

Mudanças climáticas e agricultura familiar: impactos regionais por quartis de produtividade

Climate change and family farming: regional impacts by productivity quartiles

Autor(es): Tarik Marques do Prado Tanure¹; Daniel Caixeta Andrade¹; Edson Domingues²;

Filiação: ¹Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia – IERI/UFU; ²Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Universidade Federal de Minas Gerais – CEDEPLAR/UFMG

E-mail: tariktanure@ufu.br; daniel.andrade@ufu.br; domigues.edson@gmail.com;

Área 1: Economia

Resumo

A agricultura familiar, relevante em termos sociais, econômicos e ambientais, é marcada pela heterogeneidade produtiva, sobretudo no âmbito regional. As mudanças climáticas, também espacialmente heterogêneas, influenciam a produtividade agrícola. Neste contexto, o estudo analisa os impactos das mudanças climáticas, através dos cenários RCP 4.5 e 8.5 (IPCC, 2014), sobre a produtividade agrícola familiar, considerando os diferentes quartis de produtividade, por Unidades da Federação e macroregiões do Brasil. A metodologia compreende um modelo teórico microfundamentado que orienta a estimação em *cross section* de uma regressão quantílica da produtividade agrícola considerando aspectos climáticos, geográficos e produtivos. Os resultados indicam que a intensidade dos efeitos negativos das mudanças climáticas seria maior nos quartis de menor produtividade e nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, evidenciando que o fenômeno climático poderia ampliar a vulnerabilidade dos produtores mais frágeis e as disparidades regionais.

Palavras-chave: Agricultura familiar; Mudanças Climáticas; Heterogeneidade produtiva; Heterogeneidade climática; vulnerabilidade;

Abstract

Family farming, which is relevant in social, economic and environmental terms, is marked by productive heterogeneity, especially at the regional level. Climate change, also spatially heterogeneous, influences agricultural productivity. In this context, the study analyzes the impacts of climate change, through the RCP 4.5 and 8.5 scenarios (IPCC, 2014), on family farming productivity, considering the different quartiles of productivity, by Brazilian macro-regions. The methodology comprises a micro-based theoretical model that guides the cross-section estimation of a quantile regression of agricultural productivity considering climatic, geographic and productive aspects. The results indicate that the intensity of the negative effects of climate change would be greater in the quartiles of lower productivity and in the North and Northeast regions, showing that the climatic phenomenon could increase the vulnerability of the most fragile producers and regional disparities.

Key words: Family farming; Climate Change; Productive heterogeneity; Climate heterogeneity; vulnerability;

1. Introdução

O advento das mudanças climáticas, evidenciado pelas alterações de temperatura e precipitação, afetam diretamente a produtividade agrícola e consequentemente o retorno obtido pelos produtores. Projeções do INPE (Chou et al., 2017) para os níveis de precipitação e temperatura evidenciam a heterogeneidade espacial do fenômeno sobre o Brasil. Neste sentido, é esperado uma nova geografia agrícola da produção (Pinto et al, 2008; Assad et al, 2016). Não obstante, o setor agropecuário brasileiro também é heterogêneo entre produtores e regiões, indicando que os efeitos climáticos sobre a produtividade poderiam apresentar dinâmicas diferenciadas, a depender do perfil do produtor, (Tanure et al, 2024; De Paula, 2020).

A agricultura familiar é parte importante no atual sistema de produção, em termos sociais, econômicos e ambientais. Segundo dados do Censo Agropecuário do IBGE (2017), a agricultura familiar responde por grande parte da produção nacional de cultivos, como a mandioca, fumo, café, feijão, banana e uva. Sua importância é evidenciada, ainda, por sua capacidade de preservar culturas e tradições locais, preservar ecossistemas e facilitar o acesso à alimentação.

Segundo a FAO (2014), a agricultura familiar (AF) é definida como uma forma de garantir a produção agrícola e silvícola, assim como a pesca e o pastoreio, gerida e dirigida por uma família que na sua maior parte depende da mão de obra familiar não assalariada, tanto de mulheres como de homens. A família e a exploração estão vinculadas, coevoluem e combinam funções econômicas, ambientais, reprodutivas, sociais e culturais.

Em termos organizacionais, a agricultura familiar se configura de maneira muito específica, se distinguindo em relação à agricultura patronal. Na AF, o trabalho e a gestão estão intimamente relacionados, a produção é diversificada e com ênfase no uso de insumos internos, o processo de tomada de decisões é imediata, a pluriatividade e o trabalho assalariado complementar é evidente, e sobretudo, há presença de distintos graus de instrução dos produtores, mecanização das propriedades e vinculação ao mercado (Veiga, 1996; Schneider, 2003; Escher et al., 2014).

Esse último aspecto é evidenciado regionalmente no Brasil. Produtores na região Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam maior vínculo ao mercado, maior participação no Pronaf e utilização de auxílio técnico, o que permite maior controle da produtividade agrícola. Em contrapartida, os produtores familiares das regiões Norte e Nordeste encontram-se em maior situação de vulnerabilidade, com prevalência da produção para subsistência.

A literatura que aborda os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola, apesar de extensa, pouco explora a heterogeneidade produtiva dos agricultores e foca sobretudo em *commodities*, geralmente as de maior valor econômico. Em nível global, os efeitos sobre a agricultura são variados. As estimativas de aumento moderado de temperatura associado a um aumento na concentração de CO₂ e mudanças nos níveis de precipitação beneficiarão o aumento da produção para as culturas localizadas em latitudes médias e altas. Contudo, em regiões secas e de latitudes baixas a produção tenderá a cair. (Lobell, M. et al., 2008; Hitz, S; J. Smith, 2004; FAO 2003; 2005; NRC, 2012).

As projeções para o Brasil de Assad *et al.*, (2013) indicam redução das áreas de aptidão agrícola para os cultivos de arroz, café, feijão, girassol, milho e soja. Em termos regionais, Feres *et al.*, (2011) apontam para redução da lucratividade nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, e aumento nas regiões Sul e Sudeste. Assunção; Chein (2016) apontam para a redução da produção agrícola em 18% por hectare no Brasil, com efeitos municipais variando entre -40% a +15%, sendo os efeitos negativos concentrados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste.

Considerando as especificidades produtivas, DePaula (2020) apresenta evidências de que a estrutura produtiva é relevante para determinar os efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola e conseqüentemente sobre o preço da terra, indicando que o efeito de um aumento de 1°C na temperatura média sobre os valores da terra, varia de -5% para os agricultores mais produtivos localizados na região Sul a -34% para os agricultores menos produtivos localizados na região Norte.

Estudos específicos sobre os impactos na produtividade da agricultura familiar são escassos. Tanure; Domingues; Magalhães (2024) estimam maior sensibilidade da produtividade da agricultura familiar aos efeitos climáticos em comparação à agricultura patronal. O maior controle do processo produtivo por parte dos patronais, via tratamento do solo, irrigação e auxílio técnico, reduziria os impactos negativos do clima sobre a produtividade. Especialmente, o estudo aponta para efeitos negativos sobre a produtividade nas regiões Norte e Nordeste, impactos moderados no Sudeste e Centro Oeste, e positivos na região Sul. Esse aspecto regional dos impactos evidencia a heterogeneidade produtiva da agricultura familiar no Brasil.

Portanto, considerando que a estrutura produtiva é determinante para a sensibilidade da produtividade ante aos efeitos das mudanças climáticas e que há heterogeneidade produtiva dentro do próprio grupo de agricultores familiares, e não obstante, considerando que o fenômeno poderia contribuir para o aumento da vulnerabilidade de produtores familiares mais frágeis, dada a concentração de efeitos negativos das MCs em regiões com predominância da agricultura familiar de

subsistência, se torna imperativo analisar como as mudanças climáticas afetariam a produtividade destes distintos perfis de produtores familiares. Assim, o presente estudo inova e procura contribuir com a análise dos impactos das mudanças climáticas sobre os distintos perfis de agricultores familiares, considerando sua heterogeneidade produtiva e climática.

Para realizar a análise, o estudo adota como metodologia um modelo teórico microfundamentado que orienta a estimação em *cross section* de uma regressão quantílica da produtividade agrícola considerando aspectos climáticos, geográficos e produtivos. A metodologia permite avaliar os impactos das mudanças climáticas, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5, sobre os produtores com menor produtividade, representando o quartil inferior (.25), sobre os produtores com produtividade mediana (.50), e sobre os produtores com quartil superior de produtividade (.75), por macrorregião do Brasil, apontando o perfil dos produtores e regiões mais vulneráveis.

O estudo está dividido em 5 seções, incluindo essa introdução. Na seção 2, material e métodos, descrevemos o modelo teórico que orienta a estimação da regressão quantílica e apresentamos a base de dados utilizada. Na seção 3 são apresentados os resultados da estimação, por macrorregião do Brasil. Na seção 4, apresentamos as discussões sobre os achados do trabalho. Por fim, na seção de considerações finais, apresentamos uma síntese das principais contribuições do artigo.

2. Material e Métodos

O modelo teórico microfundamentado que orienta o exercício econométrico é baseado nos estudos de Assunção e Chein (2016) e Tanure; Domingues; Magalhães (2023), em que a alocação de terras depende de fatores produtivos, climáticos e geográficos. No modelo, considera-se uma economia agrícola com M municípios, em que cada município $m \in M$, um agricultor representativo aloca terra T_m entre K cultivos diferentes. A produção P_{mk} do cultivo $k \in K$ no município $m \in M$ depende da quantidade de terras T_{mk} e de insumos I_{mk} alocada nesse cultivo e de um vetor com características climáticas e geográficas CG_m :

$$P_{mk}(CG_m) = \gamma_{mk} f^k(L_{mk}, I_{mk} | CG_m) \quad (1)$$

Sendo γ_{mk} um vetor de produtividade individual e $f_T^k > 0$, $f_I^k > 0$, $f_{TT}^k \leq 0$ e $f_{II}^k \leq 0$.

Considerando w_m o preço unitário dos insumos. O problema do agricultor representativo pode ser dividido em dois estágios. No primeiro, ele escolhe a quantidade de insumos de forma a maximizar o lucro obtido na produção do cultivo k no município m para cada valor de T_{mk} . A função valor desse problema é definida como:

$$V_{mk}(T_{mk} | GC_m) = \max_{x_{mk}} [\gamma_{mk} f^k(T_{mk}, I_{mk} | GC_m) - w_m I_{mk}] \quad (2)$$

No segundo estágio, o agricultor representativo escolhe o uso da terra que maximiza seu retorno agregado, sujeito à restrição de terra disponível:

$$\max_{\{L_{mk}\}} \Pi_m(CG_m) = \sum_k V_{mk}(T_{mk} | CG_m), \text{ sujeito a } \sum_k T_{mk} = T_m \quad (3)$$

As condições de primeira ordem do problema (3) são dadas por:

$$V'_{mk}(T_{mk} | CG_m) \geq V'_{mk}(T_{mk} | CG_m), \forall k, k' > 0 \in K \quad (4)$$

A equação (4) valerá como igualdade sempre que $T_{mk}^* > 0$ e valerá como desigualdade estrita sempre que $T_{mk}^* = 0$.

O equilíbrio do modelo é dado pela seguinte igualdade:

$$\sum_k T_{mk}^* (CG_m) = T_m \quad (5)$$

As equações (4) e (5) demonstram como as mudanças climáticas presentes em CG_m , afetam a tomada de decisão dos produtores, e sobretudo a produtividade agrícola, definindo implicitamente a alocação ótima de terra. Caso o vetor com as características climáticas mude de CG_m para CG'_m , o valor marginal das diferentes atividades agrícolas será afetado de maneira heterogênea. De forma que a alocação de terra $T_{mk}^*(CG'_m)$ será diferente da alocação inicial de terra $T_{mk}^*(CG_m)$, posto que os agricultores realocam seu cultivo para o tipo mais lucrativo, em decorrência das alterações climáticas. Verifica-se dois efeitos das alterações climáticas em CG_m , o primeiro sobre a produtividade agrícola e o segundo sobre a mudança no uso do solo em decorrência da alteração de produtividade. Desta forma o modelo captura o ajuste dos agricultores às mudanças climáticas, em termos de alocação de uso do solo.

Definindo um vetor de produtividade agrícola, como uma medida de produtividade da terra por cultivo, ou seja, uma medida de produtividade parcial, $\gamma_m = (\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \dots, \gamma_{mk})$, resolvendo o sistema definido nas equações (4) e (5) e utilizando a função de produção definida na equação (1), podemos expressar a produtividade agrícola de cada cultura no equilíbrio como uma função dos parâmetros do modelo:

$$Y_{mk}^*(CG_m) = \frac{P_{mk}^*(CG_m)}{T_{mk}^*(CG_m)} = Y_k(w_m, \gamma_m, CG_m) \quad (6)$$

A partir da equação (6), podemos definir a produtividade agrícola agregada como a razão entre o valor da produção e a área colhida, em hectares. O valor da produção, em reais, reflete o preço de cada cultivo em sua respectiva unidade, kilos, toneladas ou sacas, por hectare, permitindo o cálculo da produtividade agregada:

$$Y_m^*(CG_m) = \frac{P_m^*(CG_m)}{T_m^*(CG_m)} = Y(w_m, \gamma_m, CG_m) \quad (7)$$

As equações (6) e (7), que definem a produtividade agrícola, são a base do exercício empírico realizado na próxima seção. Tais equações permitem estimar como os quartis de produtividade da agricultura familiar, reagem aos fatores climáticos.

2.1 Especificação econométrica e estimação

A estimação dos impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola foi baseada nos estudos de Assunção; Chein (2016), Barbosa *et al*, (2020) e Tanure; Domingues; Magalhães (2023). Contudo, o presente estudo inova ao utilizar uma regressão quantílica com o objetivo de capturar os efeitos do clima sobre os diferentes quantis de produtividade da agricultura familiar. A regressão quantílica é uma alternativa mais robusta ao método de estimação de mínimos quadrados ordinários (MQO) e sua análise em torno da média condicional. A regressão quantílica permite capturar as mudanças na distribuição e em seu formato, a partir de diferentes soluções nos distintos quantis ou partes da distribuição condicional (Koenker; Bassett Jr, 1978; Buchinsky, 1998). Essa possibilidade é particularmente útil para análises envolvendo a agricultura familiar, cuja heterogeneidade produtiva, implica em distribuição assimétrica do nível de produtividade, sobretudo no âmbito regional.

A sensibilidade da produtividade agrícola aos efeitos das MC, do cultivo k , no município m , é determinado a partir da equação (6). Suponha que exista mobilidade perfeita de fatores produtivos

entre os municípios da amostra. Essa hipótese implica que o preço dos fatores é o mesmo em todos os municípios ($w = w_m, \forall m$) permitindo estimar o modelo sem dados de preços de fatores. A forma funcional para a relação entre fatores climáticos e produtividade é dada por:

$$Y_m = Y(w, \gamma_m, CG_m) = \exp[\theta(CG_m) + \gamma_m + \epsilon_m] \quad (8)$$

Sendo ϵ_m um termo de erro idiossincrático. Reescrevendo (8), temos:

$$\ln Y_m = \gamma_m + \theta(CG_m) + \epsilon_m \quad (9)$$

A aproximação das características dos municípios γ_m , sem a utilização de dados em painel, é realizada pelas características observáveis X_m . Desta forma, temos a seguinte equação estimável:

$$\ln Y_m = \theta(CG_m) + \beta' X_m + \epsilon_m \quad (10)$$

A partir da equação (10) temos as funções quantílicas condicionais de $\ln Y_m$ determinadas por:

$$Q_\tau(\ln Y_m | x) = \theta(CG_m)\tau + \beta' X_m \tau + F_\epsilon^{-1}(\tau) \quad (11)$$

Em que τ denota o t-ésimo quantil e F_ϵ denota a função de distribuição comum dos erros. A estimação é realizada considerando os quantis .25, .50 e .75. Após a estimação do modelo representado em (11), as variáveis de temperatura e precipitação médias GC_m , são substituídas, no mesmo modelo, por suas projeções GC'_m referentes aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, as demais variáveis de controle permanecem. Em seguida, calcula-se o valor predito de $\ln Y_m$, para cada quantil.

$$\ln Y_m = \theta(CG'_m) + \beta' X_m + \epsilon_m \quad (11)$$

A variação de produtividade agrícola, ocasionada pela alteração das variáveis climáticas, é dada pela diferença determinada por:

$$\Delta \ln Y_m = [\theta(CG_m) + \beta X_m] - [\theta(CG'_m) + \beta X_m] \quad (12)$$

Assim, seja Y_{m0} a produtividade agrícola quando $CG_m = CG_{m0}$, e Y_{m1} a produtividade agrícola quando $CG_m = CG_{m1}$. O impacto da mudanças climáticas será dado por $\Delta Y^* = Y^*_{m1} - Y^*_{m0}$

Aumentos de temperatura e precipitação, podem contribuir para o aumento da produtividade em um primeiro momento, mas o aumento marginal (excesso de temperatura ou precipitação) pode prejudicar a produtividade. Desta forma, para capturar a não linearidade destas variáveis a estimação é realizada com o acréscimo de um polinômio quadrático da temperatura e precipitação (MENDELSON *et al.*, 1994; FERES *et al.*, 2009). C

Como variáveis climáticas, utilizou-se as médias trimestrais de temperatura e precipitação, ou seja, dados climáticos referentes aos períodos da primavera, verão, outono e inverno, para capturar os efeitos específicos da sazonalidade climática sobre a produtividade agrícola de cada cultivo. Por fim, para o cálculo da produtividade agrícola agregada, utilizou-se a ponderação pela raiz quadrada da área total agrícola de cada município (SCHLENKER *et al.*, 2006).

Reitera-se que nas projeções, o modelo não incorpora novas tecnologias produtivas como estratégia adaptativa dos agricultores, é um importante aspecto a ser considerado nos estudos envolvendo impactos das mudanças climáticas, ou seja, o modelo estimado não incorpora o progresso tecnológico. Desta maneira, os resultados devem ser entendidos como o efeito puro do clima sobre a

produtividade, evidenciando a magnitude do progresso tecnológico necessário para amenizar os efeitos das MC sobre a produtividade agrícola (ASSUNÇÃO; CHEIN, 2016).

2.2 Base de dados

O modelo considerou uma amostra de 4.693 municípios na estimação dos impactos climáticos sobre a produtividade agrícola. Os municípios que não apresentam dados de uso da terra e dados climáticos foram retirados do exercício econométrico.

A base de dados utilizada no estudo foi extraída do Censo Agropecuário do IBGE de 2017. Foram selecionados 16 cultivos da agricultura familiar: banana, café, laranja, abacaxi, amendoim em casca, arroz, batata inglesa, cana de açúcar, feijão, fumo, mandioca, milho em grão, soja em grão, trigo, outros da lavoura temporária e outros da lavoura permanente.

Para a determinação da produtividade agrícola, foi utilizada uma medida de produtividade parcial da terra. O número de hectares cultivados com o cultivo k em cada município m determina o uso de terra para cada categoria da lavoura. A produtividade do cultivo k no município m é determinada pela razão entre o valor de sua produção e a área cultivada de k em m :

$$Y_{mk} = \frac{\text{Valor da produção do cultivo } k \text{ em } m}{\text{Área cultivada de } k \text{ em } m}$$

A produtividade agregada é definida como:

$$Y_m = \frac{\sum_k \text{Valor da produção do cultivo } k \text{ em } m}{\text{Área cultivada em } m}$$

As variáveis utilizadas como controle na análise empírica são oriundas do Censo Agropecuário de 2017 e relacionam-se aos fatores utilizados na produção. Foram utilizados: i) o logaritmo natural do valor das máquinas, equipamentos e tratores presentes nas propriedades, por hectare; ii) o logaritmo natural do número de trabalhadores por hectare; iii) a área de benfeitorias, representada pelas áreas com construções, benfeitorias ou caminhos; iv) área irrigada em hectares; v) participação de estabelecimentos que realizaram a correção do PH do solo; vi) solo predominante e, por fim, vii) variáveis geográficas, por município, referentes à altitude, latitude e longitude, extraídas do Ipeadata.

Os dados climáticos referentes às estimativas mensais de temperatura e precipitação médias, utilizados para a construção do modelo base, são provenientes da base de dados *Terrestrial Air Temperature and Precipitation* descrita por Matsuura e Wilmott (2012). O recorte temporal selecionado para a construção do modelo base, compreende um período de *normal climatológico*¹ de 34 anos, entre 1971 a 2005. A Figura 2 ilustra os dados de temperatura e precipitação históricos médios ao nível municipal no Brasil.

¹ A Organização Meteorológica Mundial (OMM) adota o padrão mínimo de trinta anos para análises sobre mudanças climáticas. O período, denominado de normal climatológico, é utilizado como referência no cálculo da média de variáveis climáticas, de forma que o fenômeno das mudanças climáticas é constatado quando há alterações relevantes nos valores médios das variáveis entre as normais climatológicas.

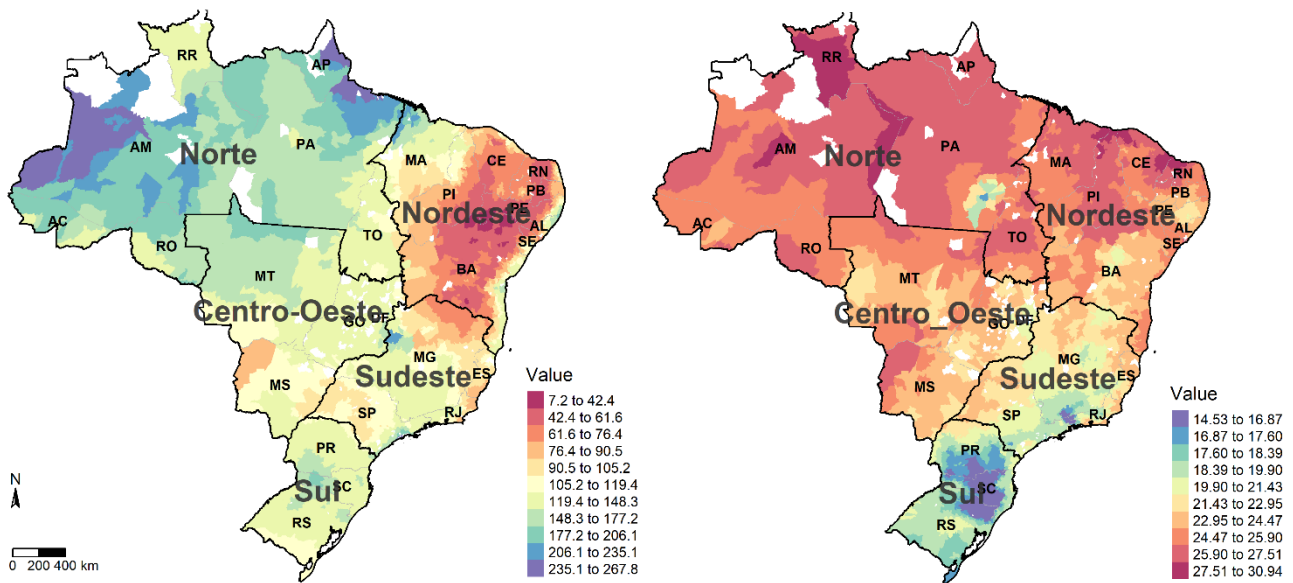


Figura 1: Dados Históricos de Precipitação e Temperatura (1971/2005) (mm) (°C)

Fonte: Elaboração própria com base em *Terrestrial Air Temperature and Precipitation*

Os dados projetados de temperatura e precipitação utilizados no modelo estimado são referentes aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do IPCC (2014), considerando o período de 2021 a 2050. A elaboração dos cenários para o Brasil, pelo INPE e com base na normal climatológica de 1971/2005, foi realizada através do modelo climático regional Eta-CPTEC (Chou et al., 2014). O Cenário RCP 4.5 representa um caminho mais otimista para o desempenho das emissões de GEE e temperatura globais, com projeção de aquecimento médio global em 1,8°C no ano de 2100, em relação à temperatura média verificada entre 1986 e 2005. O cenário RCP 8.5 representa uma possibilidade pessimista de evolução das emissões e temperatura globais, com estimativa provável de aquecimento em torno de 3,7°C em 2100 (IPCC, 2014). As Figuras 3 e 4, ilustram as projeções de precipitação e temperatura de acordo com os cenários climáticos.

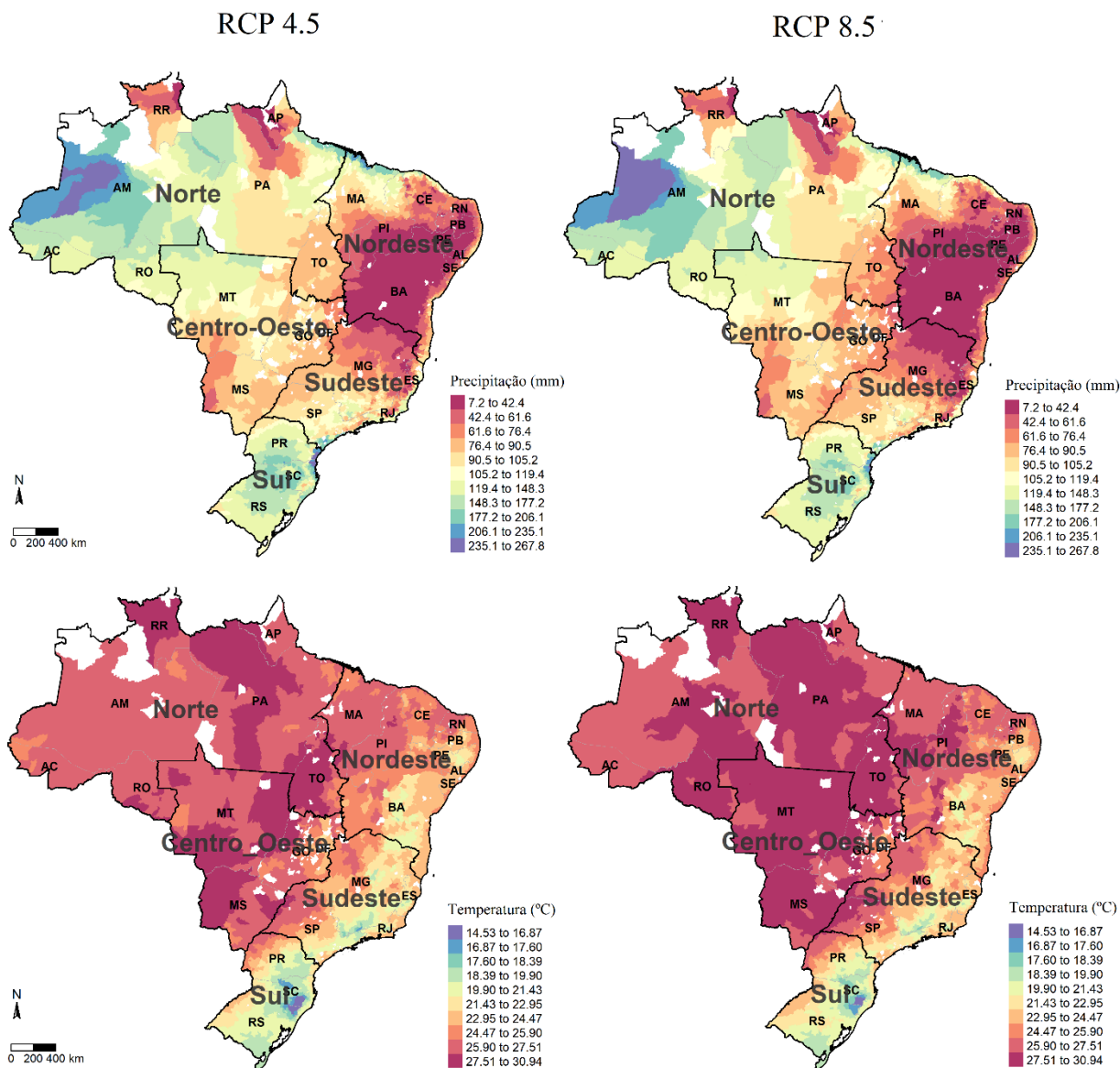


Figura 2: Precipitação e Temperatura Média Projetada pelos Cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (mm) (°C)

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do INPE

As temperaturas projetadas para o ano de 2050 pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 indicam elevação mais intensa nas regiões de latitude baixa e na porção central do Brasil. Neste sentido, as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste serão mais impactadas. As projeções são mais intensas no cenário RCP 8.5. Em relação à precipitação, contrastando ao cenário histórico (Figura 1), os cenários projetados indicam uma redução relevante nos níveis de precipitação, sendo mais intenso no cenário RCP 8.5. A região Nordeste seria a mais afetada.

3. Resultados e Discussão

Com o objetivo de projetar os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade da agricultura familiar, considerando suas especificidades produtivas e a heterogeneidade espacial climática, este trabalho estimou inicialmente um modelo base, representado pela equação (11). Nele, a produtividade agregada da agricultura familiar é estimada contra variáveis produtivas, geográficas e climáticas, através de uma regressão quantílica representando os quantis inferior (.25), mediano (.50) e superior (.75) de produtividade. As médias trimestrais de temperatura e precipitação entre os anos de 1975 e 2005 foram utilizadas como variáveis climáticas. Portanto, o modelo base indica como os fatores produtivos, geográficos e climáticos “históricos” afetam a produtividade da agricultura familiar. A Tabela 1 apresenta os resultados do modelo base.

Tabela 1: Estimação do modelo base

Variáveis de Controle	Variável Dependente: log (Produtividade Total da Agricultura)		
	.25 (quartil inferior)	.50 (mediana)	.75 (quartil superior)
Temperatura Primavera	0.182 (0.194)	-0.158 (0.255)	-0.632* (0.371)
Temperatura Verão	-1.599*** (0.233)	-1.453*** (0.371)	-1.225** (0.507)
Temperatura Outono	1.211*** (0.144)	0.815*** (0.191)	0.672** (0.266)
Temperatura Inverno	-0.623*** (0.103)	-0.211 (0.148)	-0.0127 (0.212)
Temp. Primavera^2	-0.0106*** (0.004)	-0.00323 (0.00519)	0.00611 (0.00764)
Temp. Verão^2	0.0361*** (0.004)	0.0337*** (0.00753)	0.0304*** (0.0104)
Temp. Outono^2	-0.0261*** (0.003)	-0.0174*** (0.00434)	-0.0127** (0.00631)
Temp. Inverno^2	0.0163*** (0.002)	0.00676** (0.00323)	0.000859 (0.00492)
Precipitação Primavera	0.0124*** (0.0008)	0.0126*** (0.000792)	0.0105*** (0.00114)
Precipitação Verão	0.00437*** (0.0009)	0.00538*** (0.000841)	0.00695*** (0.00114)
Precipitação Outono	-0.00724*** (0.0009)	-0.0106*** (0.00106)	-0.0131*** (0.00122)
Precipitação Inverno	0.00725*** (0.00137)	0.0141*** (0.00151)	0.0183*** (0.00168)
Prec. Primavera^2	-0.0000331*** (0.000002)	-0.0000360*** (0.00000197)	-0.0000315*** (0.00000377)
Prec. Verão^2	-0.00000854*** (0.000002)	-0.00000972*** (0.00000186)	-0.0000128*** (0.00000236)
Prec. Outono^2	0.0000275*** (0.000002)	0.0000303*** (0.00000257)	0.0000354*** (0.00000265)
Prec. Inverno^2	-0.0000270*** (0.000005)	-0.0000506*** (0.00000563)	-0.0000721*** (0.00000546)
Altitude	-0.000391*** (0.00004)	-0.000411*** (0.0000535)	-0.000253*** (0.0000755)
Latitude	0.00598 (0.00672)	0.0122** (0.00582)	0.0184** (0.00775)
Longitude	-0.0104*** (0.00370)	-0.0133*** (0.00283)	-0.0202*** (0.00393)

Capital	0.0536*** (0.00814)	0.0140 (0.00863)	0.00546 (0.0109)
Trabalho	0.165*** (0.0152)	0.197*** (0.0159)	0.179*** (0.0191)
Benfeitorias	0.0000271*** (0.000005)	0.0000220*** (0.00000183)	0.0000172** (0.00000793)
Irrigação	0.0000118*** (0.000002)	0.00000987*** (0.000000725)	0.0000135 (0.0000271)
Correção PH Solo	0.583*** (0.0643)	0.803*** (0.0746)	0.837*** (0.0908)
Tipo de Solo	-0.0190*** (0.002)	-0.0154*** (0.00255)	-0.00571* (0.00326)
Constante	17.65*** (1.346)	19.78*** (2.024)	21.51*** (2.725)
Pseudo R-Quadrado	0.4241	0.3334	0.2844

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo econométrico. Nota: Erro-padrão robusto a heterocedasticidade entre parênteses. *** p-valor <0.01, ** p-valor <0.05, * p-valor <0.1.

Os resultados da estimação do modelo base indicam que grande parte das variáveis de controle foram estatisticamente significativas, sobretudo as climáticas, e seu efeito é distinto entre os diferentes quantis de produtividade, evidenciando que o clima, assim como as demais variáveis geográficas e produtivas afetam de maneira diferente os perfis de agricultores familiares. Essa distinção é verificada pela magnitude de impacto entre os diferentes quantis.

Aumentos de temperatura no verão e no inverno, implicariam em redução da produtividade para todos os produtores. A redução seria de maior magnitude para os produtores de menor nível de produtividade. Já aumentos de temperatura no período do outono implicariam em elevação da produtividade para os produtores, esse aumento seria maior nos produtores de menor extrato de produtividade. Esses resultados indicam que os efeitos da temperatura sobre a produtividade seriam de maior magnitude entre os produtores de menor produtividade.

Apenas a variável temperatura na primavera e seu termo quadrático apresentaram distinção de sinal entre os quantis de produtividade. Os resultados sugerem que um aumento de 1°C na temperatura média da primavera, provocaria um aumento da produtividade em 0,18%, entre os produtores de menor perfil de produtividade, ao passo que o mesmo aumento na temperatura, provocaria uma redução de 0,15% considerando todos os familiares, e ainda, uma redução maior, na ordem de 0,62% entre os produtores de maior extrato de produtividade.

Considerando as variáveis de precipitação, verifica-se que produtores de maior quantil de produtividade seriam mais sensíveis, de forma que incrementos no nível de precipitação no período do inverno e no verão, implicariam em elevação da produtividade de maior intensidade no extrato de produtores mais produtivos, ao passo que a elevação da precipitação no período do outono, incorreria em redução de produtividade de maior magnitude, também pelo extrato de produtores de maior produtividade. Ou seja, um padrão de efeitos oposto ao apresentado pelas variáveis de temperatura.

As variáveis produtivas de controle apresentaram elevado nível de significância e sinal esperado. Trabalho, capital, benfeitorias, irrigação e correção do ph do solo apresentaram sinal positivo, indicando correlação positiva entre seu uso e o nível de produtividade. As variáveis de trabalho, capital, irrigação e correção do solo apresentaram maior correlação com a produtividade no quantil

de produtores de maior produtividade. Já o uso de benfeitorias nas propriedades tem correlação maior na produtividade do quantil inferior.

3.1 Resultados por Unidades da Federação

A partir dos resultados do modelo base, que demonstram os efeitos do clima sobre a produtividade, projetamos os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade da agricultura familiar, por quantil de produtividade. Através da equação (11), substituímos as variáveis climáticas de precipitação e temperatura históricos, pelas médias de temperatura e precipitação projetadas pelo INPE, de acordo com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, entre os anos de 2021 a 2050, mantendo os coeficientes estimados e demais variáveis de controle, e obtemos uma nova produtividade. Através da equação (12) calculamos a variação de produtividade entre o modelo base e o modelo com projeções climáticas. Os valores reportados representam as médias ponderadas pela área produzida nos municípios, de forma que áreas maiores possuem peso maior na determinação da produtividade agregada da região. Os resultados podem ser interpretados como o efeito puro do clima sobre a produtividade.

Os resultados projetados refletem a heterogeneidade climática espacial, assim como a heterogeneidade produtiva dos agricultores familiares. Desta forma, verificam-se que os impactos são distintos entre as regiões e entre os perfis de produtividade dos agricultores familiares. No geral, verificam-se impactos negativos de maior magnitude no cenário RCP 8.5, o mais pessimista, e sobre os produtores do quantil de menor produtividade. A Tabela 2 apresenta os resultados projetados sobre a produtividade do quantil (.25), por Unidade da Federação.

Tabela 2 - Projeção de impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola do quantil inferior, por hectare (variação acumulada entre 2021 e 2050) (.25 Quartil)

UF	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)
Rondônia	18,0%	0,156	13,7% 22,2%	13,0%	0,144	9,1% 16,9%
Acre	0,4%	0,058	-2,2% 3,1%	-7,6%	0,066	-10,6% -4,5%
Amazonas	-2,1%	0,264	-9,8% 5,6%	-9,6%	0,234	-16,5% -2,8%
Roraima	-35,3%	0,107	-41,2% -29,5%	-29,0%	0,101	-34,5% -23,5%
Pará	-52,9%	0,282	-57,9% -48,0%	-64,6%	0,225	-68,5% -60,6%
Amapá	-79,6%	0,070	-83,6% -75,7%	-80,5%	0,067	-84,3% -76,7%
Tocantins	-57,7%	0,079	-59,3% -56,0%	-65,4%	0,070	-66,9% -63,9%
Maranhão	-26,3%	0,499	-33,8% -18,8%	-39,1%	0,708	-49,6% -28,5%
Piauí	-28,2%	0,322	-33,0% -23,5%	-28,2%	0,379	-33,8% -22,6%
Ceará	1,7%	0,250	-2,3% 5,6%	9,1%	0,600	-0,3% 18,5%
Rio Grande do Norte	-2,4%	0,101	-4,2% -0,7%	-5,6%	0,115	-7,5% -3,6%
Paraíba	-4,8%	0,091	-6,2% -3,4%	-7,6%	0,106	-9,2% -6,0%
Pernambuco	-10,8%	0,156	-13,3% -8,4%	-9,3%	0,160	-11,8% -6,7%
Alagoas	-14,0%	0,127	-17,1% -10,9%	-17,3%	0,103	-19,8% -14,7%
Sergipe	-24,0%	0,145	-27,7% -20,3%	-26,8%	0,134	-30,2% -23,4%
Bahia	-39,7%	0,158	-41,3% -38,1%	-41,6%	0,163	-43,2% -39,9%
Minas Gerais	-35,9%	0,200	-37,3% -34,4%	-46,8%	0,164	-48,0% -45,7%
Espírito Santo	-37,7%	0,208	-42,4% -33,0%	-49,5%	0,136	-52,6% -46,4%
Rio de Janeiro	-31,4%	0,225	-36,4% -26,3%	-43,0%	0,161	-46,7% -39,4%

São Paulo	-21,3%	0,092	-22,1%	-20,5%	-33,1%	0,108	-34,1%	-32,2%
Paraná	3,3%	0,244	0,7%	5,9%	1,7%	0,271	-1,1%	4,6%
Santa Catarina	-2,7%	0,201	-5,1%	-0,4%	3,6%	0,224	1,0%	6,2%
Rio Grande do Sul	11,4%	0,286	8,9%	14,0%	26,6%	0,415	22,9%	30,3%
Mato Grosso do Sul	11,8%	0,133	8,7%	14,9%	6,8%	0,153	3,3%	10,4%
Mato Grosso	-0,9%	0,149	-3,5%	1,7%	-8,9%	0,150	-11,5%	-6,3%
Goiás	-36,6%	0,081	-37,8%	-35,5%	-50,3%	0,059	-51,1%	-49,5%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para o quantil de menor produtividade (.25) indicam que grande parte das Unidades da Federação seriam negativamente impactadas pelas MC. Amapá, Pará, Tocantins e Roraima na região Norte, Bahia, Maranhão, Sergipe, Piauí, Alagoas e Pernambuco, na região Nordeste, todas as UF da região Sudeste, e o estado de Goiás teriam redução relevante no nível de produtividade média. No cenário pessimista, a redução acumulada chegaria a 80% no Amapá, em 2050. Unidades da federação com participação relevante na produção nacional de alimentos, como Tocantins, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Goiás, também apresentariam redução acima de 30% no nível de produtividade. Incrementos de produtividade são esperados apenas para os estados de Rondônia e Acre, na região Norte, para o Ceará na região Nordeste, Paraná e Rio Grande do Sul, na região Sul, e para o Mato Grosso do Sul, na região Centro Oeste.

As projeções de impactos sobre o quantil mediano (.50) indicam que a direção do impacto se mantém em grande parte das Unidades da Federação, alterando-se a intensidade. De maneira geral os impactos são inferiores, ainda que negativos em grande parte das UFs, e a magnitude de variação é superior no cenário pessimista. Rondonia, Acre, São Paulo e Mato Grosso, passam a ter incrementos de produtividade agrícola média. Rio Grande do Sul passa a ter redução de produtividade. Mato Grosso do Sul se destaca com incremento médio acumulado de 73%, no cenário RCP 4.5 e de 89% no cenário RCP8.5. A Tabela 3 apresenta a projeção de impactos das MC sobre a produtividade agrícola média no quantil (.50).

Tabela 3 - Projeção de impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola mediana, por hectare (variação acumulada entre 2021 e 2050) (.50 Quartil)

UF	RCP 4.5				RCP 8.5			
	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)		Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
Rondônia	40,7%	0,196	35,4%	46,0%	43,9%	0,209	38,3%	49,6%
Acre	7,6%	0,118	2,1%	13,0%	0,4%	0,119	-5,1%	5,9%
Amazonas	7,0%	0,268	-0,9%	14,8%	1,7%	0,255	-5,8%	9,1%
Roraima	-14,1%	0,127	-21,0%	-7,2%	2,4%	0,127	-4,5%	9,3%
Pará	-50,5%	0,303	-55,8%	-45,2%	-58,5%	0,254	-63,0%	-54,1%
Amapá	-76,4%	0,080	-80,9%	-71,9%	-74,0%	0,091	-79,1%	-68,9%
Tocantins	-47,0%	0,103	-49,1%	-44,8%	-52,1%	0,119	-54,6%	-49,6%
Maranhão	-26,3%	0,364	-31,8%	-20,9%	-35,4%	0,562	-43,8%	-27,0%
Piauí	-23,5%	0,237	-27,0%	-19,9%	-24,0%	0,258	-27,8%	-20,2%
Ceará	0,0%	0,164	-2,6%	2,6%	-0,1%	0,414	-6,6%	6,4%
Rio Grande do Norte	-8,5%	0,106	-10,3%	-6,7%	-17,7%	0,121	-19,8%	-15,7%
Paraíba	-6,7%	0,133	-8,7%	-4,7%	-12,7%	0,142	-14,9%	-10,6%

Pernambuco	-11,8%	0,154	-14,3%	-9,4%	-12,0%	0,164	-14,5%	-9,4%
Alagoas	-21,6%	0,123	-24,6%	-18,6%	-26,6%	0,070	-28,3%	-24,8%
Sergipe	-33,3%	0,132	-36,7%	-30,0%	-37,4%	0,097	-39,8%	-34,9%
Bahia	-43,5%	0,140	-44,9%	-42,0%	-45,1%	0,140	-46,5%	-43,7%
Minas Gerais	-21,7%	0,357	-24,3%	-19,2%	-33,6%	0,303	-35,8%	-31,4%
Espírito Santo	-35,8%	0,228	-40,9%	-30,6%	-49,0%	0,161	-52,6%	-45,4%
Rio de Janeiro	-23,9%	0,253	-29,6%	-18,2%	-37,2%	0,185	-41,3%	-33,0%
São Paulo	5,6%	0,175	4,1%	7,2%	1,3%	0,210	-0,5%	3,2%
Paraná	21,1%	0,468	16,2%	26,1%	33,6%	0,582	27,5%	39,7%
Santa Catarina	-15,7%	0,219	-18,3%	-13,2%	-7,1%	0,276	-10,3%	-3,9%
Rio Grande do Sul	-2,2%	0,350	-5,3%	1,0%	18,7%	0,504	14,2%	23,2%
Mato Grosso do Sul	73,7%	0,256	67,7%	79,6%	89,2%	0,325	81,7%	96,8%
Mato Grosso	21,6%	0,159	18,8%	24,4%	20,5%	0,179	17,4%	23,6%
Goiás	-15,4%	0,123	-17,1%	-13,7%	-27,5%	0,108	-29,1%	-26,0%

Fonte: Elaboração própria

As projeções sobre o quantil superior de produtividade (.75), indicam uma suavização dos impactos negativos e elevação dos impactos positivos nas Unidades da Federação da região Norte, Sudeste e Centro Oeste, sobretudo no cenário RCP 8.5. Os estados Amazonas, Roraima e Goiás passam a ter incrementos de produtividade. Contudo, Pará, Amapá, Tocantins, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além de todas as UFs da região Nordeste, apresentam redução de produtividade agrícola média, ainda que o efeito negativo seja de menor magnitude em relação aos produtores pertencentes aos demais quantis inferiores de produtividade. A Tabela 4 apresenta as projeções dos impactos sobre a produtividade do quantil superior (.75).

Tabela 4 - Projeção de impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola do quartil superior, por hectare (variação acumulada entre 2021 e 2050) (.75 Quartil)

UF	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)
Rondônia	49,4%	0,253	42,5% 56,3%	67,9%	0,351	58,4% 77,5%
Acre	4,6%	0,139	-1,8% 11,1%	1,8%	0,139	-4,6% 8,2%
Amazonas	3,3%	0,311	-5,8% 12,3%	2,0%	0,323	-7,5% 11,4%
Roraima	22,4%	0,139	14,9% 30,0%	57,0%	0,282	41,6% 72,3%
Pará	-52,7%	0,276	-57,6% -47,9%	-53,5%	0,264	-58,2% -48,9%
Amapá	-73,7%	0,082	-78,3% -69,0%	-66,6%	0,111	-72,8% -60,3%
Tocantins	-34,9%	0,154	-38,2% -31,7%	-28,9%	0,227	-33,7% -24,1%
Maranhão	-32,6%	0,269	-36,6% -28,6%	-30,5%	0,544	-38,6% -22,4%
Piauí	-18,3%	0,170	-20,8% -15,8%	-10,2%	0,210	-13,3% -7,1%
Ceará	-6,8%	0,174	-9,5% -4,0%	-2,4%	0,442	-9,3% 4,5%
Rio Grande do Norte	-17,5%	0,122	-19,6% -15,4%	-26,8%	0,141	-29,2% -24,4%
Paraíba	-10,0%	0,136	-12,0% -7,9%	-14,8%	0,162	-17,2% -12,3%
Pernambuco	-12,6%	0,128	-14,6% -10,6%	-10,7%	0,153	-13,1% -8,3%
Alagoas	-23,5%	0,171	-27,7% -19,3%	-28,4%	0,088	-30,5% -26,3%
Sergipe	-36,6%	0,132	-40,0% -33,2%	-40,6%	0,073	-42,4% -38,7%
Bahia	-41,9%	0,145	-43,4% -40,4%	-41,2%	0,143	-42,7% -39,8%

Minas Gerais	-14,4%	0,474	-17,8%	-11,0%	-19,6%	0,473	-23,0%	-16,2%
Espírito Santo	-37,6%	0,239	-43,0%	-32,2%	-47,1%	0,180	-51,1%	-43,0%
Rio de Janeiro	-26,2%	0,250	-31,8%	-20,6%	-34,7%	0,203	-39,3%	-30,2%
São Paulo	31,8%	0,392	28,3%	35,3%	51,9%	0,568	46,8%	56,9%
Paraná	46,1%	0,867	37,0%	55,2%	91,0%	1,304	77,2%	104,7%
Santa Catarina	-24,1%	0,286	-27,4%	-20,8%	-12,6%	0,425	-17,5%	-7,7%
Rio Grande do Sul	-6,2%	0,453	-10,2%	-2,1%	23,8%	0,730	17,3%	30,4%
Mato Grosso do Sul	172,3%	0,568	159,1%	185,5%	255,1%	0,854	235,2%	275,0%
Mato Grosso	31,6%	0,210	28,0%	35,3%	48,8%	0,296	43,7%	54,0%
Goiás	3,4%	0,191	0,7%	6,2%	5,3%	0,217	2,2%	8,4%

Fonte: Elaboração própria

Em linhas gerais, as projeções apontam para concentração de efeitos negativos sobre as Unidades da Federação localizadas nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, ainda que com impactos positivos nos estados de São Paulo, Acre, Amazonas e Ceará. Os impactos para a região Centro-oeste e Sul são relativamente mais amenos, positivos para Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Com ressalvas, esse padrão espacial de impactos também é verificado por outros estudos, como Tanure; Domingues; Magalhães (2024), Feres et al., (2009) e Pinto et al (2008), e relaciona-se sobretudo aos maiores índices de elevação de temperatura e de redução de precipitação nessas porções do país.

Sob uma perspectiva comparativa entre os quantis de produtividade, verifica-se que os impactos negativos de maior magnitude concentram-se sobre os produtores de menor nível de produtividade, pertencentes ao grupo do quantil (.025), enquanto os impactos positivos de maior magnitude concentram-se no grupo de produtores mais produtivos, pertencentes ao quantil (.75). Esse padrão é verificado no Maranhão, Piauí, Paraná e nas UFs da região Norte, Sudeste, e Centro Oeste. A região Nordeste, juntamente com os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentam desempenho distinto, com impactos negativos afetando mais os produtores de maior nível de produtividade. No Nordeste esse padrão é verificado no Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. O padrão de impactos entre os quantis de produtividade é melhor visualizado sob a perspectiva regional. Os resultados regionais são apresentados na seção seguinte.

Os impactos das mudanças climáticas entre os quantis de produtividade evidenciam que o clima afetaria de forma mais adversa os produtores que controlam menos o processo produtivo. Esse resultado vai de encontro aos achados de Tanure; Domingues e Magalhaes (2024) que avaliam os impactos entre produtores familiares e patronais, indicando que os patronais, notadamente com maior nível de produtividade, seriam menos afetados pelo fenômeno climático. Não obstante, as projeções corroboram os achados de DePaula (2020) que também apontam para impactos negativos mais elevados entre produtores menos produtivos da região Norte.

3.2 Resultados agregados por grande região do Brasil

As projeções de impactos sobre a produtividade da agricultura familiar por grande região e de forma agregada para o Brasil são apresentadas nesta seção. Assim como nos resultados projetados para as Unidades da Federação, os resultados para macrorregiões e para o Brasil referem-se às médias de produtividade poderadas pelas áreas de produção de cada município. Dessa forma, os resultados agregados não são a simples média dos resultados para as UFs, mas a agregação dos resultados por municípios dentro de cada região, considerando que áreas de produção maiores, têm maior peso na

determinação do impacto em termos de produtividade final. A Tabela 5 apresenta os resultados agregados.

Tabela 5 - Projeção de impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola agregada por hectare (variação acumulada entre 2021 e 2050)

Quantil de Produtividade	Região	RCP 4.5			RCP 8.5		
		Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	Variação média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)
0.25	Norte	-37,4%	0,37	-41,2% -33,5%	-46,6%	0,36	-50,4% -42,9%
	Nordeste	-19,3%	0,29	-20,8% -17,9%	-19,6%	0,43	-21,9% -17,4%
	Sudeste	-32,3%	0,19	-33,3% -31,3%	-43,6%	0,16	-44,5% -42,8%
	Sul	6,3%	0,26	4,7% 7,8%	13,8%	0,36	11,7% 16,0%
	Centro-Oeste	-8,1%	0,23	-10,4% -5,8%	-16,9%	0,26	-19,4% -14,3%
	Brasil	-9,4%	0,31	-10,3% -8,5%	-8,8%	0,42	-10,0% -7,6%
0.50	Norte	-30,4%	0,43	-34,9% -25,9%	-35,6%	0,44	-40,2% -31,0%
	Nordeste	-21,6%	0,25	-22,9% -20,4%	-24,1%	0,33	-25,8% -22,4%
	Sudeste	-17,0%	0,33	-18,7% -15,2%	-27,1%	0,31	-28,8% -25,5%
	Sul	4,6%	0,41	2,2% 7,0%	20,5%	0,53	17,4% 23,6%
	Centro-Oeste	23,6%	0,38	19,9% 27,3%	23,6%	0,48	18,8% 28,3%
	Brasil	-5,6%	0,39	-6,7% -4,5%	-0,5%	0,51	-1,9% 1,0%
0.75	Norte	-29,2%	0,45	-33,9% -24,4%	-26,0%	0,52	-31,4% -20,5%
	Nordeste	-23,6%	0,22	-24,8% -22,5%	-22,5%	0,33	-24,1% -20,8%
	Sudeste	-6,4%	0,48	-9,0% -3,9%	-5,8%	0,58	-8,9% -2,7%
	Sul	10,8%	0,69	6,8% 14,9%	43,7%	1,03	37,6% 49,7%
	Centro-Oeste	57,8%	0,75	50,4% 65,2%	86,8%	1,10	75,9% 97,7%
	Brasil	1,1%	0,61	-0,6% 2,9%	19,5%	0,90	16,9% 22,1%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados projetados para o quantil de menor produtividade (.25) indicam que as regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste seriam negativamente impactadas. Norte e Sudeste concentrariam os piores resultados, com redução média de 37% e 32%, respectivamente no cenário RCP4.5. Apenas a região Sul seria beneficiada com projeção de elevação de produtividade. No cenário RCP8.5, a magnitude dos impactos seria elevada, ainda que de forma distinta entre as regiões. Considerando os resultados de forma agregada para o Brasil, verifica-se projeção de redução da produtividade média na ordem de 9,4%, no cenário RCP4.5 e de 8,5% no cenário RCP8.5.

Para o quantil mediano de produtividade (.50), em comparação com o quantil inferior (.25), os resultados apontam para a manutenção dos impactos negativos nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, e positivos para a região Sul. A região Centro-Oeste passa a ter incrementos de produtividade na ordem de 23%, nos dois cenários. Os impactos para o Norte e Sudeste, ainda que negativos, são mais amenos. Em contrapartida, os efeitos negativos são intensificados na região Nordeste, que apresenta redução na produtividade na ordem de 21,6% no cenário RCP4.5, e de 24% no cenário RCP8.5. Para o Brasil, projeta-se retração média de 5,6% no cenário RCP4.5 e de 0,5% no cenário RCP8.5.

Comparando os resultados projetados sobre o quantil (.50), que representa a mediana de produtividade dos agricultores familiares, com os resultados obtidos por Assunção; Chein (2016), que avaliam os impactos sobre a produção agrícola agregada e com metodologia distinta, verifica-se que a direção e a magnitude dos efeitos são semelhantes para as regiões Norte, Nordeste e Sudeste. Assunção; Chein (2016) estimam retrações de 35% na região Norte, 27% no Nordeste e 16,8% no Sudeste, além de redução de 28% no Centro Oeste e de 4% no Sul, tais efeitos representariam retração de 18% na produção nacional em 2050.

Considerando o quantil de maior produtividade (.75), as projeções indicam impactos negativos sobre a produtividade agregada nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, e impactos positivos sobre o Sul e Centro-Oeste. No cenário RCP8.5 a direção dos impactos seria mantida, contudo haveria redução da magnitude de efeitos negativos e acentuação dos efeitos positivos sobre a produtividade. A região Centro-Oeste se destacaria com projeção de incremento de 57% na produtividade média acumulada em 2050, no cenário RCP4.5, e de 86% no cenário RCP8.5. A produtividade média agregada do Brasil seria elevada em 1% no cenário RCP4.5, e em 19% no cenário, RCP 8.5, com importante participação do incremento de produtividade nas regiões Sul e Centro-Oeste.

Verifica-se um padrão de impacto entre os perfis de produtores familiares, com efeitos negativos mais intensos sobre os produtores de menor nível de produtividade, e mais amenos ou positivos para os produtores de maior nível de produtividade. Esse aspecto pode ser verificado pelo resultado da produtividade média agregada para o Brasil, que no cenário RCP 4.5 apresenta retração de 9,4%, para os produtores menos produtivos, retração de 5% no nível intermediário de produtividade, e elevação de 1% para os produtores mais eficientes. A distinção é mais evidente no cenário RCP8.5, com os menos produtivos tendo retração média de 8,8% e os mais produtivos com ganhos de produtividade média na ordem de 19,5%.

4. Considerações Finais

O estudo procurou avaliar como as mudanças climáticas afetariam a produtividade da agricultura familiar no Brasil considerando dois aspectos: i) a estrutura produtiva dos agricultores familiares, dado que o perfil de produtores familiares é bastante heterogêneo no Brasil, e ii) a variabilidade espacial dos efeitos climáticos, que também é distinta entre as regiões do país. Os resultados evidenciam que as mudanças climáticas afetariam a produtividade agrícola de forma distinta entre os diferentes perfis de agricultores familiares.

Os agricultores familiares menos produtivos, notadamente os mais vulneráveis, sofreriam impactos negativos de maior magnitude em comparação aos agricultores familiares mais produtivos. Esse padrão é verificado comparando-se os impactos projetados entre o grupo que representa os 25% de produtores de menor nível de produtividade, entre o grupo com produtividade mediana, e entre o grupo que representa os 25% de maior nível de produtividade. O estudo avalia que o fenômeno das mudanças climáticas poderia contribuir para o aumento da vulnerabilidade dos agricultores menos produtivos.

O fenômeno climático é heterogêneo, e apesar de haver variabilidade de impactos sobre a produtividade dentro de uma mesma região, ela ocorreria de forma negativa nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste. As regiões Sul e Centro Oeste seriam beneficiadas com incrementos de produtividade. Unidades da Federação com relevante participação na produção de alimentos, como São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná e Rio Grande do Sul seriam positivamente impactadas com

incremento de produtividade média, contribuindo para amenizar os efeitos negativos sobre as demais UFs. Contudo, em regiões com predominância de produção da agricultura familiar orientada para subsistência, haveria redução de produtividade média. Portanto, para além do aumento da vulnerabilidade dos produtores mais frágeis, o fenômeno também poderia contribuir com o aumento das disparidades regionais.

Referências

Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Nassar, A.; Harfuch, L.; Freitas, S.; Farinelli, B.; Lundell, M.; Bachion, L. C.; Fernandes, C. M. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola brasileira. [S.l.]: The World Bank, 2013.

Assad, E. D., & Pinto, H. S. (2008). Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira. São Paulo: Embrapa/Unicamp.

Assunção, J., & Chein, F. (2016). Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. *Environment and Development Economics*, 21(5), 581-602.

Barbosa, E., Feres, J., Haddad, E., & Paez, A. (2020). Climate Change and Land Use Pattern in Brazil. *Innovations in Urban and Regional Systems: Contributions from GIS&T, Spatial Analysis and Location Modeling*, 443-472.

Buchinsky, M; Recent advances in quantile regression models: a practical guideline for empirical research. *Journal of Human Resources*. p. 88-126

Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(5), 512.

DePpaula, Guilherme. The distributional effect of climate change on agriculture: Evidence from a Ricardian quantile analysis of Brazilian census data. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 104, p. 102378, 2020.

Escher, F., Schneider, S., Scarton, L. M., & Conterato, M. A. (2014). Caracterização da pluriatividade e dos plurirrendimentos da agricultura brasileira a partir do Censo Agropecuário 2006. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 52, 643-668.

FAO, 2014; Lowder, Sarah K.; Skoet, Jakob; Singh, Saumya. What do we really know about the number and distribution of farms and family farms in the world? Background paper for The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2014.

FAO, 2003. Impact of climate change on food security and implications for sustainable food production committee on world food security. Conference Twenty-ninth Session, 12 to 16 May, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Féres, J. G. ; Reis, E.J. ; Speranza, J.S. . Impacto das Mudanças Climáticas no Setor Agrícola Brasileiro. In: Ronaldo Seroa da Motta, Jorge Hargrave; Gustavo Luedemann; Maria Bernadete Sarmiento Gutierrez. (Org.). *Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios*. 1ed.Brasília: IPEA, 2011, v. , p. 299-309.

- Féres, J., E. Reis E J. Speranza. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. In: XXXVII Encontro Nacional de Economia, 2009, Foz do Iguaçu. Anais do XXXVII Encontro Nacional de Economia, 2009.
- Helfand, S. M., & Taylor, M. P. (2021). The inverse relationship between farm size and productivity: refocusing the debate. *Food Policy*, 99, 101977. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101977>.
- Helfand, S., Moreira, A., & Junior, E. B. (2014). Agricultura familiar, produtividade e pobreza no Brasil: evidências do censo agropecuário 2006. In S. Schneider, B. Ferreira & F. Alves (Orgs.), *Aspectos multidimensionais da agricultura brasileira: diferentes visões do Censo Agropecuário 2006* (387 p.). Brasília, DF: IPEA.
- Hitz, S. And J. Smith, 2004: Estimating global impacts from climate change. *Global Environ. Change*, 14, 201-218.
- Koenker, R; Bassett JR, G. Regression Quantiles. *Econometrica. Journal of the Econometric Society* P.33-50. 1978
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2017). *Censo Agropecuário 2017*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEADATA. (2019). Retrieved in 2019, August, from <http://www.ipeadata.gov.br>
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report*
- Lobell, M. *et al.* "Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030". *Science*, Washington: AAAS, v. 319, n. 5863, p. 607-610, 2008
- Matsuura, K., & Willmott, C. J. (2012). Terrestrial air temperature: 1900–2010 gridded monthly time series. Retrieved in 2020, September 28, from http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/GlobalTsT2011.Html
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W., Shaw, D. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *American Economic Review*, v. 84, n. 4, p. 753-771, 1994.
- NRC. National Research Council, 2012, *Climate Change. Evidence, Impacts and Choices*. p. 121–158.
- Pinto, H. S.; Assad, E. D.; Junior, J .Z.; Evangelista, S. R. M.; Otavian, A. F.; Ávila, A. M. H.; Evangelista, B.; Marin, F. R.; Junior, C. M.; Pellegrino, G. Q.; Coltri, P. P.; Coral, G. *Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil*. Embrapa, São Paulo, 2008.
- Schlenker, W., Hanemann, W., Fisher, A. The impact of global warming on US agriculture: an econometric analysis of optimal growing conditions. *Review of Economics and Statistics*, v. 88, n. 1, p. 113-125, 2006.
- Schneider, Sérgio. Teoria social, agricultura familiar e pluriatividade. *Revista brasileira de ciências sociais*, v. 18, p. 99-122, 2003.

Tanure, T. M. P., Domingues, E. P., & Magalhães, A. S. (2024). Regional impacts of climate change on agricultural productivity: evidence on large-scale and family farming in Brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(1), e262515. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.262515>

Veiga, J. E. da. Debates: Agricultura familiar e sustentabilidade. *Cadernos de Ciência e Tecnologia*, Brasília, v.13, n.3, p. 383-404, 1996.