

Efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre a PTF e o valor da produção agrícola para os anos de 2006 e de 2017: uma análise georreferenciada para os municípios da região Centro-Oeste¹

Jefferson Douglas da Silva Pereira²
Jamaika Prado[†]
Lucas Leão[†]
Caio Henrique Mota Silva Baptista[†]

Resumo

O artigo objetiva mensurar os efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre a produtividade total dos fatores (PTF) e sobre o valor da produção agrícola para os municípios da região Centro-Oeste do Brasil nos anos de 2006 e de 2017. Para tanto, derivou-se a PTF, a partir de uma função de produção do tipo Cobb-Douglas, e estimou-se os efeitos das temperaturas extremas sobre ela. Adicionalmente, estimou-se esses mesmos efeitos sobre o valor da produção agrícola. Os principais resultados obtidos mostram que o aumento de um dia de exposição acumulada a temperaturas médias horárias superiores a 33 °C no ano leva a uma redução da produtividade total dos fatores em 1,96% e em 0,45% e a uma redução da produção agrícola em 13,1% e em 11,5% nos anos de 2006 e de 2017, respectivamente. Verificou-se que as perdas são maiores para a produtividade do que para PTF agrícola.

Palavras-Chaves: Temperaturas extremas. Função de produção agrícola. PTF agrícola.

Abstract

This study aims to measure the effects of extreme temperatures on the total factor productivity (TFP) and the value of agricultural production for the municipalities of the Center-West region of Brazil in the years 2006 and 2017. To do so, the TFP was derived from a Cobb-Douglas production function, and then the effects of extreme temperatures on TFP were estimated. Additionally, these same effects on agricultural yields were estimated. The main results of this study show that the increase of one day of accumulated exposure to average hourly temperatures above 33 °C in the year leads to a reduction in the total productivity of the factors by 1,96% and 0.45% and a reduction in the agricultural yields by 13.1% and 11.5% in 2006 and 2017, respectively. Losses were found to be greater for yields than for agricultural TFP.

Keywords: Extreme temperatures. Agricultural production function. Agricultural TFP.

JEL: D24; O13; Q54.

¹ Os autores agradecem ao financiamento da FAPEMIG, CAPES e CNPq.

² Doutorando(a) – PPGE/UFJF.

1. Introdução

As emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEE) têm aumentado de forma acentuada desde a Revolução Industrial, impulsionadas pelo crescimento econômico e populacional (SALVIANO; GROppo; PELLEGRINO, 2016). Tal padrão se relaciona com uma concentração de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso sem precedentes nos últimos 800 mil anos e, juntamente, com outros fatores relativos à ação humana, são apontados como causadores do aquecimento global observado desde meados do século XX (IPCC, 2015).

O aumento observado da média global dos dados combinados de temperatura da superfície terrestre e oceânica está relacionado a vários impactos nos ecossistemas e no ciclo hidrológico, com alteração nos padrões de chuva e temperatura, além da ocorrência de eventos climáticos extremos ou atípicos (ALMEIDA, 2012). Esses fenômenos são consequências das mudanças climáticas que, de acordo com o IPCC (2022), referem-se a alterações no estado do clima, que podem ser identificadas por variações na média e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persistem por um período prolongado. Isso pode impactar diversos segmentos econômicos, como a agricultura e a pecuária, a geração de energia, o abastecimento hídrico e levar à ocorrência de uma série de desastres naturais (MARENGO; SOARES, 2003).

No Brasil, projeções de clima para o final do século XXI apontam para o aumento da temperatura e variações na precipitação pluviométrica (IPCC, 2015). Particularmente, a região Centro-Oeste do país, que é a com maior diversidade de ecossistemas e com protagonismo econômico interno em virtude das atividades agroexportadoras, poderia ser fortemente impactada com as modificações climáticas futuras (SOARES, 2011). Dados do *Climate Change Knowledge Portal* reportam um aumento da temperatura média da região Centro-Oeste. Em 2017, ela foi de 24,95 °C, enquanto, em 2006, de 24,43 °C, o que representa uma elevação média de 0,52 °C, superior àquela observada para o Brasil (0,35 °C) (CCKP, 2021).

Para superar os desafios impostos pelas mudanças no clima, os agroecossistemas brasileiros e, mais especificamente, os da região Centro-Oeste, devem buscar inovações tecnológicas que permitam a mitigação das emissões de gases poluentes e a adaptação às alterações climáticas, de modo a garantir o aumento da produtividade dos cultivos e, assim, o suprimento das demandas internas por alimentos, a médio e longo prazos, e a obtenção de divisas através das exportações (CUADRA, SANTIAGO VIANNA *et al.*, 2018).

Uma das formas de avaliar os impactos de mudanças climáticas sobre a produção agrícola é através da resposta na produtividade do setor (BURKE; EMERICK, 2016; PITTELKOW *et al.*, 2014). Diante das diversificações nas carteiras de insumos agrícolas dos últimos anos, essa avaliação tem ficado cada vez mais ampla, transitando de uma análise da produtividade pura do fator terra para uma que abarque todos os insumos, inclusive o progresso tecnológico e a eficiência técnica empregados na produção agrícola, entendida também como produtividade total dos fatores (PTF) (CHEN; GONG, 2021; RUTTAN, 2002).

Assim, o artigo objetiva mensurar os efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre a produtividade total dos fatores e sobre o valor da produção agrícola para os municípios da região Centro-Oeste do Brasil nos anos de 2006 e de 2017, tendo como unidade de medida para essa incidência o acúmulo de exposição diário em que as temperaturas médias horárias superaram 33°C ou ficaram abaixo de 10 °C. Dado que um aumento da exposição a temperaturas acima de 33°C pode resultar em quedas acentuadas da PTF agrícola, bem como a exposição a temperaturas abaixo de 10°C (BASKERVILLE; EMIN, 1969; CHEN; GONG, 2021; DAI *et al.*, 2014; ROLTSCH *et al.*, 1999). Ademais, busca-se comparar em qual dessas variáveis esses efeitos são mais acentuados.

A escolha da região Centro-Oeste é, particularmente, interessante por, pelo menos, dois motivos. Em primeiro lugar, a agricultura desempenha um papel fundamental na economia da região, na economia nacional e nos mercados internacionais de *commodities*. Em 2017, a região Centro-Oeste produziu 103.428,4 mil toneladas de grãos, o equivalente a cerca de 44,4% da produção total de grãos do País. Em segundo, o Centro-Oeste é uma região fortemente afetada pelas mudanças danosas ao meio ambiente. Em relação às demais regiões brasileiras, ela apresentou a maior variação média de temperatura (0,5 °C), quando se compara o ano de 2006 e de 2017 (CCKP, 2021). Além disso, o Centro-Oeste possui um território

que abriga quatro diferentes biomas (Cerrado, Amazônia, Pantanal e Mata Atlântica), com maior proporção para o Cerrado.

Ao considerar os efeitos das temperaturas extremas sobre a produtividade total dos fatores, este estudo apresenta um avanço na literatura nacional, pois, até então, os artigos sobre o Brasil (*e.g.*, Sanghi *et al.*, 1997) e Sanghi; Medelsohn, 2008) têm direcionado suas análises apenas para os impactos no valor da produção agrícola, também aqui referida como produtividade agrícola, ignorando os mecanismos pelos quais a produtividade da agricultura é afetada pela PTF. Outra contribuição diz respeito ao emprego de insumos diversos (maquinário, mão de obra, adubos e agrotóxicos), além do fator terra, na estimação da função de produção agrícola.

Em relação aos dados, este trabalho combina informações mais recentes dos censos agropecuários (2006 e 2017) e com dados climáticos, que são extraídos de imagens de satélite e georreferenciados para cada município. Isso confere maior precisão aos dados, uma vez que não se faz necessário realizar imputações, o que é preciso quando se trabalha com estações meteorológicas.

Adota-se três hipóteses. A hipótese 1 pressupõe que temperaturas extremas afetam negativamente a produtividade total dos fatores agrícolas. A hipótese 2 postula que temperaturas extremas afetam negativamente a produtividade agrícola. Por fim, a hipótese 3 supõe que os efeitos negativos das temperaturas extremas são maiores sobre o valor da produção agrícola do que sobre a PTF.

Além desta introdução, o estudo está dividido em outras quatro seções. Na segunda seção, apresenta-se a revisão empírica da literatura. A seção 3 traz as informações relacionadas à metodologia e à base de dados. Na quarta seção, são dispostos os resultados desta pesquisa e feita uma discussão deles. Por fim, a última seção refere-se às considerações finais.

2. Revisão empírica da literatura

Esta seção tem como objetivo apresentar os principais estudos empíricos sobre os impactos das temperaturas extremas na produtividade total dos fatores e na produtividade agrícola. Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994) desenvolveram um estudo pioneiro, com metodologia amplamente replicada pela literatura especializada, levando em conta que as previsões de que aumentos de temperatura e impactam a agricultura. Os autores propuseram uma abordagem ricardiana para mensurar o impacto econômico do clima sobre o valor e a produtividade das terras agrícolas dos Estados Unidos (EUA), em 1982, a partir de uma especificação com dados *cross-section*. Os resultados das estimativas do modelo apontam que aumentos de temperatura têm impactos negativos sobre os rendimentos da agricultura, de modo que um aumento de 5 °F na temperatura média dos EUA, pode reduzir as receitas agrícolas entre 4% e 6%.

Schelenker, Hanemann e Fisher (2006) estimaram o impacto das temperaturas extremas sobre a produtividade das terras agrícolas dos EUA, considerando os dados censitários de 1982, 1987, 1992 e 1997, também por meio do modelo ricardiano de valoração da terra. As estimativas encontradas para dias com temperatura acumulada superior a 34 °C são todas negativas. As projeções de aumentos de temperatura para o médio prazo (2020-2049) revelaram que o aumento de um dia acumulado com temperaturas superiores a 34 °C pode reduzir o valor da produção agrícola entre 10% e 25%. Enquanto, no longo prazo (2070-2099), os impactos são negativos entre 27% e 69%.

Schelenker e Roberts (2009) avaliaram a relação entre clima e produtividade para as três safras de maior valor de produção dos EUA, no período de 1950 a 2005: milho, soja e algodão. Os autores dividiram o período de análise em duas amostras iguais, identificando como a relação temperatura-produtividade se modificou ao longo do tempo. Schelenker e Roberts (2009) mostraram que um aumento médio de 1 °C de temperatura impacta, negativamente, o valor da produção do milho (-6,38%), da soja (-3,17%) e do algodão (-2,59%). Burke e Emerick (2016) também encontraram perdas nas safras do milho e da soja do EUA em decorrência de aumentos de temperatura. As estimativas mostraram que, com o aumento da temperatura, há uma queda na produtividade agrícola do milho e da soja, que são duas das principais safras dos EUA. Os resultados encontrados nesses estudos indicam que o impacto negativo das temperaturas extremas sobre a produtividade agrícola pode ser diferente entre lavouras distintas.

Como se pode ver, os estudos têm focado suas análises, primordialmente, para os países desenvolvidos, como é descrito em Dell *et al.* (2014). Contudo, analisar como as temperaturas extremas afetam a agricultura nos países em desenvolvimento é de suma importância, tendo em vista que esses países dependem fortemente da agricultura. Além disso, grande parte deles está localizada em regiões tropicais ou subtropicais que são, particularmente, vulneráveis a danos potenciais, causados por mudanças climáticas (MENDELSON; DINAR, 1999). A literatura tem comprovado que a agricultura nesses países, é mais sensível às mudanças climáticas do que em países de climas temperados. Mesmo um aquecimento marginal pode provocar danos às safras nos países africanos e latino-americanos, como é o caso do Brasil (MENDELSON, 2009).

Um dos primeiros trabalhos feitos para o Brasil foi realizado por Sanghi *et al.* (1997). Os autores estimaram os impactos das temperaturas extremas sobre a agricultura brasileira, por meio de quatro modelos *cross-section*, considerando os dados dos censos agropecuários de 1970, 1975, 1980 e 1985. Os resultados mostraram que um aumento de 2,5 °C na temperatura média do último mês de cada estação do ano impactam, negativamente, a agricultura brasileira, com variações entre -2,16% a -7,40%. Os autores destacam que as regiões Centro-Oeste e parte da região Norte são as mais afetadas.

Sanghi e Medelsohn (2008), por meio de uma análise *cross-section*, estimaram a sensibilidade climática da agricultura no Brasil e na Índia e analisaram como os agricultores desses dois países reagem às mudanças climáticas. Os autores projetam que um aumento da temperatura média em 2 °C e da precipitação média em 8% até 2100, pode gerar perdas na produtividade agrícola de 20% no Brasil e 12% na Índia. Ao simular combinações distintas entre essas variáveis, as perdas variam entre 1% e 39%, para o Brasil, e entre 4% e 26%, para a Índia.

Assunção e Chein (2016) analisaram o impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola no Brasil, por meio de alterações na temperatura e na pluviosidade. Os autores estimam uma função de produção agrícola em nível municipal para uma amostra *cross-section* e realizam simulações levando em consideração as projeções do IPCC para temperatura e para precipitação pluviométrica. Considerando todo o país, o aumento de 6,57% na temperatura média, combinada com a diminuição de 0,71% na pluviosidade média, leva a uma redução de 18,2% na produtividade agrícola brasileira. Para a região Centro-Oeste, o aumento de 7,47% na temperatura média e a diminuição de 1,54% na pluviosidade, em termo médios, reduz em 28,3% o valor da produção da agricultura. Essa redução é a segunda maior quando comparado com as demais regiões, ficando atrás apenas da região Norte (35%).

Em relação aos efeitos das variações climáticas sobre a PTF, Aragón, Oteiza e Rud (2021) examinaram como os agricultores de subsistência peruanos reagem ao calor extremo, especificamente, investigaram a relação entre a temperatura e a produtividade agrícola, a produtividade total dos fatores e o uso de insumos. Para isso, os autores estimaram uma função de produção agrícola do tipo Cobb-Douglas e derivaram dela a produtividade total dos fatores por meio de dados em painel para o período de 2007 a 2015. As estimativas do modelo de referência do estudo mostram que o aumento de um dia com temperaturas médias superiores a 33 °C, no ano, resulta em um decréscimo médio de 7% na produtividade total dos fatores e de 11,4% na produtividade agrícola.

Chen e Gong (2021) também estimaram uma função de produção agrícola do tipo Cobb-Douglas para os condados chineses a partir de uma estrutura de dados em painel. A partir das estimativas dessa função, os autores derivaram a PTF e, assim, avaliaram o impacto das temperaturas extremas sobre ela, sobre a produtividade da agricultura e sobre o uso de outros insumos. Os resultados mostram que, no curto prazo, há perdas de 2,56% e 4,38% na produtividade total dos fatores e no valor da produção agrícola, respectivamente, quando a quantidade de dias com temperaturas horárias médias acumuladas acima de 33 °C.

Esta seção demonstrou que o enfoque dos estudos têm sido, primordialmente, analisar os impactos da incidência de temperaturas extremas na produtividade agrícola. Poucos estudos focaram na relação entre essa incidência e a PTF, com exceção de Aragón, Oteiza e Rud (2021) e Chen e Gong (2021), que realizaram análises para o Peru e para a China, respectivamente. Para o Brasil, não foi encontrada literatura para esta última relação. Neste sentido, este trabalho diferencia-se dos existentes por mensurar os efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre a PTF e, não somente, sobre a produtividade agrícola para Brasil.

De maneira resumida, esta seção buscou apresentar os principais estudos sobre os impactos das temperaturas extremas sobre a produtividade agrícola (valor da produção e PTF). Foram apresentados trabalhos desde o estudo pioneiro de Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994) até estudos mais recentes (CHEN; GONG, 2021), cujas análises foram feitas tanto para países desenvolvidos quanto para países em desenvolvimento, incluindo, para o Brasil. A próxima seção abordará o arcabouço metodológico proposto por esta pesquisa.

3. Metodologia

Esta seção está dividida em duas subseções. A primeira apresenta a estratégia empírica aqui adotada. A segunda descreve a base de dados e as variáveis.

3.1 Estratégia empírica

Esta subseção apresenta os modelos e o método utilizados para mensurar os efeitos das temperaturas extremas, tendo como medida o acúmulo diário de temperaturas extremas, sobre a produtividade total dos fatores agrícolas e sobre o valor da produção agrícola para os municípios da região Centro-Oeste do Brasil. As estimativas dos modelos foram obtidas através do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com erros padrão robustos, a fim de corrigir eventuais problemas de heterocedasticidade. A estratégia empírica se dá em três etapas.

A primeira delas consiste na estimação da função de produção agrícola do tipo Cobb–Douglas, tomando por base o modelo adotado por Chen e Gong (2021):

$$Y = F(X, \beta) + PTF = X\beta + PTF \quad (1)$$

em que y representa o valor da produção agrícola por hectare; $f(X, \beta)$ mede a relação insumo-produto do processo de produção agrícola, onde $X = c(l, p, a, m)$ representa os vetores de insumos agrícolas, l = mão de obra por hectare; p = agrotóxico, medido em percentual de uso de agrotóxico; a = adubo, medido em percentual de uso de adubo, m = máquinas por hectare; $\beta = c(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$ vetoriza os coeficientes de insumos; e PTF contabiliza a produtividade total dos fatores agrícolas. A especificação econométrica adotada é a seguinte:

$$y_i = \alpha + \beta_1 l_i + \beta_2 p_i + \beta_3 a_i + \beta_4 m_i + u_i + v_i \quad (2)$$

em que as variáveis escritas em letras minúsculas estão em logaritmo e $i = 1, \dots, 466$ representa cada município.

Na etapa 2, deriva-se, a partir da função de produção (2), a PTF, que neste estudo é o resíduo de Solow (AIGNER; LOVELL; SCHMIDT, 1977; MEEUSEN; VAN DEN BROECK, 1977) pode ser derivada da seguinte maneira: $ptf = \exp(\alpha - u_i)$, onde α é o intercepto e u_i é a ineficiência técnica.

A última etapa consiste em estimar os efeitos das temperaturas extremas sobre a PTF e sobre o valor da produção agrícola. Para capturar a relação não linear entre essas variáveis, utiliza-se o conceito de graus dias com base nos estudos de Schlenker e Roberts (2009), Chein *et al.* (2016) e Chen e Gong (2021). Na prática, mede-se a quantidade acumulada de dias no ano em que as temperaturas médias horárias foram superiores a 33°C ou inferiores a 10°C. A escolha dos limites inferior e superior de temperaturas são baseadas na literatura agrícola e meteorológica (BASKERVILLE; EMIN, 1969; CHEN; GONG, 2021; DAI *et al.*, 2014; ROLTSCH *et al.*, 1999), que sugere que um aumento da exposição a temperaturas acima de 33°C pode resultar em quedas acentuadas da PTF agrícola. Enquanto, a exposição a temperaturas acima de 10°C podem beneficiar a produção agrícola, o que justifica o uso de temperaturas abaixo de 10°C como limite inferior. Assume-se que outros fatores que afetam a produtividade e a produtividade total dos fatores, e são capturados pelos erros, não são correlacionados na média com fatores climáticos e geográficos (CHEIN, 2019). A estimação da última etapa se dá por:

$$ptf_i = \alpha + Temp.Máx > 33_i + Temp.Min < 10_i + v_i \quad (3)$$

$$produtividade_i = \alpha + Temp.Máx > 33_i + Temp.Min < 10_i + v_i \quad (3.1)$$

em que, ptf e $produtividade$ representam o logaritmo da PTF e o valor da produção agrícola, respectivamente, no município i ; $Temp.Min < 10_i$ é quantidade de dias que a temperatura esteve abaixo de 10°C no município i ; $Temp.Máx > 33_i$ é quantidade de dias que a temperatura esteve acima de 33°C no município i ; v_i é o termo de erro. As especificações da equação (3) e (3.1) é o modelo de base dessa etapa.

Para isolar os impactos da temperatura nos resultados agrícolas, leia-se PTF e produtividade, são adicionados controles climáticos nas equações (3) e (3.1), com vistas a evitar a superestimação ou subestimação desses impactos (CHEN; GONG, 2021). As equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$ptf_i = \alpha + Temp.Máx > 33_i + Temp.Min < 10_i + \gamma_i + v_i \quad (4)$$

$$produtividade_i = \alpha + Temp.Máx > 33_i + Temp.Min < 10_i + \gamma_i + v_i \quad (4.1)$$

em que, γ_i representa os termos lineares e quadráticos da média diária de radiação, umidade, vento v , vento h e precipitação.

A principal vantagem dessa estrutura empírica, é que ela permite medir a produtividade total dos fatores utilizando todos os insumos, o que confere medida melhor de progresso técnico e eficiência técnica no setor agrícola (GONG, 2020; CHEN; GONG, 2021).

3.2 Base de dados e variáveis

Esta subseção apresenta a base de dados e as variáveis utilizadas para elaboração deste estudo. Os dados são secundários do tipo *cross-section* e se referem a 466 municípios³ pertencentes à região Centro-Oeste para os anos de 2006 e de 2017. As informações sobre produtividade agrícola, trabalho, **adubos**, **agrotóxicos**, e maquinários são extraídos dos Censos Agropecuários, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006, 2017).

Para identificar como as temperaturas extremas afetam o valor da produção e a produtividade total dos fatores, segue-se os estudos de Wang *et al.* (2016) e Chen e Gong (2021). A variável de valor de produção agrícola é o valor total da produção por hectare e em mil reais. Os insumos são: maquinário, medido pela quantidade total de máquinas por hectare; trabalho, que é a quantidade total de trabalhadores por hectare; **adubo é o percentual de estabelecimentos que utilizam adubos na sua produção; e agrotóxico é o percentual de estabelecimentos que utilizam agrotóxicos na sua produção.**

Com relação aos dados climáticos, o ERA5 - *Land* fornece estimativas horárias de dados atmosféricos, de ondas oceânicas e da superfície terrestre por meio do conjunto de dados global produzidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) do *Copernicus Emergency Management Service*, disponibilizado gratuitamente pelo *Climate Data Store* (COPERNICUS, 2022). Os dados estão no formato *netcdf4*, em uma resolução horizontal de 0,1° x 0,1°, ou seja, isso significa que cada *pixel* representa cerca de 9km x 9km da superfície terrestre. As variáveis não climáticas estão em nível municipal, por isso os dados climáticos foram agregados para o nível do município, utilizando as observações dos centroides municipais para cada variável nos anos de 2006 e de 2017.

As variáveis de temperaturas extremas foram construídas a partir da quantidade acumulada de dias no ano em que as temperaturas médias horárias foram superiores a 33°C (limite superior) ou inferiores a 10°C (limite inferior). A radiação é a média anual da radiação solar, medida em joules. As variáveis de velocidade média do vento com direção Norte-Sul e Leste-Oeste estão em metros por segundos. A umidade é a temperatura em graus Celsius do ponto de orvalho. Por último, A precipitação é a média do volume acumulado de chuva em milímetros. Quadro 1 a seguir, resume esse conjunto de informações.

³ O município de Paraíso das Águas (MS) foi excluído pela indisponibilidade de dados no ano de 2006, pois foi criado em 2013.

Quadro 1 – Descrição das variáveis e fontes de dados

Variável	Definição	unidade	Fonte
InProdutividade	Valor total da produção dos estabelecimentos agropecuários por hectare.	R\$ (mil)/ha	Censo agropecuário / IBGE
InMaquinários	Quantidade total de maquinário (tratores, semeadeiras/plantadeiras, colheitadeiras, adubadeiras e/ou distribuidoras de calcário) dos estabelecimentos agropecuários por hectare.	ha	Censo agropecuário / IBGE
InTrabalho	Quantidade total de trabalhadores dos estabelecimentos agropecuários por hectare.	ha	Censo agropecuário / IBGE
InAdubos	Percentual de estabelecimentos que usam adubo.	%	Censo agropecuário / IBGE
InAgrotóxicos	Percentual de estabelecimentos que usam agrotóxicos.	%	Censo agropecuário / IBGE
Temp. Máx >33	Quantidade de dias em que a temperatura máxima foi superior a 33 °C no ano.	°C	ERA5/Copernicus
Temp. Min <10	Quantidade de dias em que a temperatura mínima foi inferior a 10 °C no ano.	°C	ERA5/Copernicus
Radiação	Média anual da radiação solar.	J	ERA5/Copernicus
Umidade	Temperatura no ponto de orvalho	°C	ERA5/Copernicus
Vento v	Velocidade média do vento Norte-Sul.	m/s	ERA5/Copernicus
Vento h	Velocidade média do vento Leste-Oeste.	m/s	ERA5/Copernicus
Precipitação	Precipitação média.	mm	ERA5/Copernicus

Fonte: Elaboração própria.

4. Resultados e discussões

Esta seção apresenta os resultados desta pesquisa. A subseção 4.1 traz as principais estatísticas descritivas das variáveis utilizadas. Na subseção 4.2, apresenta-se e discute-se as estimativas encontradas nas estimações dos modelos econométricos adotados neste estudo.

4.1 Estatísticas descritivas

A Tabela 1 apresenta as principais estatísticas descritivas das variáveis agrícolas e climáticas para os municípios da região Centro-Oeste nos anos de 2006 e 2017. Em 2006, em média, 16,62% dos estabelecimentos agropecuários utilizaram agrotóxicos na sua produção. Já a proporção de estabelecimentos que utilizaram adubo em sua produção foi, em média de 30,7%. Nesse mesmo ano, em um hectare de estabelecimento agropecuário, em média, os municípios da região Centro-Oeste usaram 0,0081 máquinas e 0,0198 trabalhadores para gerar produtividade de R\$ 192,60 a preços de 2006. Em 2017, o percentual médio de uso de agrotóxico foi de 29,53%, o percentual médio de uso de adubo foi 32,5%, enquanto, por hectare, o uso médio de máquinas foi 0,0038 e de trabalhadores 0,0411, o que gerou R\$ 1.471,90 a preços de 2017.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis para os anos de 2006 e 2017

Variável	Ano							
	2006				2017			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Produtividade	0,1926	0,2948	0,0002	2,5175	1,4719	1,8883	0	8,9233
Maquinários	0,0081	0,0075	0,0002	0,0725	0,0038	0,0031	0	0,0278
Trabalhadores	0,0198	0,0210	0,0009	0,2056	0,0227	0,0411	0,0016	0,8065
Agrotóxico	16,620	13,902	0	90,625	29,533	18,425	0	92,814
Adubo	30,748	20,798	0,2398	92,553	32,505	18,516	0,7299	96,407
Temp. Máx >33	6,1633	5,5401	0	24,166	13,722	8,4428	0,4167	41,583
Temp. Min <10	0,1801	0,7222	0	6,8750	0,4132	1,0520	0	5,6250
Radiação	4,713,3	954,83	2.211,3	6.841,6	4.962,1	1074,0	2.423,6	7.337,0
Umidade	17,9440	1,3946	14,7601	22,0195	17,6954	1,8233	13,5942	21,9981
Vento v	0,4426	0,3299	0,0010	1,1588	0,4146	0,3081	0,0011	1.1810

Vento h	0,8526	0,4550	0,0039	2,3519	1,0680	0,6223	0,0040	3,0222
Precipitação	1,509	0,318	0,698	2,708	1,367	0,297	0,801	2,596
Total de Observações	466				466			

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos dados da Tabela 1, pode-se fazer uma comparação dos valores médios da produção e de cada insumo utilizado na produção agropecuária para os anos de 2006 e de 2017. Houve um aumento de 1,2 vezes no número de trabalhadores, uma redução de 2 vezes no total de maquinário, uma elevação de 1,8 vezes no percentual dos estabelecimentos que usaram agrotóxicos e um aumento de 1,7 vezes no percentual de estabelecimentos que utilizaram adubo em 2017, quando se compara com 2006. Em relação ao valor de produção agrícola, em 2017, em média, cada hectare de estabelecimento agropecuário gerou R\$ 1.471,90, o que representa, aproximadamente, oito vezes mais, em termos nominais, daquilo que foi gerado em 2006 (R\$ 192,60). Em resumo, em 2017 em relação a 2006, aumentou-se o uso de agrotóxicos, de adubo, de trabalhadores e da produtividade agrícola ao passo que se reduziu o uso de maquinário.

Em relação às variáveis de temperatura, a Tabela 1 mostra que, em média, a quantidade de dias em que a temperatura média horária acumulada ultrapassou o limite superior, 33 ° C, foi de 6,16, em 2006; esse número foi um pouco maior que o dobro em 2017 (13,72). Já em relação à média da quantidade de dias em que a temperatura média horária acumulada esteve abaixo do limite inferior, 10 ° C, foi de 0,1801, em 2006, e de 0,4132, em 2017, o que representa um aumento maior que o dobro. Esses valores apontam para mudanças climáticas extremas, em que tanto temperaturas elevadas quanto baixas tornaram-se mais frequentes.

Por fim, a Tabela 1 ainda resume as principais estatísticas descritivas dos controles climáticos utilizados nas estimativas deste estudo. A intensidade média da radiação solar no ano de 2006 foi de 4.713,30 J; em 2017 foi de 4.962,10 J. Em 2006, a umidade média, medida pela temperatura no ponto de orvalho, foi de 17,94° C, as velocidades médias do vento vertical e horizontal foram de 0,4426 m/s e 0,85 m/s, respectivamente, e a precipitação total média foi de 1,509 mm. Já em 2017, em termos médios, a umidade foi de 17,69 ° C, as velocidades médias do vento vertical e horizontal foram de 0,4146 m/s e 1,07 m/s, nesta ordem, e a precipitação total média foi de 1,367 mm.

4.2 Resultados das estimativas da PTF e do valor da produção agrícola

A primeira etapa da estratégia empírica deste estudo consiste em estimar a função de produção agrícola para os municípios da região Centro-Oeste para os anos de 2006 e de 2017. A Tabela 2 informa os resultados dessa estimativa. Em ambos os anos, os coeficientes estimados de cada insumo foram positivos, (exceto trabalhadores, para o ano de 2017) como esperado e encontrado na literatura (ARAGÓN; OTEIZA; RUD, 2021; CHEN; GONG, 2021). Contudo, nem todos eles foram significativos, considerando um nível mínimo de significância de 10% (trabalhadores para os anos de 2006 e 2017, e agrotóxicos para o último). De todo modo, para ambos os anos, os modelos estimados se mostraram adequados, conforme mostra o resultado do teste F. Sendo assim, a derivação da PTF não está comprometida, já que será feita a partir de modelos significativos.

Tabela 2 - Resultados da estimativa da função de produção para os anos de 2006 e 2017

Variáveis	Ano	
	2006	2017
lnAgrotóxicos	0,2390** (0,1070)	0,0547 (0,0819)
lnMaquinários	0,7330*** (0,1310)	0,2400* (0,1380)
lnTrabalhadores	0,0744 (0,0970)	-0,1530 (0,2380)
lnAdubos	0,4600***	1,4610***

	(0,1100)	(0,1650)
Constante	-0,7420	-4,9060***
	(0,8860)	(0,7840)
Observações	466	466
R-quadrado	0,445	0,345
F (4, 461)	80,37	43,60
Prob > F	0,0000	0,0000

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em parênteses erro padrão robusto.

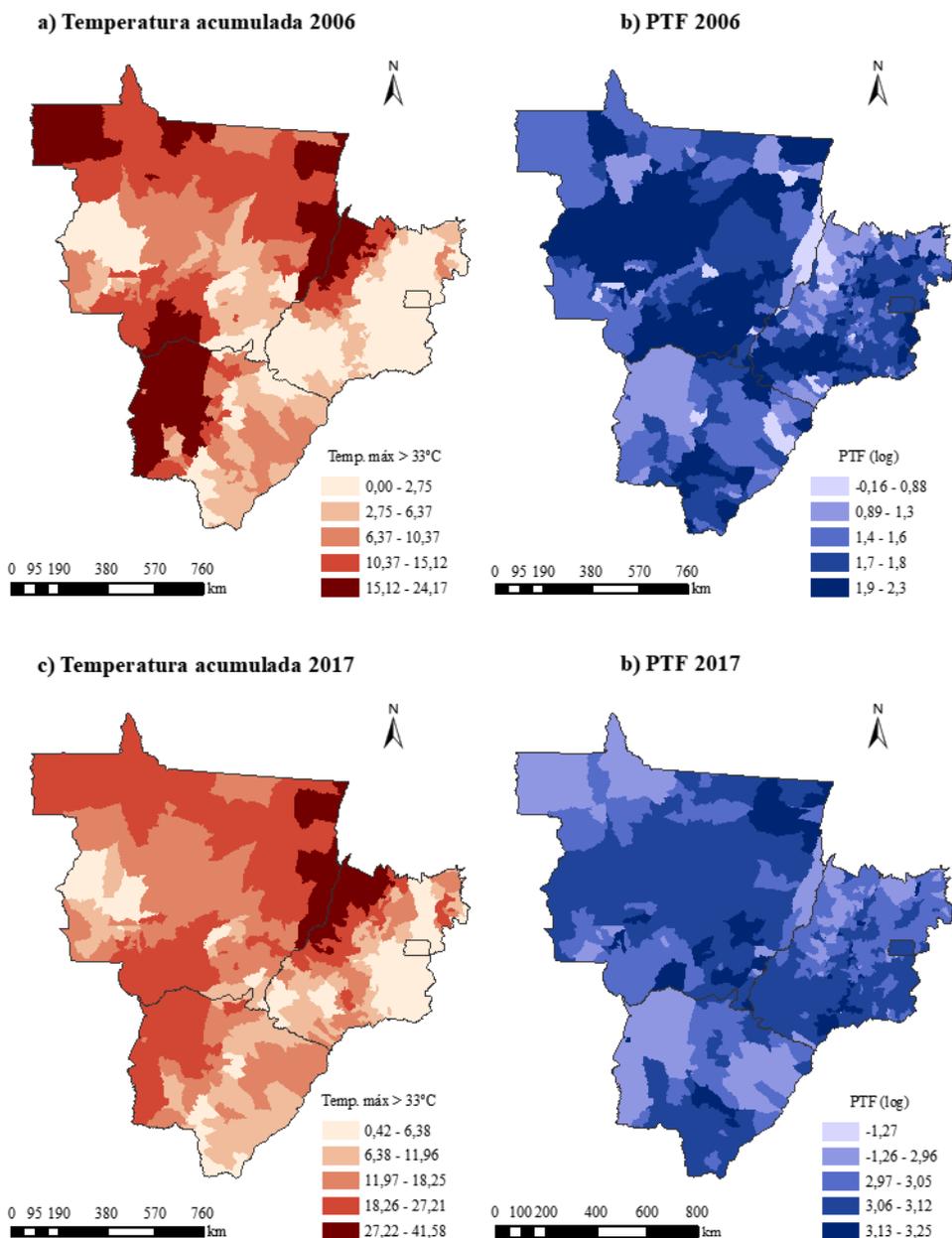
*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Uma vez estimada a função de produção agrícola para cada ano, segue-se para a segunda etapa metodológica - a derivação da PTF. O painel de gráficos, disposto na Figura 1, mostra a distribuição espacial da PTF para cada município da região Centro-Oeste em 2006 e em 2017. Além disso, a Figura 1 reporta como a acumulação de dias em que a temperatura média horária superou 33 °C está geograficamente distribuída. Conforme a tonalidade da cor se intensifica, maiores são os valores para cada variável.

Observa-se que, em 2006 (painel a da Figura 1), partes isoladas do norte, nordeste e sudoeste da região apresentaram a maior quantidade de dias em que o acúmulo de temperatura superou os 33 °C, em contrapartida, os municípios da porção leste, sul e sudeste apresentaram a menor quantidade. Em 2017 (painel c), verifica-se que esse acúmulo foi mais bem distribuído entre os municípios, inclusive, com avanços para as porções que, em 2006, apresentava uma menor quantidade de temperatura acumulada acima de 33 °C. Em resumo, constata-se que o Centro-Oeste do Brasil apresenta variações transversais e intertemporais no que se refere às temperaturas extremas que resultam em elevações de temperatura.

Ainda na Figura 1, os painéis b e d mostram como está distribuída a PTF agrícola para os anos de 2006 e 2017, respectivamente. Quando se faz uma comparação entre os municípios, em 2006, há um maior espriamento da PTF; já em 2017, parece haver uma concentração dos valores mais elevados da PTF na região central e em alguns municípios do sul e leste do Centro-Oeste. Por fim, ao analisar a Figura 1, verifica-se que há quase uma sobreposição dos municípios com maior PTF e menor quantidade de exposição acumulada de dias em que a temperatura média horária superou os 33 °C. Isso sugere, portanto, que as temperaturas extremas podem ter um efeito negativo sobre a PTF agrícola da região Centro-Oeste.

Figura 1: Distribuição das temperaturas acumuladas acima de 33 °C e da PTF dos municípios da região Centro-Oeste para 2006 e 2017



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 3 traz os resultados da terceira etapa que compõe a estratégia empírica desta pesquisa, que consiste em analisar os efeitos das temperaturas extremas sobre a PTF para os anos de 2006 e de 2017. As colunas I e II mostram o efeito de uma exposição cumulativa adicional de um dia de temperaturas acima de 33 °C durante todo o ano para a PTF. As colunas III e IV apresentam os resultados do modelo base deste estudo, que considera também uma exposição cumulativa adicional de um dia a temperaturas abaixo de 10 °C durante o ano. As colunas V e VI apresentam os resultados do modelo preferido desta pesquisa, já que considera o acúmulo de temperaturas extremas sobre a PTF, com a adição de controles climáticos.

As estimativas presentes na Tabela 3 mostram que, para 2006, o aumento de um dia de exposição cumulativa de temperaturas acima do limite superior reduz a PTF agrícola anual em **1,19%** (coluna I). Quando se adiciona a quantidade acumulada de dias com temperaturas médias horárias abaixo do limite inferior (coluna III), esse impacto continua negativo, contudo, é um pouco menor, **1,16%**. A estimativa para temperatura máxima não foi significativa em 2017 (colunas II e IV).

Nas colunas V e VI da Tabela 3, estão as estimativas do modelo de referência deste estudo, que mensura o efeito do aquecimento global sobre a PTF com a adição de controles climáticos que influenciam a produtividade agrícola. Nesse caso, as estimativas do acúmulo de exposição acima de 33 °C sobre a PTF

foram significativas para ambos os anos a um nível de significância de 1% para 2006 e de 10% para 2017. Quando se trata, do acúmulo de exposição abaixo de 10 °C, controlando os efeitos climáticos, as estimativas só foram significativas para o ano de 2006, a 5%; para 2017, não foi significativa.

Tabela 3 - Impactos da temperatura na PTF agrícola do Centro-Oeste, com controles climáticos

Variáveis	Modelos					
	I	II	III	IV	V	VI
	2006	2017	2006	2017	2006	2017
Temp. Máx >33	-0,0119*** (0,0030)	0,0001 (0,0016)	-0,0116*** (0,0030)	0,0004 (0,0018)	-0,0196*** (0,0056)	-0,0045* (0,0026)
Temp. Min<10			0,0249*** (0,0081)	0,0113* (0,0068)	0,0291** (0,0127)	-0,0016 (0,0100)
Radiação					0,0003 (0,0002)	0,0001 (0,0000)
Radiação2					-0,0000* (0,0000)	-0,0000 (0,0000)
Umidade					-1,0480*** (0,3040)	0,2130 (0,3460)
Umidade2					0,0280*** (0,0083)	-0,0056 (0,0090)
Vento v					-0,3970** (0,1640)	-0,2020* (0,1030)
Vento v2					0,2930** (0,1480)	0,2040** (0,1040)
Vento h					-0,5010*** (0,1440)	-0,0414 (0,0840)
Vento h2					0,1820*** (0,0691)	-0,0204 (0,0426)
Precipitação					0,2190 (0,2670)	0,1760* (0,0987)
Precipitação2					-0,0923 (0,0856)	-0,0585** (0,0295)
Constante	1,638*** (0,021)	1,560*** (0,015)	1,632*** (0,021)	3,024*** (0,037)	11,080*** -2,634	0,778 -3,149
Observações	466	466	466	466	466	466
R-quadrado	0,043	0,005	0,046	0,003	0,188	0,046
Teste F	15,79	14,95	13,94	10,11	10,70	.
Prob > F	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em parênteses erro padrão robusto.

*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Os resultados do modelo preferido desta pesquisa (colunas V e VI) mostram que elevar em um dia a exposição cumulativa de temperaturas acima de 33 °C reduz a PTF agrícola em 1,96%, em 2006, e em 0,45% em 2017, corroborando com as estimativas encontradas para o Peru (ARAGÓN; OTEIZA; RUD, 2021) e para a China (CHEN; GONG, 2021). Esses resultados têm a mesma direção, contudo, são maiores do que aqueles encontrados no modelo base (colunas III e IV), o que indica que as estimativas são estáveis sob diferentes especificações e dão suporte a hipótese 1. A não inclusão dos controles climáticos nas estimações subestima o efeito negativo das variações climáticas sobre a PTF.

A literatura tem mostrado que os danos das mudanças climáticas, sobretudo, o aumento das temperaturas, também impactam a produtividade da agrícola (ARAGÓN; OTEIZA; RUD, 2021; BURKE; EMERICK, 2016; CHEN; GONG, 2021; MENDELSON; NORDHAUS; SHAW, 1994; SANGHI; MENDELSON, 2008; SCHLENKER; HANEMANN; FISHER, 2006). A seguir, a Tabela 4 traz os

efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre o valor da produtividade agrícola tanto para 2006 quanto para 2017. Os coeficientes relacionados à quantidade de dias em que a temperatura média horária acumulada ultrapassou 33 °C são significativos a 1%.

A Tabela 4 mostra que o aumento de um dia de exposição cumulativa de temperaturas acima de 33 °C, em 2006, reduz o valor da produção agrícola em 15,8% (coluna I); quando se adiciona a quantidade acumulada de dias com temperaturas médias horárias abaixo de 10 °C (coluna III), esse impacto é um pouco menor, 15,5%; no modelo de referência, o efeito negativo cai para 13,1% (coluna V). Em 2017, os efeitos também são negativos, um dia adicional de exposição cumulativa de temperaturas acima de 33 °C reduz os a produtividade agrícola anual em 6,9% (coluna II); considerando o acúmulo abaixo de 10 °C (coluna IV), a redução é de 6,5%; no modelo com adição de demais controles climáticos, o valor da produtividade da agricultura cai ainda mais para 11,5% (coluna VI).

Tabela 4 - Impactos da temperatura no valor da produção agrícola do Centro-Oeste, com controles climáticos

Variáveis	Ano					
	2006 I	2017 II	2006 III	2017 IV	2006 V	2017 VI
Temp. Máx >33	-0,158*** (0,0126)	-0,0690*** (0,0123)	-0,155*** (0,0127)	-0,0649*** (0,0132)	-0,131*** (0,0294)	-0,115*** (0,0239)
Temp. Min <10			0,233*** (0,0646)	0,151** (0,0701)	0,123* (0,0741)	0,212* (0,110)
Radiação					0,00377*** (0,000941)	0,00617*** (0,00112)
Radiação2					-4,57e-07*** (1,01e-07)	-5,66e-07*** (1,13e-07)
Umidade					-2,392 (1,457)	-0,591 (2,323)
Umidade2					0,0558 (0,0402)	0,0188 (0,0621)
Vento v					-1,509 (0,970)	-4,674*** (1,133)
Vento v2					-2,751*** (0,737)	-1,908** (0,784)
Vento h					1,674** (0,824)	4,458*** (1,038)
Vento h2					1,364*** (0,352)	0,228 (0,330)
Precipitação					3,060** (1,444)	945,1 (1,784)
Precipitação2					-969,941** (454,013)	-507,997 (564,980)
Constante	-1,873*** (0,108)	0,184 (0,224)	-1,931*** (0,112)	0,0666 (0,253)	14,51 (12,67)	-8,674 (20,71)
Observações	466	466	466	466	466	466
R-quadrado	0,230	0,072	0,238	0,077	0,319	0,223
Teste F	157,99	31,18	91,36	28,42	25,23	21,25
Prob > F	0,0000	0,3470	0,0000	0,0000	0,0000	↓

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em parênteses erro padrão robusto.

*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Os resultados da Tabela 4 confirmam aquilo pressuposto na hipótese 2, que temperaturas extremas afetam, negativamente, o valor da produção agrícola. Mendelsohn e Dinar (1999) e Medelsohn (2009) já apontavam para os possíveis danos causados por essas temperaturas na produtividade do setor agrícola. Sanghi *et al.* (1997) destacaram que a produção da agricultura da região Centro-Oeste é a mais afetada pelo aumento de temperatura, o que é reforçado pelas estimativas dispostas na Tabela 4. Projeções feitas por Assunção e Chein (2016), para o período de 2030 a 2049, apontam para perdas médias de 28,3% no valor bruto da produção agrícola do Centro-Oeste. Ainda que com *proxies* para temperaturas extremas distintas, esses resultados corroboram com os que foram encontrados nesta pesquisa.

Conforme os resultados encontrados nas tabelas 3 e 4, verifica-se que em todos os modelos estimados, os efeitos negativos das temperaturas extremas são maiores sobre a produtividade agrícola do que sobre a PTF, como supõe a hipótese 3 e como encontrado por Chen e Gong (2021). Em conjunto, esses resultados mostram que a produtividade total da agricultura da região Centro-Oeste, não só via valor da produção, mas também por meio da PTF, responde de forma negativa a exposição de temperaturas acima de 33 °C. Como teste de robustez, o modelo de referência adotado neste estudo foi estimado, considerando outros valores de temperaturas para o limite superior, 34 °C e 35 °C. Essas estimativas estão dispostas no Apêndice desta pesquisa (tabelas A.1 e A.2). Tanto para PTF quanto para o valor da produção agrícola, em ambos os anos, o efeito negativo sobre essas variáveis prevaleceu e aumentou conforme se mudava o limite de temperatura. Em 2006, o efeito negativo das temperaturas extremas sobre a PTF foi de 1,84% (acúmulo acima de 34 °C) para 5,41% (acúmulo acima de 35 °C); enquanto em 2017, foi de 0,61% para 0,74%. No valor da produção, em 2006, o efeito redutor foi de 18,4% para 33,8%; em 2017 de 14,2% para 16,7%, quando o limite de temperatura foi de 34 °C para 35 °C. Esses resultados reforçam os efeitos negativos que as temperaturas extremas possuem sobre a PTF e a produtividade agrícola dos municípios da região Centro-Oeste.

5. Considerações finais

As intensas transformações climáticas têm impactado negativamente diversos setores da economia, em especial, o segmento da agricultura. Nesse sentido, o presente estudo objetivou mensurar os efeitos da incidência de temperaturas extremas sobre a produtividade total dos fatores e sobre o valor da produção agrícola para os municípios da região Centro-Oeste do Brasil nos anos de 2006 e de 2017. Para tanto, utilizou-se variáveis agrícolas e climáticas georreferenciadas de cada município para as estimativas dos modelos econométricos.

Os principais resultados obtidos mostram que o aumento de um dia de exposição acumulada a temperaturas médias horárias superiores a 33 °C no ano leva a uma redução da PTF em 1,96% e em 0,45% e a uma redução da produtividade agrícola em 13,1% e em 11,5% nos anos de 2006 e de 2017, respectivamente. Verificou-se que as perdas são maiores para o valor da produção do que para PTF agrícola. Em conjunto, esses resultados confirmam as três hipóteses aqui pré-estabelecidas.

As análises até então realizadas para o Brasil apenas mensuram os efeitos climáticos sobre a produtividade agrícola. Contudo, não abordam de que forma a PTF é afetada. Este estudo cobre essa lacuna ao mensurar os impactos que a incidência de temperaturas extremas possui sobre a PTF agrícola. Além disso, os dados climáticos utilizados são mais precisos do que aqueles empregados nos estudos aqui referenciados, já que são georreferenciados. Isso confere uma maior solidez às estimativas encontradas nesta pesquisa.

Os resultados deste estudo apontam para dois possíveis caminhos para mitigar os efeitos negativos das temperaturas extremas sobre a PTF e sobre a produtividade agrícola. Em primeiro lugar, deve-se atuar no sentido de conter o aumento da frequência de temperaturas extremas, por meio de políticas de redução de emissões de gases do efeito estufa, de fortalecimento da legislação e fiscalização no que diz respeito ao controle do desmatamento ilegal e de incentivo ao desenvolvimento de uma economia ambientalmente sustentável. Em segundo lugar, sugere-se políticas que visem reduzir as perdas agrícolas, tais como maiores investimentos em ciência e tecnologia, sempre observando as boas práticas ambientais.

Por fim, ressalta-se algumas limitações desta pesquisa. A primeira delas diz respeito à estrutura dos dados (*cross-section*) que não permite o controle de efeitos fixos, apenas variações transversais. Pesquisas futuras podem direcionar esforços para decompor as perdas de produtividade sobre os diferentes tipos de cultivo. Ademais, aplicações podem ser feitas para outras regiões com perfil agrícola.

Referências

- AIGNER, Dennis; LOVELL, C. A.Knox; SCHMIDT, Peter. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, v. 6, n. 1, p. 21–37, 1 jul. 1977.
- ALMEIDA, Josefa Morgana Viturino. *Índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas na*

região Centro-Oeste do Brasil. 2012. 309 f. Universidade Federal de Campina Grande, 2012. Disponível em: <<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5224/1/UPS-QT03885.pdf>>.

ARAGÓN, Fernando M.; OTEIZA, Francisco; RUD, Juan Pablo. Climate Change and Agriculture: Subsistence Farmers' Response to Extreme Heat. *American Economic Journal: Economic Policy*, v. 13, n. 1, p. 1–35, 1 fev. 2021.

ASSUNÇÃO, Juliano; CHEIN, Flávia. Climate change and agricultural productivity in Brazil: Future perspectives. *Environment and Development Economics*, v. 21, n. 5, p. 581–602, 2016.

BASKERVILLE, G. L.; EMIN, P. Rapid Estimation of Heat Accumulation from Maximum and Minimum Temperatures. *Ecology*, v. 50, n. 3, p. 514–517, 1 maio 1969. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2307/1933912>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

BURKE, Marshall; EMERICK, Kyle. Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, v. 8, n. 3, p. 106–40, 1 ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1257/pol.20130025>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

CCKP. *Brazil - Climatology | Climate Change Knowledge Portal*. Disponível em: <<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/brazil/climate-data-historical>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

CHEN, Shuai; GONG, Binlei. Response and adaptation of agriculture to climate change: Evidence from China. *Journal of Development Economics*, v. 148, p. 102557, 1 jan. 2021.

CHEIN, Flávia. Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas. 2019.

COPERNICUS. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

CUADRA, Santiago Vianna *et al.* Mudanças climáticas e a agropecuária brasileira. In: CUADRA, SANTIAGO V. *et al.* (Org.). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

DAI, Shengpei *et al.* The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in Southern China from 1960 to 2011. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, v. 69, n. 5, p. 650–660, 1 maio 2014.

DELL, Melissa; JONES, Benjamin F.; OLKEN, Benjamin A. What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature. *Journal of Economic Literature*, v. 52, n. 3, p. 740–98, 1 set. 2014.

FAO. Global Forest Resources Assessment 2010: Brazil Country Report. . Rome: [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/al464E/al464E.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

GONG, Binlei. Agricultural productivity convergence in China. *China Economic Review*, v. 60, p. 101423, 2020.

IBGE. *Censo Agropecuário - 2006*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9827-censo-agropecuario.html?t=destaques>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

IBGE. *Censo Agropecuário - 2017*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html?t=destaques>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

IPCC. *Climate Change 2014. Kristin Seyboth (USA)*. Geneva: Gian-Kasper Plattner, 2015. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

IPCC. *Glossary — Global Warming of 1.5 °C*. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>>. Acesso em: 22 jul. 2022.

MARENGO, Jose Antonio; SOARES, Wagner Rodrigues. Impacto das Mudanças Climáticas no Brasil e Possíveis Futuros Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC 2001. *Clima e Recursos Hídricos 9*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA, 2003. p. 209–233. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/about/about.htm>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

MEEUSEN, Wim; VAN DEN BROECK, Julien. Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. *International Economic Review*, v. 18, n. 2, p. 435, jun. 1977.

MENDELSON, Robert. The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, v. 1, n. 1, p. 5–19, 1 jan. 2009. Disponível em:

<<https://scholarlypublishingcollective.org/psup/jnrpr/article/1/1/5/297945/The-Impact-of-Climate-Change-on-Agriculture-in>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

MENDELSON, Robert; DINAR, Ariel. Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter? *The World Bank Research Observer*, v. 14, n. 2, p. 277–293, 1 ago. 1999. Disponível em: <<https://academic.oup.com/wbro/article/14/2/277/1667924>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

MENDELSON, Robert; NORDHAUS, William D.; SHAW, Daigee. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, v. 84, n. 4, p. 753–711, 1994. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2118029>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

PITTELKOW, Cameron M. *et al.* Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature* 2014 517:7534, v. 517, n. 7534, p. 365–368, 22 out. 2014. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature13809>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

ROLTSCHEK, William J. *et al.* Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates. *International Journal of Biometeorology* 1999 42:4, v. 42, n. 4, p. 169–176, 1999. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s004840050101>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

RUTTAN, Vernon W. Productivity Growth in World Agriculture: Sources and Constraints. *Journal of Economic Perspectives*, v. 16, n. 4, p. 161–184, set. 2002.

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROppo, Juliano; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SANGHI, Apurva *et al.* Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. *Economia Aplicada*, v. 1, n. 1, p. 7–33, 5 jun. 1997. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/ecoa/article/view/145453>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SANGHI, Apurva; MENDELSON, Robert. The impacts of global warming on farmers in Brazil and India. *Global Environmental Change*, v. 18, n. 4, p. 655–665, 1 out. 2008.

SCHLENKER, Wolfram; HANEMANN, W. Michael; FISHER, Anthony C. The Impact of Global Warming on U.S. Agriculture: An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions. *The Review of Economics and Statistics*, v. 88, n. 1, p. 113–125, 1 fev. 2006. Disponível em: <<https://direct.mit.edu/rest/article/88/1/113/57606/The-Impact-of-Global-Warming-on-U-S-Agriculture-An>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SCHLENKER, Wolfram; ROBERTS, Michael J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 37, p. 15594–15598, 15 set. 2009. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.0906865106>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SOARES, Wagner R. Impacto das mudanças climáticas na região Centro-Oeste do Brasil. In: MARANDOLA JR., EDUARDO; D'ANTONA, ÁLVARO DE OLIVEIRA; OJIMA, RICARDO (Org.). *População, ambiente e desenvolvimento: mudanças climáticas e urbanização no Centro-Oeste*. Campinas: Núcleo de Estudos de População-NePo/Unicamp, 2011. p. 25–35. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228332416>>. Acesso em: 17 jul. 2022.

WANG, Xiaobing; YAMAUCHI, Futoshi; HUANG, Jikun. Rising wages, mechanization, and the substitution between capital and labor: evidence from small scale farm system in China. *Agricultural Economics*, v. 47, n. 3, p. 309–317, 1 maio 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/agec.12231>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

APÊNDICE

Tabela A.1 - Estimativas dos impactos da temperatura na PTF agrícola do Centro-Oeste, com controles climáticos

Variáveis	Ano			
	2006	2017	2006	2017
	I	II	III	IV
Temp. Máx >34	-0,1840*** (0,0511)	-0,0061* (0,0034)		
Temp. Máx >35			-0,0541*** (0,0180)	-0,0074** (0,0037)
Temp. Min<10	0,1180 (0,0745)	-0,0015 (0,0099)	0,0310** (0,0125)	0,0000 (0,0091)
Radiação	0,0038*** (0,0010)	0,0001 (0,0000)	0,0004* (0,0002)	0,0001 (0,0000)
Radiação2	-0,0000*** (0,0000)	-0,0000 (0,0000)	-0,0000** (0,0000)	-0,0000 (0,0000)
Umidade	-3,3030** -14,810	0,1920 (0,3340)	-1,3010*** (0,3030)	0,1560 (0,3160)
Umidade2	0,0778* (0,0417)	-0,0050 (0,0087)	0,0344*** (0,0085)	-0,0040 (0,0082)
Vento v	-1,6900* (0,9820)	-0,2020* (0,1030)	-0,3990** (0,1630)	-0,1950* (0,0999)
Vento v2	1,8570** (0,8370)	0,2060** (0,1050)	0,3050** (0,1480)	0,2050* (0,1040)
Vento h	-3,0840*** (0,7300)	-0,0480 (0,0799)	-0,6010*** (0,1330)	-0,0539 (0,0759)
Vento h2	1,4790*** (0,3490)	-0,0175 (0,0407)	0,2170*** (0,0660)	-0,0144 (0,0386)
Precipitação	3,5700** -14,490	0,1610* (0,0937)	0,2770 (0,2690)	0,1350 (0,0884)
Precipitação2	-1,1390** (0,4570)	-0,0529* (0,0280)	-0,1100 (0,0862)	-0,0442 (0,0268)
Constante	23,1400* -126,100	0,8790 -30,730	13,3200*** -25,450	12,170 -28,700
Observações	466	466	466	466
R-quadrado	0,308	0,047	0,184	0,047
Teste F	23,99	.	10,15	.
Prob > F	0,00	.	0,00	.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em parênteses erro padrão robusto.

*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Tabela A.2 - Estimativas dos impactos da temperatura no valor de produção agrícola do Centro-Oeste, com controles climáticos

Variáveis	Ano			
	2006	2017	2006	2017
	I	II	III	IV
Temp. Máx >34	-0,184*** (0,0511)	-0,142*** (0,0298)		
Temp. Máx >35			-0,338*** (0,0915)	-0,167*** (0,0341)
Temp. Min<10	0,118 (0,0745)	0,220** (0,110)	0,134* (0,0735)	0,256** (0,108)

Radiação	0,00383*** (0,000961)	0,00647*** (0,00112)	0,00405*** (0,000977)	0,00643*** (0,00116)
Radiação2	-4,63e-07*** (1,02e-07)	-5,98e-07*** (1,11e-07)	-4,78e-07*** (1,03e-07)	-6,01e-07*** (1,13e-07)
Umidade	-3,303** (1,481)	-1,181 (2,255)	-3,960*** (1,526)	-2,007 (2,162)
Umidade2	0,0778* (0,0417)	0,0352 (0,0604)	0,0945** (0,0432)	0,0565 (0,0586)
Vento v	-1,690* (0,982)	-4,659*** (1,136)	-1,563 (0,992)	-4,498*** (1,133)
Vento v2	-3,084*** (0,730)	-2,150*** (0,759)	-3,449*** (0,692)	-2,300*** (0,742)
Vento h	1,857** (0,837)	4,523*** (1,043)	1,794** (0,849)	4,490*** (1,050)
Vento h2	1,479*** (0,349)	0,335 (0,316)	1,609*** (0,340)	0,412 (0,304)
Precipitação	3.570** (1.449)	590,7 (1.786)	3.539** (1.437)	26,25 (1.838)
Precipitação2	-1,139e+06** (456.708)	-393,940 (566.370)	-1,119e+06** (452,133)	-207.014 (588.901)
Constante	23,14* (12,61)	-4,036 (20,10)	28,87** (12,82)	4,083 (18,79)
Observações	466	466	466	466
R-quadrado	0,308	0,222	0,309	0,219
Teste F	23,99	21,73	24,43	21,40
Prob > F	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em parênteses erro padrão robusto.

*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1