteira estocástica

$$y_i = f(x_i; \beta)$$

$$e_i = v_i$$

de produção. Admitindo-se linearidade no logaritmo de y_i , a função de máxima produção esperada para o nível de insumos x_i situado sobre a fronteira é dado por:

$$\hat{y}_i = \exp(x_i \beta). \quad (5)$$

A produção (não observada) para a observação i , caso a UTD opere em eficiência técnica, ou seja, na fronteira, é dada por:

$$\hat{y}_i^* = \exp(x_i \beta + v_i). \quad (6)$$

O choque (ou ruído), por sua vez, é dado pela diferença entre o logaritmo do produto não observado (6) e o logaritmo da máxima produção esperada (5). A presença de ruídos representa a omissão de variáveis relevantes do vetor y , bem como erros de medição e erros de aproximação associados à escolha da forma funcional. Para estimar a eficiência técnica de cada UTD (ET_i), calcula-se a razão entre a produção observada (y_i) e o produto potencial de fronteira (y_i^*), utilizando-se a expectativa de u_i condicionada ao erro composto e_i (Kumbhakar; Lovell, 2000). Um estimador bastante utilizado para o score de ineficiência ET_i é o proposto por Battese e Coelli (1988):

$$ET_i = \frac{y_i}{\hat{y}_i^*} = \frac{\exp(x_i \beta + v_i) \mathbb{E}[\exp(-u_i) | e_i]}{\exp(x_i \beta + v_i)} = \mathbb{E}[\exp(-u_i) | e_i] \quad (7)$$

Na equação (7), tem-se que $0 \leq ET_i \leq 1$. Quando o produtor consegue aumentar sua produção empregando a mesma quantidade de insumos, o valor de produção que é perdido devido à ineficiência técnica tende a zero, o que significa que a UTD é tecnicamente eficiente e ET_i tende a 1. Por outro lado, um valor próximo de 0 implica estar próximo da máxima ineficiência. Em geral, para a UTD ser considerada como tecnicamente eficiente, a produção deve estar na fronteira de produção estocástica. Sendo assim, o produto não observado tende a ser distribuído uniformemente acima e abaixo da porção determinística da fronteira, e o produto observado tende a situar-se abaixo da parte determinística da fronteira. O produto observado só pode estar acima da parte determinística da fronteira quando o efeito do ruído é positivo e maior que o efeito da ineficiência (Kumbhakar, 2015).

3.2 Especificação do modelo

O modelo proposto considera uma função translog para estimar a eficiência da produção de culturas temporárias nos municípios do Nordeste tratados como Unidades Tomadoras de Decisão (UTDs), condicionada a um conjunto de fatores que afetam a ineficiência técnica. Essa abordagem permite acomodar retornos de escala variáveis, elasticidades cruzadas entre insumos e maior flexibilidade na estrutura produtiva em relação a funções como a Cobb-Douglas. Propõe-se a seguinte especificação translog:

$$\ln(Prod_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln Trabalho_i + \beta_2 \ln Capital_i + \beta_3 \ln Terra_i + \beta_4 \ln Outros_i + \beta_5 \ln^2 Trabalho_i + \beta_6 \ln^2 Capital_i + \beta_7 \ln^2 Terra_i + \beta_8 \ln^2 Outros_i + \beta_9 \ln Trabalho_i \times \ln Capital_i + \beta_{10} \ln Trabalho_i \times \ln Terra_i + \beta_{11} \ln Trabalho_i \times \ln Outros_i + \beta_{12} \ln Capital_i \times \ln Terra_i + \beta_{13} \ln Capital_i \times \ln Outros_i + \beta_{14} \ln Terra_i \times \ln Outros_i + d_m + v_i - u_i$$

em que $Prod_i$ é a produção de lavouras temporárias no município, $Terra_i$, $Capital_i$ e $Trabalho_i$ são os insumos usuais de produção, representa insumos adicionais relevantes para o processo produtivo, como insumos químicos, mecanização ou energia; os termos d_m são dummies que controlam efeitos fixos de microrregião, permitindo captar heterogeneidades estruturais entre agrupamentos de municípios, como diferenças institucionais, de infraestrutura ou agroclimáticas. A escolha pela microrregião, e não por agrupamentos maiores como estados ou biomas, justifica-se pela maior aderência às dinâmicas locais, às cadeias de produção regionalizadas e à variabilidade subnacional observada na agricultura nordestina. Alternativamente, futuras extensões podem explorar agregações por bioma predominante, conforme classificação do IBGE, como proxy para condições ambientais estruturais; e_i é o termo de ineficiência e u_i é o choque não observado, isto é, choques imprevisíveis (como erros de medição ou variações climáticas não modeladas).

Para modelar diretamente a ineficiência técnica, assume-se que o termo de ineficiência segue uma distribuição normal truncada em zero, com média e variância. O vetor é composto por covariáveis que influenciam diretamente a distribuição do termo de ineficiência. Essa modelagem heterocedástica permite captar efeitos não lineares das variáveis explicativas sobre a ineficiência técnica, inclusive situações de retornos decrescentes ou pontos ótimos. Neste estudo, admitimos que o vetor é composto por cinco fatores que afetam a ineficiência técnica de produção, representando determinantes estruturais e ambientais da eficiência municipal:

$$u_i = \delta_1 \text{ Tecnologia} + \delta_2 \text{ Treinamento} + \delta_3 \text{ Financiamento} + \delta_4 \text{ Clima} + \delta_5 \text{ Aglomeração} + \omega_i \quad (9)$$

As variáveis explicativas foram escolhidas com base na literatura sobre eficiência técnica agrícola (Coelli et al., 2005; Battese; Coelli, 1995; Bravo-Ureta et al., 2007). Essas dimensões foram pensadas de forma que representa os estabelecimentos que possuem irrigação; corresponde às propriedades que obtiveram orientação técnica, associada ao conhecimento de boas práticas agrícolas; diz respeito as UTD com acesso ao crédito agrícola; a dimensão refere-se a dados de temperatura e precipitação, dada sua influência direta sobre a produtividade agrícola; e é o número de estabelecimentos com produção de lavouras temporárias em cada município, podendo indicar efeitos de difusão tecnológica, redes de cooperação e concorrência local.

O erro aleatório w_i é definido pelo truncamento da distribuição normal, com média zero e variância σ^2 , sendo truncado no ponto $-z'\delta$, isto é, $w_i \geq -z'\delta$. A fim de captar possíveis efeitos não lineares sobre a ineficiência, a variância do termo u_i também será modelada utilizando-se os mesmos fatores selecionados. Essa suposição é consistente com u_i , sendo, por hipótese, um truncamento não negativo com distribuição $N(z'\delta, \sigma_u^2)$, em resumo, a modelagem da variância de pelos mesmos vetores permite captar se há maior dispersão da ineficiência entre municípios com características específicas, como clima irregular ou baixa densidade produtiva.

Espera-se que: i) um maior acesso à tecnologia reduza a ineficiência, ii) mais acesso a treinamento diminua a ineficiência, dado que produtores mais hábeis proporcionam melhores resultados na produção, iii) uma ampliação do financiamento reduza a ineficiência iv) condições climáticas mais favoráveis reduzam a ineficiência; e v) uma região com mais aglomeração de unidades produtivas possa facilitar a transferência de informações entre elas, ou favorecer a competição local, possivelmente reduzindo a ineficiência local, embora esse efeito possa ser ambíguo, podendo reduzir a ineficiência via externalidades positivas ou aumentá-la em contextos de concentração de recursos entre poucos produtores. A modelagem desses efeitos simultaneamente na média e na variância permite explorar tais nuances, inclusive detectar a existência de pontos de saturação ou retornos marginais decrescentes, como no caso do excesso de aglomeração.

3.3 Base de dados

Para a estimação da fronteira estocástica de produção foram utilizados dados públicos do Censo Agropecuário 2017 para os municípios nordestinos, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para a construção da variável resposta, foi utilizado a razão entre o valor da produção das culturas temporárias no município e o número de unidades produtivas de lavouras temporárias do mesmo município.¹ Com base nessa normalização, o município atua como a “fazenda representativa”, sendo nossa Unidade Tomadora de Decisão.

Para a variável Terra, foi considerado a soma da área utilizada no plantio de lavouras temporárias no município. O insumo trabalho é medido pelo agregado de mão de obra ocupada em lavouras temporárias. A variável Capital é dada pelo total de tratores, máquinas e implementos agrícolas utilizados nas lavouras temporárias do município. A variável é composta pelas despesas totais com sementes, adubos, agrotóxicos e energia elétrica. As variáveis Terra, Trabalho, Capital e Outros também foram normalizadas pelo número de unidades produtivas de lavouras temporárias de cada município.

¹ As culturas temporárias selecionadas foram: sorgo granífero, cebola, alho, tomate, batata-doce, batata-inglesa, algodão herbáceo, cana-de-açúcar, aveia branca em grão, amendoim, melancia, linho, arroz, feijão em geral, centeio em grão, melão, fumo, cevada em casca, milho, mamona, colza (canola), mandioca, fava, ervilha em grão, abóbora, moranga, jerimum, abacaxi, malva, gergelim, juta, triticale, soja, trigo em grão/preto, sementes, sorgo vassoura, rami, forrageiras, girassol, mamona e outros produtos.

Como proxy para o fator sobre ineficiência técnica foi utilizado a proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias com o uso de irrigação. O fator foi representado pela proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias que obtiveram algum tipo de financiamento do seu processo produtivo, incluindo crédito rural via instituições financeiras públicas ou privadas, cooperativas de crédito, fornecedores e comerciantes, ONG, entre outros. A proxy para o fator foi a proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias que receberam algum tipo de orientação técnica, seja via instituições governamentais, cooperativas, empresas privadas, ONG, Sistema S, de iniciativa própria do produtor, entre outras. Para o fator foi utilizado o logaritmo do total de unidades produtivas de lavouras temporárias no município. Para o fator , usou-se o logaritmo da média de 20 anos da precipitação total anual para cada município, bem como o logaritmo da média de 20 anos da temperatura média anual de cada município, ambas calculadas no período 1997-2016.

As proxies para os fatores Tecnologia, Financiamento, Treinamento e Aglomeração foram obtidas por meio dos dados públicos do Censo Agropecuário 2017 para os municípios nordestinos. Para a construção das variáveis climáticas, foram utilizados os dados de satélite disponibilizados pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF, 2023). O Quadro 1 apresenta as variáveis selecionadas.²

Quadro 1 - Variáveis utilizadas para mensurar a eficiência

Variáveis	Descrição	Fonte
Variável resposta		
Prod	Razão entre o valor da produção das lavouras temporárias, em R\$ mil, e o número de unidades de produção de lavouras temporárias.	IBGE
Insumos		
Trabalho	Razão entre o pessoal ocupado na produção de culturas temporárias e o número de unidades de produção de lavouras temporárias.	IBGE
Capital	Razão entre o número de máquinas, tratores e implementos agrícolas empregados na produção de culturas temporárias e o número de unidades de produção de lavouras temporárias.	IBGE
Terra	Razão entre a área total utilizada na produção de culturas temporárias em hectares, e o número de unidades de produção de lavouras temporárias.	IBGE
Outros	Razão entre as despesas totais com outros insumos (sementes, adubos, agrotóxicos, energia elétrica), em R\$ mil, e o número de unidades de produção de lavouras temporárias.	IBGE
Fatores de Influência da Ineficiência Técnica		
Tecnologia: Irrigação	Proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias com o uso de irrigação.	IBGE
Treinamento: Orientação	Proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias que receberam algum tipo de orientação técnica.	IBGE
Financiamento: Crédito	Proporção de unidades produtivas de lavouras temporárias que obtiveram algum tipo de financiamento.	IBGE
Aglomeração: Unidades	Total de unidades produtivas de lavouras temporárias.	IBGE
Clima: Precipitação	Média de 20 anos da precipitação total anual do município.	ECMWF
Clima: Temperatura	Média de 20 anos da temperatura média anual do município.	ECMWF

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis. Na segunda parte da seção, examinam-se as estimativas da fronteira estocástica de produção, identificando fatores que influenciam a eficiência técnica produtiva das lavouras temporárias nos municípios do Nordeste. Na terceira parte, analisa-se a distribuição de cada fator que influencia a ineficiência da produção das unidades produtoras nos municípios. Por fim, apresenta-se uma análise espacial da eficiência da produção no Nordeste.

² Devido à natureza pública dos dados do Censo Agropecuário, diversas observações têm seus valores inibidos (faltantes) para não identificar o informante. Nas lavouras temporárias, a variável Capital é a que apresenta a maior quantidade de dados faltantes: do total de 1793 municípios, há 589 com dados faltantes para o ano de 2017. Há 461 municípios com resultado zero para Capital. Devido à natureza logarítmica da fronteira estocástica, isso resulta numa perda potencial de 1050 Unidades Tomadoras de Decisão (58,56% dos municípios) devido à variável Capital. A fim de reduzir o viés de dados faltantes, decidiu-se por imputar aos municípios com observações inibidas da variável Capital a média do número de máquinas, tratores e implementos agrícolas empregados na produção de culturas temporárias da microrregião a qual o município pertence. Em seguida, foi calculada a razão entre esse resultado e o número de unidades de produção de lavouras temporárias do respectivo município. Após a imputação, verificou-se a presença de 554 municípios com resultado zero para a variável Capital, que são excluídos da amostra. Ademais, optou-se por não imputar os valores inibidos da variável resposta, que totalizam 87 municípios. Isso resulta em 1152 municípios nordestinos efetivamente disponíveis para a análise de eficiência técnica da produção de culturas temporárias via fronteira estocástica de produção.

4.1 Estatísticas descritivas das variáveis

A Tabela 1 traz as estatísticas descritivas das variáveis selecionadas. A análise da variável de produção de culturas temporárias, apresenta uma média de R\$ 71,7 mil reais por hectare, com uma grande assimetria, dado que a mediana da produção foi de R\$ 4,37 mil. Esses estabelecimentos ocupam em média quatro pessoas, demonstrando uma baixa utilização do fator trabalho. Em relação às máquinas, tratores e implementos agrícolas, registra-se uma baixa utilização, de menos de 0,2 unidades de capital em média. No que se refere aos fenômenos climáticos, observam-se temperaturas elevadas, com a média anual variando entre 20°C e 28°C. As chuvas se mostram escassas, com média anual de 889 mm, que configura a rigidez climática da seca, além de serem mal distribuídas entre os municípios.

Tabela 1 – Região Nordeste - Estatísticas Descritivas (Censo Agropecuário 2017)

Variáveis	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo
Produção (R\$ mil)	1152	71,728	4,368	403,142	0,2312	7,411
Trabalho (und)	1152	4,439	3,035	10,927	1,154	244,250
Capital (und)	1152	0,1839	0,0351	0,7474	0,0004	13,074
Terra (ha)	1152	18,297	1,991	94,054	0,2073	1.599,379
Outros (R\$ mil)	1152	28,429	1,439	178,458	0,0576	3.649,438
Tecnologia (und)	1152	0,1024	0,0458	0,1512	0	0,9907
Treinamento (und)	1152	0,0750	0,0451	0,0896	0	0,7078
Financiamento (R\$ mil)	1152	0,1058	0,0944	0,0666	0	0,4333
Precipitação (mm)	1152	899,753	821,761	287,387	411,637	1.942,109
Temperatura (°C)	1152	25,221	25,189	1,296	20,480	28,136
Aglomerado (und)	1152	609,526	421	606,655	4	4310

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

A respeito das variáveis que podem ocasionar ganhos de eficiência na matriz de produção, Tecnologia, Treinamento e Financiamento devem ser analisados. No quesito Tecnologia, em média apenas 10,2% das unidades produtivas possuem sistemas de irrigação. Em Treinamento, somente cerca de 7,5% dos estabelecimentos receberam orientação. E no quesito Financiamento, apenas cerca de 10,6% dos estabelecimentos conseguiram acesso a esses recursos.

4.2 Fatores que influenciam a eficiência técnica de produção

A Tabela 2 apresenta os resultados da estimação do modelo de fronteira de produção estocástica, em uma função translog, com coeficientes extras. O Teste LR para decisão entre translog ou Cobb-Douglas resultou em: = 68.62 (p-valor ≈ 0), rejeitando-se a função Cobb-Douglas. Já o teste da razão Verossimilhança rejeita a hipótese nula = 0 de aninhamento das funções, ou seja, os coeficientes extras da função translog são conjuntamente significativos e trazem informações adicionais ao modelo.

Na estimação da translog, tomando como base as elasticidades da função, os resultados se mostram significativos para o fator Terra e para o fator Capital, embora este apareça como menos relevante que a variável que representa outros fatores, relacionados às despesas totais com insumos. Isso possivelmente se deve ao fato de que há uma utilização da capital muito pequena na média das unidades produtivas na região. Já em relação à elasticidade do fator Trabalho, os resultados apontam uma não significância do estimador. Uma das principais causas desse resultado está associada à baixa incidência do Capital relativamente ao Trabalho na distribuição dos municípios nordestinos. Apesar de o coeficiente cruzado entre Capital e Trabalho ser positivo e significativo, o baixo nível médio no uso de capital e na razão capital-trabalho no Nordeste³ efetivamente reduz a elasticidade do trabalho, ampliando a incerteza do seu efeito na produção. Os demais fatores de produção são significativos, com sinal conforme o esperado.

³ Com exceção em regiões com produção de culturas de uso intenso de maquinário agrícola, como na região do MATOPIBA, por exemplo, em que o capital médio por unidade de produção é de 0.54 e a razão média capital-trabalho é de 0.11, enquanto no resto do Nordeste o capital médio é de 0.12 e razão média capital-trabalho é de 0.024. Em termos de culturas específicas intensivas em capital, destaca-se a soja, que tem uma presença importante na região Nordeste, com saídas da Bahia e do Piauí. Trata-se de uma cultura considerada intensiva, devido ao uso de maquinário agrícola moderno, sementes geneticamente modificadas e fertilizantes, além de técnicas avançadas de plantio e manejo.

Tabela 2 - Estimativas da Fronteira Estocástica

Variáveis	Coefficientes Translog	Elasticidades Translog	Coefficientes Cobb-Douglas
Trabalho	.3879** (.189)	.0946 (.085)	.1125*** (.038)
Capital	.0566 (.056)	.0703*** (.021)	.0511*** (.016)
Terra	.7079*** (.105)	.5711*** (.040)	.6894*** (.027)
Outros	.2392*** (.094)	.2969*** (.027)	.2613*** (.022)
Trabalho X Trabalho	.0631 (.053)		
Capital X Capital	.0084 (.005)		
Terra X Terra	.1260*** (.021)		
Outros X Outros	-.0053 (.015)		
Trabalho X Capital	.0677** (.033)		
Trabalho X Terra	-.2517*** (.051)		
Trabalho X Outros	.1199** (.049)		
Capital X Terra	-.0378* (.020)		
Capital X Outros	-.0031 (.016)		
Terra X Outros	-.0917*** (.029)		
Constante	1.3652 (.273)		1.9245 (.215)
log-verossimilhança	-517.1525		-551.4622
$E(\sigma_u)$.2409***		
σ_v	.3290***		

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos em parênteses. ***Significativo a 1%; **Significativo a 5%; *Significativo a 10%.

A soma das elasticidades estimadas pela translog resulta em 1.033 (erro-padrão de 0.092), significativa a 1%. Ademais, não se rejeita a hipótese nula de retornos constantes de escala (p-valor de 0.722). Definida a função de estimação translog, seguiu-se a modelagem de elementos que afetam a ineficiência. Ainda a partir dos resultados da Tabela 2, observa-se que o desvio-padrão médio estimado do termo de ineficiência (0.2409), estatisticamente diferente de zero, evidencia a existência de uma distribuição de ineficiência ao longo dos municípios. A razão entre o desvio-padrão médio estimado do termo de ineficiência (σ_u) e o desvio-padrão estimado do erro idiossincrático (σ_v) é elevada ($0.2409/0.3290 = 0.7322$). Isso também indica a existência de uma influência não desprezível da ineficiência sobre o processo produtivo de lavouras temporárias no Nordeste.

A análise dos elementos que afetam a ineficiência, como deficiências na infraestrutura de irrigação (Tecnologia), falta de orientação técnica (Treinamento), baixo acesso a recursos financeiros, e cooperação limitada entre os estabelecimentos, permite identificar áreas de melhoria e fornecer indicações para o desenvolvimento de políticas e estratégias que visam aumentar a eficiência na agricultura na região. A Tabela 3 apresenta os elementos que, por hipótese, afetam a ineficiência técnica, com os respectivos coeficientes estimados da média e da variância destes.

Tabela 3 – Estimativas para os fatores de influência da ineficiência técnica

Variáveis	Média	Variância
Tecnologia	-2.7884*** (.912)	.2696 (1.152)
Treinamento	-.5816 (.486)	-.6229 (2.115)
Financiamento	-.8055* (.432)	1.8689 (1.897)
Log Precipitação	-1.4765*** (.198)	-1.7787** (.894)
Log Temperatura	1.3415 (1.144)	-6.7249** (3.466)
Log Aglomeração	.0672** (.033)	-.5457*** (.156)
Constante	5.8512 (4.075)	33.7186*** (12.090)

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Observa-se que a irrigação, proxy para a Tecnologia, contribui de forma significativa para reduzir ineficiência média. O acesso a Financiamento também se mostra estatisticamente significativo, assim como a variável Precipitação, ambas coerentes com a literatura. Já em relação à Aglomeração de unidades produtivas, constata-se um efeito ambíguo. Por um lado, há um leve incremento da ineficiência média nos municípios com maior número de estabelecimentos agrícolas, o que pode estar associado a restrições estruturais não captadas diretamente no modelo. Por outro lado, há evidências de que a elevação do número médio de propriedades agrícolas contribui para a reduzir a dispersão da ineficiência técnica, aproximando os produtores em termos de eficiência de produção. Esse achado pode refletir mecanismos de transbordamento de informação (spillover) e aprendizado social, frequentemente observados em contextos com alta densidade de produtores agrícolas (Foster; Rosenzweig, 1995). Nessas situações, práticas produtivas bem-sucedidas tendem a ser difundidas informalmente por observação ou interação entre vizinhos e redes locais. Além disso, uma maior densidade de unidades pode intensificar a competição local, levando à padronização de práticas produtivas e à eliminação de comportamentos tecnicamente ineficientes.

Assim, ainda que a ineficiência média permaneça relativamente estável ou até ligeiramente elevada, a redução da dispersão indica uma possível convergência técnica entre as UTDs, sugerindo que os produtores menos eficientes tendem a melhorar seu desempenho em função do ambiente mais dinâmico e interativo. Também é plausível que a maior presença de propriedades favoreça a provisão de infraestrutura compartilhada e serviços de apoio à produção, como assistência técnica, extensão rural e canais de comercialização, os quais podem reduzir desigualdades no acesso a fatores produtivos e mitigar os efeitos da ineficiência extrema.

Um ponto relevante é que não há evidência de efeito significativo do Treinamento sobre a média ou variância da ineficiência técnica. Nos últimos anos, a assistência técnica na agricultura brasileira apresentou redução na cobertura entre o período compreendido pela realização dos censos agropecuários de 2006 e 2017. Desse modo, o efeito captado pode ser decorrente de redução geral da assistência técnica, demonstrando pouca diferenciação estatística entre os municípios. De acordo com Pereira e Castro (2021), 80% dos estabelecimentos agropecuários não contam com qualquer tipo de atendimento, reforçando a necessidade de reestruturar o serviço de assistência técnica.

4.3 Análise da ineficiência na distribuição da produção: efeitos não-monotônicos

Estimados os fatores de influência da ineficiência, buscou-se testar a existência de efeitos não monotônicos sobre produção. Assim, faz-se necessário estimar o efeito marginal médio ao longo da distribuição empírica dos fatores que, por hipótese, afetam diretamente a ineficiência das Unidades Tomadoras de Decisão (UTD)⁴. Inicialmente, para cada coeficiente, foi analisado o comportamento da média e da variância, supostas não constantes, observando os quantis da distribuição. Em seguida, observou-se o comportamento da distribuição de cada fator de influência.

A análise inicial, a partir da Tabela 4, apresenta os quantis dos fatores selecionados, que foram utilizados para calcular o efeito marginal médio sobre a ineficiência, ao longo da distribuição de cada covariável. Destaca-se a baixa incidência de Tecnologia, Treinamento e Financiamento na distribuição das UTD.

Tabela 4 – Quantis dos fatores de influência da ineficiência técnica

Variáveis	q10	q20	q30	q40	q50	q60	q70	q80	q90
Tecnologia	.0039	.0111	.0198	.0298	.0458	.0657	.0991	.1508	.2767
Treinamento	.0072	.0155	.0241	.0324	.0451	.0607	.0802	.1111	.1785
Financiamento	.0307	.0492	.0648	.0806	.0944	.1116	.1288	.1538	.1969
Precipitação	605.81	674.91	727.53	778.32	821.76	887.12	971.53	1080.15	1359.69
Temperatura	23.46	24.12	24.58	24.86	25.18	25.65	26.08	26.44	26.87
Aglomerção	93	163	239	321	421	512	668	979	1414

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Por exemplo, em 60% dos municípios a irrigação é utilizada em menos de 7% das unidades produtoras (q60, tecnologia). Resultado semelhante é encontrado para a orientação técnica (q60, treinamento). Considerando ainda 60% dos municípios, observa-se que somente cerca de 12% das unidades produtoras obtiveram algum tipo de crédito (q60, financiamento).

A Tabela 5 apresenta a estimativa do efeito marginal médio para cada intervalo interquantil definido com base nos quantis da Tabela 4. Observa-se a identificação de efeitos significativos e não monotônicos (decrecentes) para as variáveis tecnologia, financiamento e precipitação. Os demais fatores apresentam coeficientes não significativos.

No caso dos fatores Financiamento (crédito) e Precipitação, há não apenas efeitos decrecentes ao longo da distribuição, mas também um esgotamento do efeito na cauda direita, representada pelo intervalo [q90, max], com coeficiente não significativo. Não apenas há uma forte redução na magnitude do efeito no quantil mais elevado desses fatores, como a incerteza é bastante elevada. Em municípios em que as propriedades são mais atendidas por Financiamento, por exemplo, incrementos marginais no acesso ao crédito não geram, em média, retornos em termos de redução da ineficiência.

Para uma melhor compreensão da magnitude dos efeitos estimados, a Figura 1 mostra a distribuição da ineficiência técnica, cuja média estimada é de aproximadamente 0.40 pontos. Logo, para os municípios que se encontram no intervalo [q40, q50] de tecnologia (de acordo com a Tabela 4, em que o total de propriedades atendidas com irrigação está entre 3,24% e 4,51%), por exemplo, estima-se que um incremento de 1 ponto percentual no total de unidades atendidas com irrigação gera uma redução de $-2.0034 \times 0.01 = -0.02$ pontos na ineficiência média.

⁴ Como explica Wang (2002), o efeito marginal das covariáveis que afetam a ineficiência é calculado para cada Unidade Tomadora de Decisão, pois depende da variância da ineficiência (, suposta não constante ao longo das UTD, e da média do termo de ineficiência também suposta não constante. Além disso, como tanto a variância quanto a média do termo de ineficiência foram parametrizados no presente estudo, o efeito marginal médio de cada covariável depende de ambos os coeficientes apresentados na Tabela 3, o que permite identificar efeitos não lineares ao longo da distribuição das UTD.

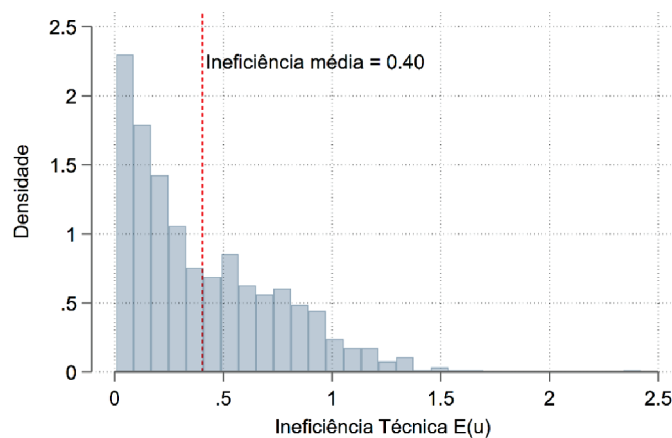
Tabela 5 – Efeito marginal médio sobre a ineficiência técnica

Intervalo Interquantil	Tecnologia	Treinamento	Crédito	Log Precipitação	Log Temperatura	Log Aglomeração
[min, q10]	-1.8895** (.742)	-.3902 (.641)	-.3192** (.149)	-1.3245** (.480)	-.0848 (.870)	-.0463 (.030)
[q10, q20]	-1.9300*** (.721)	-.3797 (.665)	-.4086** (.170)	-1.2768*** (.481)	.2379 (.788)	-.0198 (.024)
[q20, q30]	-1.9748*** (.699)	-.3750 (.647)	-.4258** (.182)	-1.2442** (.494)	.7132 (.913)	-.0089 (.020)
[q30, q40]	-2.0111*** (.682)	-.3805 (.589)	-.3680** (.168)	-1.2065** (.477)	.6577 (.890)	.0012 (.021)
[q40, q50]	-2.0034*** (.680)	-.3981 (.579)	-.4396** (.179)	-1.1641** (.474)	.4718 (.801)	.0112 (.025)
[q50, q60]	-1.8503*** (.621)	-.3945 (.569)	-.4583** (.191)	-1.0364** (.435)	.5289 (.868)	.0176 (.026)
[q60, q70]	-1.6944*** (.552)	-.3692 (.519)	-.3949** (.180)	-.8768** (.367)	.4456 (.833)	.0225 (.027)
[q70, q80]	-1.5255*** (.509)	-.3817 (.481)	-.3983** (.189)	-.7972** (.368)	.4354 (.828)	.0313 (.030)
[q80, q90]	-.9809*** (.299)	-.3863 (.442)	-.3393** (.172)	-.5375* (.304)	.5008 (.996)	.0412 (.033)
[q90, max]	-.4299** (.200)	-.3076 (.355)	-.1912 (.182)	-.1981 (.266)	.3791 (1.121)	.0512 (.036)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Notas: Em parênteses, erros-padrão gerados por bootstrap com 1.000 replicações. O efeito marginal médio é calculado ao longo do intervalo interquantil de cada covariável selecionada. ***Significativo a 1%; **Significativo a 5%; *Significativo a 10%.

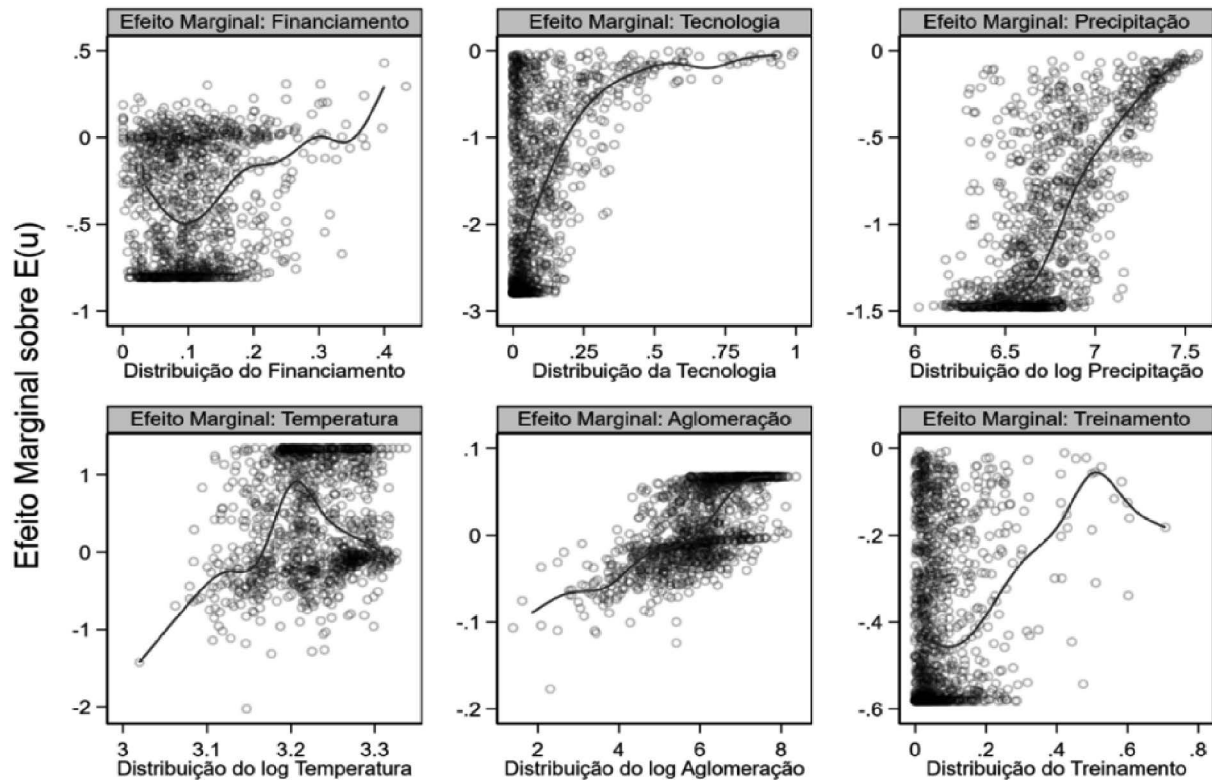
Figura 1 – Distribuição da ineficiência técnica estimada ao longo dos municípios do Nordeste



Fonte: Elaborada pelos autores.

Uma segunda análise busca computar os efeitos marginais condicionais a cada UTD, complementando a estratégia de estimação do efeito marginal médio dentro dos intervalos interquantis. A Figura 2 mostra a tendência dos efeitos marginais ao longo de toda a distribuição dos municípios nordestinos produtores de lavouras temporárias. Para auxiliar na visualização da tendência, um spline cúbico também foi estimado.

Figura 2 – Efeito marginal médio sobre a ineficiência ao longo da distribuição dos fatores de influência



Fonte: Elaborada pelos autores.

Nota: Os círculos pretos representam os municípios nordestinos (Unidades Tomadoras de Decisão). A linha sólida representa a estimativa de um spline cúbico entre o efeito marginal (eixo vertical) e a distribuição dos fatores de influência ao longo das UTDs (eixo horizontal).

Observa-se a redução do efeito marginal da Irrigação, proxy para tecnologia, e da Precipitação ao longo da distribuição das UTDs. De todo modo, todas as estimativas pontuais se encontram abaixo do eixo nulo, indicando uma contribuição efetiva para a redução da ineficiência. Além da Tecnologia, é importante observar o comportamento de outros fatores em tese importantes para reduzir a ineficiência, como Treinamento e Financiamento. Nota-se que os efeitos marginais do Treinamento e do Financiamento sobre a ineficiência não apresentam um padrão claro na sua distribuição, com uma grande volatilidade na magnitude dos efeitos. Embora se encontrem abaixo do eixo, o que indicaria um efeito negativo sobre a ineficiência, o comportamento da distribuição desses fatores contribui para a incerteza dos efeitos marginais médios estimados para as respectivas variáveis.

4.4 Análise espacial da eficiência produtiva no Nordeste

A análise buscou ainda fazer uma aproximação espacial da eficiência nas lavouras temporárias, considerando os principais fatores relevantes. No Nordeste, em 2020, em termos da produção de grãos, a Bahia foi o principal produtor, com 42,0% de participação regional. O Maranhão teve a segunda maior participação na Região 25,8%. E o Piauí foi o terceiro maior produtor, com 24,5% da produção. Os demais estados - Alagoas, Pernambuco, Rio grande do Norte e Sergipe - representam, em conjunto, 4,8% da produção de grãos do Nordeste. O Ceará e a Paraíba apresentaram declínio na produção das culturas de grãos (ETENE, 2020). A Tabela 6 apresenta a eficiência média do Nordeste e de suas unidades federativas a partir do modelo estimado.

A eficiência média da Região Nordeste é 0.7102. Com base nos resultados estimados, existe uma perda média de aproximadamente 29% no produto devido à ineficiência técnica. Para Conceição e Araújo (2000), um nível de eficiência acima de 70% não pode ser considerado baixo, contudo, evidencia que ainda há espaço para aumentar o desempenho das lavouras por meio da promoção da eficiência.

Além de quantificar essas diferenças, o objetivo da análise espacial da eficiência técnica é fornecer uma visualização clara das disparidades regionais, de modo a subsidiar políticas públicas mais bem direcionadas pelos governos estaduais. Ao identificar os estados com maiores perdas relativas de eficiência e mapear os determinantes técnicos da produção agrícola, são apresentadas evidências empíricas que podem orientar intervenções específicas, como a ampliação da assistência técnica, o fomento à irrigação, o aprimoramento do crédito rural ou a modernização tecnológica, adaptadas às realidades produtivas de cada território.

Tabela 6 – Eficiência média dos estados

UF	UTD	Eficiência Média	Eficiência Mediana	Desvio-Padrão	Mínimo	Máximo
Alagoas	83	0,6523	0,7192	0.222	0,2350	0,9428
Bahia	316	0,7084	0,7481	0.174	0,2640	0,9886
Ceará	114	0,6222	0,5979	0.142	0,3611	0,9430
Maranhão	141	0,9518	0,9574	0.032	0,8360	0,9931
Paraíba	92	0,6014	0,5980	0.188	0,2020	0,9476
Pernambuco	145	0,6123	0,6046	0.220	0,2301	0,9711
Piauí	137	0,8033	0,8458	0.154	0,4057	0,9913
Rio Grande do Norte	70	0,6194	0,5903	0.207	0,0928	0,9458
Sergipe	54	0,6939	0,7106	0.155	0,3115	0,9751
Nordeste	1152	0,7102	0,7546	0,203	0,0928	0,9931
MATOPIBA	164	0,9102	0,9404	0.082	0,5523	0,9859
Nordeste sem MATOPIBA	988	0,6770	0,6903	0,198	0,0928	0,9931

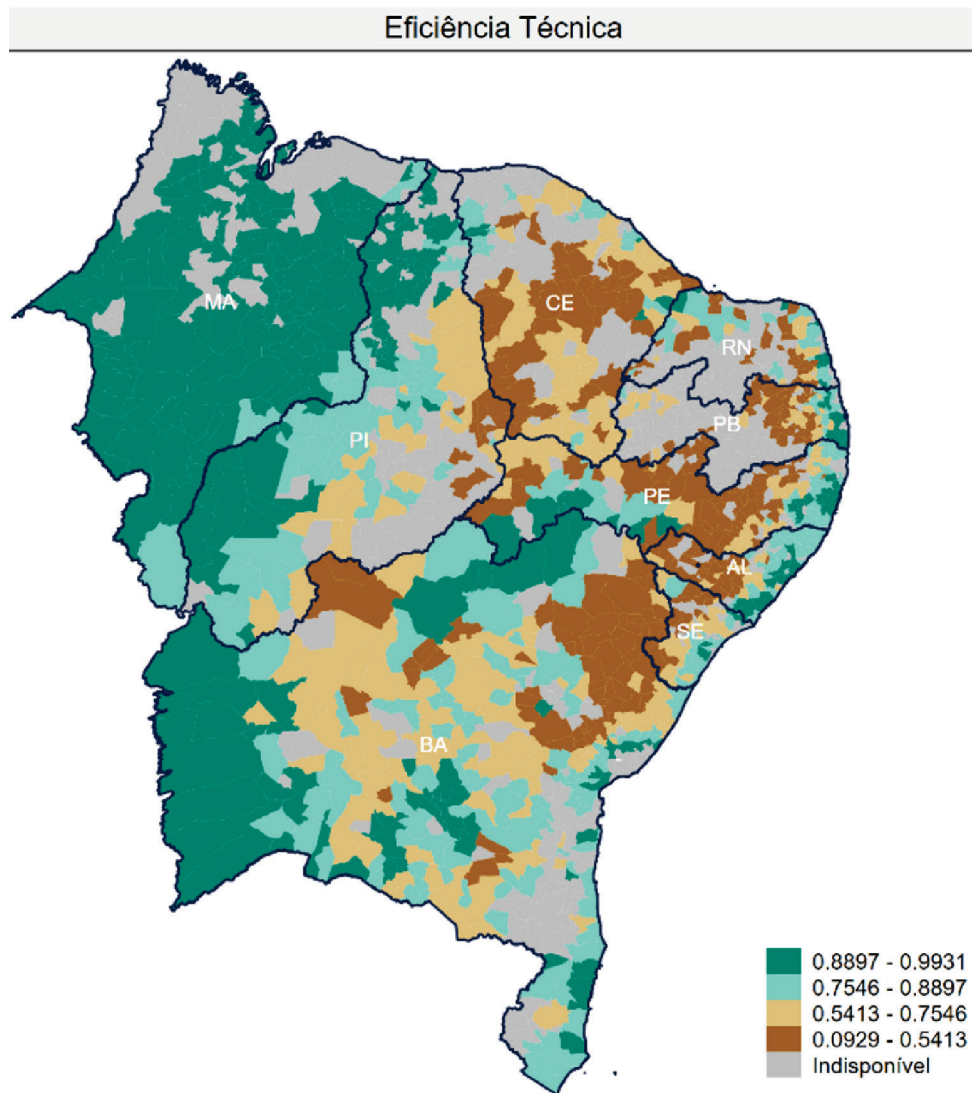
Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados evidenciam disparidades significativas na eficiência técnica das lavouras temporárias entre os estados nordestinos, com destaque positivo para Maranhão, Piauí e Bahia, e desempenho inferior nos estados da faixa litorânea e agreste, como Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. A eficiência média de 0,7102 na região aponta que, embora o uso dos insumos esteja relativamente adequado, ainda há um potencial considerável de ganho de produtividade sem necessidade de ampliação dos fatores de produção.

Essas diferenças regionais sinalizam a urgência de políticas públicas mais direcionadas e territorialmente sensíveis. Estados com menor eficiência relativa devem ser priorizados em ações como expansão da assistência técnica, investimento em tecnologias adaptadas ao clima local, melhoria no acesso ao crédito rural e fomento à cooperação entre unidades produtivas. A análise espacial da eficiência técnica, portanto, não apenas descreve o cenário produtivo, mas fornece base empírica para intervenções governamentais que promovam maior equidade e dinamismo agrícola no Nordeste.

A Figura 3 traz a distribuição espacial da eficiência estimada dos municípios nordestinos para a produção de lavouras temporárias. Observa-se que as UTDs mais eficientes na produção das lavouras temporárias estão localizadas no Maranhão. As análises confirmam padrões já reconhecidos na literatura, como a concentração de eficiência técnica em regiões como o Cerrado (MATOPIBA), o polo Juazeiro-Petrolina e a Chapada Diamantina. Essa confirmação sugere que o modelo adotado é sensível a estruturas produtivas consolidadas, o que reforça sua utilidade como base para análises futuras com distintas agregações espaciais dos municípios.

Figura 3 – Distribuição espacial da eficiência técnica na produção de lavouras temporárias sobre a amostra efetiva de municípios do Nordeste



Fonte: Elaborada pelos autores.

Dentre as maiores culturas temporárias, a cana é produzida uniformemente na região, assim, supõe-se que o diferencial quanto à produtividade é a soja. Isso porque a soja é produzida tecnicamente nos estados mais eficientes e sua produção requer altos níveis tecnológicos. É considerável destacar a região do MATOPIBA, formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, conhecida por seu potencial agrícola. Leva-se em consideração a composição entre insumos e produto para considerar uma região tecnicamente eficiente.

A região do MATOPIBA apresenta uma eficiência média (0,9102) e mediana (0,9404) relativamente alta, em comparação com o restante do Nordeste. Isso indica que, em média, a região apresenta uma alta proporção de unidades produtivas alcançando bons resultados. Além da soja, a região do MATOPIBA é relevante na produção de outros grãos, especialmente milho e algodão. Vale enfatizar também a cultura do arroz no Maranhão, que é o maior produtor no Nordeste, e tem a maior parte das lavouras de arroz irrigadas.

Embora este estudo não tenham sido tratados explicitamente os biomas por meio de variáveis indicadoras (dummies), a evidência empírica sugere que áreas inseridas no bioma Cerrado, como a região do MATOPIBA, tendem a apresentar níveis mais elevados de eficiência, possivelmente em virtude de fatores como mecanização intensiva, escala de produção e uso de tecnologia. Da mesma forma, municípios localizados na faixa litorânea, e nos demais biomas, todos com características produtivas distintas, merecem análise específica quanto às condições estruturais que afetam o desempenho agrícola.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento da eficiência técnica sobre a produtividade agrícola das lavouras temporárias no Nordeste do Brasil. Foi utilizada a fronteira de produção estocástica, proposta por Battese e Coelli (1995), com a forma funcional flexível do tipo translog. A modelagem proposta utilizou fatores relevantes para explicar a eficiência produtiva, além de trazer a análise sobre elementos para reduzir a ineficiência na produção de lavouras temporárias na região.

Foram considerados, a partir da literatura, os fatores clássicos de uma função de produção, como Terra, Capital e Trabalho, além de insumos relevantes, agrupados no fator Outros, para determinar a eficiência. Foi analisada ainda a influência de elementos que ajudariam a reduzir a ineficiência encontrada na região. Nessa modelagem, foram considerados elementos relacionados ao clima, como Temperatura e Precipitação, importantes pelas características da região. Foram ainda considerados outros elementos, como Aglomeração das unidades produtoras. Por fim, foram considerados elementos como Treinamento, Financiamento e Tecnologia, que tinham maior nível esperado de influência sobre a produtividade.

Importa destacar que os resultados obtidos refletem não apenas os efeitos diretos dos insumos sobre a produção, mas também captam as heterogeneidades estruturais entre os municípios, as quais foram consideradas por meio da introdução de dummies para microrregiões no modelo. Essa abordagem permite controlar diferenças não observadas relacionadas a aspectos geográficos, climáticos, infraestruturais e institucionais, proporcionando uma quantificação mais precisa dos fenômenos analisados. Dessa forma, reforça-se a robustez das estimativas, uma vez que os efeitos dos insumos são estimados condicionalmente às variações estruturais presentes no espaço geográfico nordestino.

Em relação aos resultados do estudo, partindo das estimativas das elasticidades, são significativos para melhorar a eficiência o fator Terra, assim como os fatores Capital e Outros insumos. Um achado que chama atenção está associado ao fator Outros, representado por despesas com insumos (como sementes, adubo, agrotóxicos e energia elétrica) que tem efeito maior do que a presença de Capital (máquinas, tratores e implementos agrícolas) no espaço. Isso sugere que os recursos financeiros gastos com insumos e tecnologias agrícolas têm um impacto significativo na eficiência e produtividade agrícola.

Já o fator Trabalho, embora essencial para o cálculo do valor da produção agrícola, parece não contribuir para melhorar a eficiência. Isso indica a necessidade de aprimorar o capital humano na região, por meio da capacitação dos trabalhadores, de modo a incrementar o uso do conhecimento na produção.

No que concerne à modelagem da ineficiência técnica, as variáveis Temperatura e Treinamento não contribuíram para a redução da ineficiência média das lavouras. A Temperatura possivelmente não é significativa devido à reduzida diferenciação nesse quesito, nos diversos municípios da região. E o Treinamento pode não estar diretamente associado à redução da ineficiência técnica média em função da baixa utilização entre as UTD na região, devido à desmobilização dos órgãos de assistência técnica rural. Ainda assim, deve-se ressaltar que o Treinamento pode contribuir para que os agricultores otimizem os recursos e aprimorem as técnicas de manejo, levando a práticas mais eficientes nas lavouras.

Com relação à variável Aglomeração, os resultados indicam uma possível existência de efeito de transbordamento entre os estabelecimentos, mas com incerteza estatística elevada, refletida na variância. Uma possibilidade de política seria o incentivo à permanência no campo e a criação de novas unidades produtivas rurais. Isso poderia promover a formação de cooperativas agrícolas, de forma a disseminar práticas e gerar uma maior homogeneidade de eficiência. Para a redução da ineficiência, mostraram-se significativas também as variáveis de Precipitação, Financiamento e Tecnologia.

A variável Precipitação, ou seja, a quantidade e a distribuição de chuva ao longo do tempo, é um fator crítico para o desenvolvimento das culturas. Nesse sentido, a disponibilidade de água para irrigação pode ser particularmente relevante em regiões onde a precipitação é irregular. Cabe destacar que a região demanda intensamente gastos com adubo, agrotóxico, energia e água para manter uma área irrigada. A má utilização desses mesmos fatores pode também estar relacionada à baixa qualificação da mão de obra.

A variável Financiamento, representada pelo acesso ao crédito rural, viabiliza a ampliação das atividades produtivas por parte dos agricultores, possibilitando tanto o custeio da produção quanto a realização de investimentos em insumos e tecnologias agrícolas modernas e mais eficientes. Além disso, o crédito agrícola contribui para melhorar as condições de comercialização da produção, ao favorecer a implantação de estruturas adequadas de armazenagem e transporte. Políticas públicas voltadas ao financiamento do setor agrícola também podem desempenhar um papel estratégico na promoção de práticas produtivas mais sustentáveis e no uso adequado dos recursos.

No tocante à Tecnologia, podem ser incluídos nesse rol o uso de máquinas agrícolas modernas, sensores e monitoramento de culturas, sistemas de informação geográfica e outras tecnologias relacionadas, além de sistemas de irrigação eficientes. Pode-se assim otimizar o uso dos recursos, reduzir os custos de produção e melhorar a qualidade e o rendimento dos produtos agrícolas. É importante considerar que a expansão da área irrigada requer investimentos em infraestrutura de irrigação, como construção de sistemas de captação e distribuição de água. Políticas de investimento nesse sentido podem ajudar a reduzir a dependência das culturas em relação à precipitação natural e garantir um suprimento adequado de água durante períodos de estiagem. Além disso, a irrigação pode proporcionar condições ideais para o cultivo de culturas de alto valor, diversificando a produção agrícola na região.

Estudos recentes demonstram que os sistemas produtivos vinculados às culturas temporárias reagem de forma significativa à expansão do crédito rural, à modernização das práticas agrícolas e à incorporação tecnológica. Essa informação reforça o potencial dessas culturas como vetor para o fortalecimento regional e redução de desigualdades históricas entre as macrorregiões brasileiras, sobretudo nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Tais regiões, ao receberem investimentos direcionados à agricultura temporária, tendem a ampliar o valor agregado da produção local, sem reproduzir os padrões concentradores observados nas regiões Sul e Sudeste (Cruz et al., 2024).

Em relação aos resultados entre as unidades espaciais, envolvendo estados e municípios, é possível concluir que as lavouras temporárias no Nordeste possuem eficiência técnica média (71%). Isso sugere que a maior parte dos recursos está sendo utilizada de forma eficiente e que há um bom equilíbrio entre os insumos e os resultados obtidos na produção. Entretanto, permanece a evidência de que a ineficiência técnica média da região contribui com 29% dos desvios em relação à fronteira, o que mostra uma margem considerável para melhorar a produtividade e eficiência das UTD nas lavouras temporárias.

Os resultados indicam ainda que os estados mais eficientes na produção das lavouras temporárias são Maranhão, Piauí e Bahia, respectivamente. Esses estados formam, junto com o Tocantins, a região do MATOPIBA, que é destaque na produção de grãos. A eficiência na produção das lavouras temporárias nesses estados pode ser resultado de diversos fatores, como adoção de melhores práticas de manejo, uso eficiente de insumos, acesso a crédito e tecnologias agrícolas avançadas.

Cabe destacar, nesse contexto, que esses estados concentram áreas significativas do bioma Cerrado, o qual apresenta características edafoclimáticas mais favoráveis à mecanização e à expansão da fronteira agrícola, especialmente quando comparado a outros biomas da região Nordeste, como a Caatinga e a Mata Atlântica. Ainda que a análise presente não incorpore dummies específicas por tipo de bioma, a evidência empírica sugere que tais diferenciações podem contribuir para a compreensão dos padrões de eficiência observados.

As evidências apresentadas mostram que é possível orientar políticas públicas com foco na melhoria da eficiência técnica da produção agrícola no Nordeste brasileiro. No entanto, é fundamental evitar generalizações excessivas, uma vez que a região apresenta elevada heterogeneidade socioeconômica, ambiental e produtiva. Fatores como clima, tipo de solo, nível de capitalização dos produtores, infraestrutura local e inserção em cadeias agroindustriais condicionam significativamente os níveis de eficiência observados.

Os dados indicam que os estabelecimentos agrícolas nordestinos operam, em média, com baixa intensidade de trabalho (aproximadamente quatro pessoas por unidade) e reduzido uso de máquinas e equipamentos agrícolas (menos de 0,2 unidade de capital por estabelecimento). Esse cenário sugere a existência de barreiras estruturais à modernização produtiva e à adoção de tecnologias, o que contribui para os níveis observados de ineficiência técnica.

Diante disso, recomenda-se que políticas públicas voltadas à elevação da eficiência produtiva sejam formuladas com base em diagnósticos mais refinados, que considerem as especificidades locais. Variáveis como Treinamento, Financiamento e Tecnologia, embora estatisticamente significativas para a redução da ineficiência, não devem ser tratadas de forma genérica. Sua eficácia depende de estratégias diferenciadas conforme o perfil produtivo, o estágio de desenvolvimento agrícola e as condições institucionais de cada microrregião ou bioma, eventualmente em alinhamento com as políticas estaduais para o setor.

Além disso, torna-se essencial considerar a diversidade ambiental da região, especialmente no que se refere à delimitação de biomas e à presença de territórios produtivos específicos como o MATOPIBA e a faixa litorânea, por exemplo. A elaboração de políticas mais eficazes passa, necessariamente, pela incorporação de tais diferenças territoriais, promovendo a articulação entre instrumentos de apoio técnico, financeiro e institucional adaptados à realidade de cada espaço produtivo.

Embora o Treinamento não tenha se mostrado estatisticamente significativo, possivelmente em razão da desmobilização das atividades de assistência técnica e extensão rural por parte dos órgãos de extensão rural, vale ressaltar que a orientação técnica desempenha um papel fundamental no desempenho agrícola, fornecendo conhecimentos, diretrizes e suporte aos produtores para aprimorarem suas práticas de cultivo. Por outro lado, os fatores Financiamento e Tecnologia, ambos se mostram significativos. O acesso ao Financiamento, via crédito agrícola, é importante para suportar ações de investimento, que podem trazer a modernização na produção, armazenagem e transporte. E a Tecnologia, com uso de novas máquinas, implementos e irrigação, apresenta evidências de que a produtividade pode ser alavancada, como a área do MATOPIBA demonstra.

No que tange à variável Tecnologia, observa-se que sua proxy, a irrigação, é eficaz na captação dos efeitos tecnológicos sobre a eficiência produtiva, já que os municípios com presença de irrigação tendem a apresentar menores níveis de ineficiência técnica. No entanto, é necessário reconhecer que a irrigação, embora associada à elevação da produtividade, não deve ser entendida como uma solução generalizável a todo o território nordestino.

A irrigação é tecnicamente viável em apenas cerca de 2% da área do Semiárido nordestino, o que impõe sérias restrições à sua expansão como política agrícola universal (Suassuna, 2019). Dessa forma, destaca-se a relevância de políticas diferenciadas por território e por bioma, considerando as restrições edafoclimáticas e a viabilidade econômica local. A experiência de regiões como o MATOPIBA, com alta eficiência técnica associada ao uso intensivo de tecnologia e infraestrutura, pode servir como referência.

No que se refere a desdobramentos futuros, destaca-se a relevância de estudos que aprofundem a análise por tipo de bioma, considerando as especificidades ecológicas e produtivas presentes na região Nordeste. Outra perspectiva está no estudo em relação a diferentes espaços de produção dentro da própria região Nordeste, observando características específicas de sub-regiões e municípios.

A diversidade ambiental da região, que compreende áreas do Semiárido, do Cerrado (notadamente na região do MATOPIBA), da zona da Mata litorânea, entre outras, aponta para a necessidade de abordagens diferenciadas que levem em conta as potencialidades e restrições impostas por cada contexto regional. Investigações futuras podem, portanto, explorar de forma mais desagregada a eficiência técnica em função das características socioeconômicas e institucionais desses espaços, por meio da introdução de variáveis indicadoras (como dummies por bioma), contribuindo para uma compreensão mais robusta dos determinantes da eficiência em diferentes ambientes produtivos.

Além disso, podem ser conduzidas análises voltadas à diferenciação entre grupos de produtos ou culturas específicas, a fim de evidenciar as distintas formas de organização da produção e seus reflexos sobre o desempenho técnico. Complementarmente, o aprofundamento das investigações sobre os diversos espaços de produção intrarregionais, com atenção às peculiaridades de sub-regiões e municípios, pode oferecer subsídios relevantes para o desenho de políticas públicas mais eficazes e territorialmente ajustadas.

REFERÊNCIAS

- AIGNER, D. J.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production functions models. **Journal of Econometrics**, Amsterdam, v. 6, p. 21–37, 1977.
- ARAUJO, J. A.; MANCAL, A. Produtividade e eficiência no setor agropecuário do nordeste brasileiro. **Scientific Electronic Library Online**. Campo Grande. jul.-dez. de 2015.
- ARAUJO, W. B. C. ARAUJO, J. A. Produtividade, variação da eficiência técnica e tecnológica na agricultura dos municípios cearenses. **Scientific Electronic Library Online**. 2014.
- BARROS, E. de S.; XAVIER, L. F.; FONSECA, H. V. de P.; COSTA, E. de F. Eficiência na produção agrícola do Vale São Francisco: mensuração de escores e análise de fatores correlacionados. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 63, n. 2, p. 35-50, jul.-dez. de 2016.
- BIAGE, M. **Estatística Econômica e Introdução à Econometria**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2012.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar. **Lançamento do Plano Safra da Agricultura Familiar 2024/2025 no Pará**. Brasília: MDA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mda/pt-br/noticias/2024/08/lancamento-do-plano-safra-da-agricultura-familiar-2024-2025-no-para>. Acesso em: 16 maio 2025.
- CARNEIRO, W. M. A. Produção Agrícola do Nordeste em 2020. **Diário Econômico ETENE**. Fortaleza: Banco do Nordeste. Ano III - Nº 89. ISSN 2594-7338. 13 de Jul. de 2020. Disponível em: < https://g20mais20.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/555/1/2020_DEE_89.pdf > . Acesso em: 18 de jun. de 2021.
- COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1998.
- CRUZ, B. de O.; SILVA FILHO, L. A. da; MELO, J. A. de; RIBEIRO, L. C. de S. Dinâmicas espaciais e estruturais na agricultura brasileira: análises comparativas dos períodos 2013-2017 e 2018-2022. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 62, n. 1, p. 1–25, 2024. Disponível em: <https://revistasober.org/article/doi/10.1590/1806-9479.2025.290289>. Acesso em: 7 de jun. de 2025.
- ECMWF. Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo. 2023. Disponível em: < <https://www.ecmwf.int/> >. Acesso em: 15 de abril de 2023.
- FOSTER, A. D.; ROSENZWEIG, M. R. Aprendendo fazendo e aprendendo com os outros: capital humano e mudança técnica na agricultura. **Journal of Political Economy**, v. 103, n. 6, p. 1176–1209, Dec. 1995.
- FREITAS, R. E. **Produtividade Agrícola no Brasil**. Cap. 12. Técnico de planejamento e pesquisa da Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea. 2014.
- FÜRSTENAU, V. **A política de crédito rural na economia brasileira pós 1960**. Porto Alegre, 1987. Disponível em: <http://revistas.fee.tche.br/index.php/ensaios/article/viewFile/1075/1416>. Acesso em: 22 de jun. de 2017.

GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; BACCHI, M. P.R.; CONCEIÇÃO, J. C.P. R. da. Condicionantes da produtividade da agropecuária brasileira. **Repositório do conhecimento do Ipea**, jul./set., 2004.

GASQUES, J. G.; VIEIRA FILHO, J. E. R.; NAVARRO, Z. **Produtividade total dos fatores e transformações da agricultura brasileira**. A agricultura brasileira: desempenho, desafios e perspectivas. Brasília: Ipea, 2010.

GAZZOLA, R.; WANDER, A. E.; OLIVEIRA, M. P. Eficiência técnica da agricultura brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL NA GESTÃO DO CONHECIMENTO, 41., 2009, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: SOBRAPO, 2009. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/697480>. Acesso em: 08 de jun. de 2025.

GOMES, A. P.; ALCANTARA FILHO, J. L.; SCALCO, P. R. Eficiência, tecnologia e produtividade total dos fatores: uma análise das mudanças recentes na agropecuária do Nordeste. In: XIV Encontro Regional de Economia do Nordeste, 2009, Fortaleza. **Anais....** Fortaleza: ANPEC/BNB, 2009. v. 1. p. 1-17.

IBGE. **Censo agropecuário**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 05 jun. 2021.

KUMBHAKAR, S. C.; LOVELL, C. K. **Stochastic frontier analysis**. Cambridge university press. 2000.

KUMBHAKAR, S. C.; WANG, H.; HORNCastle, A. P. **Um guia prático para análise de fronteira estocástica usando Stata**. Cambridge University Press. 2015. Disponível em: https://assets.cambridge.org/97811070/29514/frontmatter/9781107029514_frontmatter.pdf. Acesso em: 24 nov. 2021.

LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, S. S. **The measurement of productive efficiency**. New York. Oxford University, 1993.

LUNA, A. T.; COSTA, E. M.; CAMPOS, R. T.; SOUZA, H. G. de; DIAS, T. K. M. **Função de produção e eficiência técnica da agropecuária cearense**. Repositório Institucional UFC. 27 de maio de 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56553>. Acesso em: 24 nov. 2021.

MAPA. **Agropecuária puxa o PIB de 2017**. 4 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/noticias/agropecuaria-puxa-o-pib-de-2017>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MARIANO, J. L.; PINHEIRO, G. M.T. L. Eficiência Técnica da Agricultura Familiar no Projeto de Irrigação do Baixo Açu (RN). **Revista Econômica do Nordeste**. v. 40, n. 2, abril /jun., p. 283–296, 2009. <https://doi.org/10.61673/ren.2009.354>

PEREIRA, C. N. CASTRO, C. N. **Assistência Técnica na agricultura brasileira: Uma análise sobre a origem da orientação técnica por meio do censo agropecuária de 2017**. Rio de Janeiro: IPEA. Out. de 2021. <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10893>

PINTO, L. F. DE P. **Eficiência Técnica e Econômica: Evidências de conflitos na análise da infraestrutura física da Universidade de Brasília (UnB)**. Repositório Institucional da UNB. Brasília-DF, 2013. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/16706>

SANTOS, F. A. A. **Condicionantes da eficiência na agropecuária do Nordeste**. Locus Repositório Institucional da UFV. Viçosa- MG. 2002. <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/3e1d6a2f-89f4-45f6-8dcc-104789071ce6/content>

SILVA, F. P. da; ARAÚJO, J. A.; COSTA, E. M.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Eficiência técnica das regiões semiáridas e não semiáridas do Nordeste brasileiro: Mensurando a função de metafronteira de produção. In: SEMINÁRIO SOBRE A ECONOMIA MINEIRA

REVISTA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 17., 2019, Diamantina, MG. **Anais...** Diamantina: ANPEC, 2019.

SOUZA, G. S.; GOMES, E. G.; ALVES, E. R. A.; GASQUES, J. G. Technological progress in the Brazilian agriculture. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 72, december, p. 100879, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100879>

SOUZA, H. G.; CAMPOS, K. C.; CHAVES, F. A. H. Análise da eficiência da produtividade agrícola nas mesorregiões do estado do Ceará. Repositório Institucional UFC. 28 out. 2020. Revista Expressão Católica, Quixadá, v. 9, n. 2, p. 8-21, jul./dez., 2020. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/55121>

SUASSUNA, J. A pequena irrigação no Nordeste: algumas preocupações. Recife: Fundação Joaquim Nabuco – Diretoria de Pesquisas Sociais, 2019. **Revista Ciência Hoje**, v. 18, n. 104, outubro, 1994. Disponível em: https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/artigos-de-joao-suassuna/a-pequena-irrigacao-no-nordeste-algumas-preocupacoes?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 09 jun. 2025.

WANG, H.-J. Heteroscedasticity and Non-Monotonic Efficiency Effects of a Stochastic Frontier Model. **Journal of Productivity Analysis**, 18, p. 241–253, 2002.

YIN, Z.; WU, J. Avaliação de Dependência Espacial de Técnico Agrícola Eficiência: Com base na fronteira estocástica e no modelo econométrico espacial. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2708, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13052708>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ZANINI, A. **Regulação Econômica no Setor Elétrico Brasileiro**: Uma metodologia para definição de fronteiras de eficiência e cálculo do fator X para empresas distribuidoras de energia elétrica. Repositório Digital PUC-RIO. Rio de Janeiro, ago. de 2004. Disponível em: https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0016231_04_pretextual.pdf Acesso em: 16 jun. 2022.