

A variabilidade climática e a produtividade da soja: uma análise para as regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil entre 2002 e 2016.

Caio H. M. S. Baptista
Luis Fernando Oliveira
Luziane Gomes
Weslem Rodrigues Faria
Fábio Rodrigues de Moura

RESUMO

A respectiva pesquisa visa verificar como a variabilidade climática afeta a produtividade da soja dos 8 principais produtores da cultura no Brasil (Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo) entre o período de 2002 a 2016. A título de testes, o modelo dinâmico foi estimado via 4 estimadores (OLS, LSDV, Difference GMM e System GMM), porém, o system GMM melhor se adequou aos dados. O system GMM apresentou resultados relevantes e estatisticamente significantes, e também apresentou efeitos positivos, mas decrescentes, dos níveis de precipitação e temperatura sobre a produtividade da soja. Além disso, foi incluída a variável de temperatura oceânica na 3.4 região do pacífico equatorial para captar o efeito do ENSO sobre a produtividade da soja. Os resultados apresentaram um resultado positivo da temperatura oceânica sobre a produtividade, indicando que, possivelmente, o El Niño tem um efeito positivo e a La Niña um efeito negativo sobre a produtividade da soja.

Palavras-chave: variabilidade climática, ENSO, soja

Abstract

The respective research aims to verify how climate variability affects soybean productivity in the 8 main producers of the crop in Brazil (Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo) among the period from 2002 to 2016. For testing purposes, the dynamic model was estimated using 4 estimators (OLS, LSDV, Difference GMM and System GMM), however, the system GMM was better suited to the data. The GMM system presented relevant and statistically significant results, and also presented positive, but decreasing, effects of precipitation and temperature levels on soybean yield. In addition, the ocean temperature variable in the 3.4 equatorial Pacific region was included to capture the effect of ENSO on soybean yield. The results showed a positive result of ocean temperature on yield, indicating that possibly El Niño has a positive effect and La Niña a negative effect on soybean yield.

Keywords: climate variability, ENSO, soybean

1. INTRODUÇÃO

O sucesso da expansão da cultura da soja, iniciou-se com os primeiros plantios na década de 1960, na região Sul, com o sucesso inicial, esta cultura veio sendo introduzida na região centro-oeste, e, assim, tornou-se a cultura líder do agronegócio brasileiro e uma impulsionadora da expansão da fronteira agrícola e do desenvolvimento regional. O grande sucesso dessa cultura no Brasil foi obra de muito trabalho duro e pesquisa nas universidades, dos órgãos de assistência técnica e do setor privado. Com esse conjunto de fatos favoráveis os agricultores brasileiros viram a oportunidade de ganhos e investiram seu tempo, esforços e recursos na expansão da cultura.

O sucesso da adaptação da soja ao ambiente tropical ofereceu as condições necessárias para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da cultura em ambientes cada vez mais complexos pelo território brasileiro. A pesquisa e o desenvolvimento de grãos cada vez mais adaptáveis aos diversos tipos de padrões climático brasileiros e as diferentes condições de pluviosidade de cada região, fez com que o grão se tornasse o carro chefe das exportações de commodities agrícolas pelo Brasil.

Internacionalmente a soja está inserida economicamente como um dos principais produtos agrícolas e no Brasil é o principal produto exportado, o sucesso da produção agrícola brasileira é devido a vários fatores, dentre os quais podem ser citados, as condições climáticas, as condições químicas e físicas do solo. Dentro desses fatores, apenas o clima é o único que os produtores rurais não podem controlar completamente, mesmo em áreas irrigadas, assim, o sucesso do empreendimento agrícola depende muito das mudanças climáticas (OLIVEIRA, 2020).

Portanto, compreender como as chuvas afetam o principal produto de exportação do Brasil, a soja, é crucial para evitar prejuízos. É necessário mencionar que a chuva é um importante evento climático para os produtores de soja. Quando as chuvas são equilibradas, as safras tem expectativa de alta produtividade. Entretanto é preciso considerar dois eventos que são: a estiagem e o excesso de precipitação (ADAMA, 2021). A estiagem ocorre quando há ausência de chuvas ou baixa incidência por um longo período, isso varia para cada região e produção, mas, as consequências vão desde a baixa produtividade até os problemas em irrigação das lavouras.

Na contramão, o excesso de chuvas é ruim para a produção de soja. Quando existe excesso de precipitação, os problemas acontecem desde a germinação das sementes, ocasionado pela embebição das sementes e à falta de oxigênio para que elas desenvolvam as plântulas. Quando o solo está extremamente úmido, a entrada de oxigênio e saída de dióxido de carbono fica limitado, por causa da baixa condutividade dos gases na água (ADAMA, 2021).

A respectiva pesquisa tem por objetivo geral analisar o efeito da variabilidade climática (temperatura e precipitação) sobre a produtividade de soja, sendo que a pesquisa terá como foco os 8 estados que possuem uma maior produção de soja no Brasil: Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, Minas Gerais e São Paulo. Além disso, é importante salientar que será utilizado o modelo dinâmico para o período de 2002 a 2016. Sendo que os objetivos específicos são: inferir o efeito da variabilidade climática sobre a produtividade da soja e analisar qual a influência da temperatura oceânica da 3.4 região do pacífico equatorial, como forma de representar a intensidade dos eventos El Niño-Southern Oscillation (ENSO) sobre a produtividade da soja.

Com base nessas premissas, este estudo está estruturado em 4 partes articuladas entre o referencial teórico, metodologia de pesquisa, resultados e conclusões. Na primeira parte do estudo, encontram-se as bases teóricas, na segunda parte foi apresentado o processo metodológico utilizado para a construção dos modelos econométricos estimados. Posteriormente, na quarta parte, apresenta-se os principais resultados encontrados pelas estimativas e na última parte são apresentadas as principais conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O fator clima

Um dos fenômenos físicos que decorrem da grande variabilidade climática é a variabilidade da precipitação pluvial, este é fator de extrema importância no controle do ciclo hidrológico e variáveis climáticas que exercem maior influência sobre a qualidade do meio ambiente. As quantidades relativas de precipitação pluvial (volume), seu regime diário ou

temporário (distribuição temporal) e os volumes de intensidade pluviométrica individuais (volume/duração) são características que irão afetar diretamente ou indiretamente a população, a produção agrícola, a economia e o meio ambiente (BRITTO; BERLATTI E MENDONÇA, 2008)

Conforme o primeiro relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014) poderão ocorrer reduções de 10% no regime das chuvas e o aumento de 1°C a 1,5°C na temperatura na região Amazônica até o ano de 2040. Entre os anos de 2041 e 2070 serão esperadas diminuições drásticas no regime de chuvas (25% a 35%) e aumento de 3°C a 3,5°C na temperatura do ar, o que ocasionará sérios impactos na agricultura regional e local.

Para a agricultura, a variabilidade do clima pode interferir no desenvolvimento dos ciclos dos plantios, grandes discrepâncias dos padrões pluviométricos de uma região de um ano para outro, podem ter seus impactos maximizados quando o agricultor não está preparado para este tipo de alteração (EMBRAPA, 2001). Ademais, Sant'Anna Neto e Zavattini (2000) chegaram à conclusão de que são as flutuações climáticas que, variando a escala temporal, poderão caracterizar uma mudança climática ou apenas uma flutuabilidade de ciclos periódicos, e estes possuirão a característica de se repetirem de períodos de tempo em tempo.

Para Camargo et al. (1974), a soja é uma cultura considerada de verão, que encontra as melhores condições para seu crescimento em climas tropicais, subtropicais e temperados, onde a temperatura média no período do verão vai variar de 21°C a 27°C. O fator hídrico impõe condições adversas a cultura, como o prolongamento da estação seca onde ocorre o processo de estiagem, dificultando a maturação e a colheita, ou uma grande pluviometria que traz excessiva umidade para o solo durante o ano todo, causando danos irreversíveis a lavoura.

2.2 A influência do clima sobre a soja no Brasil

A soja será a cultura mais afetada com a mudança climática. Chegando a perder até 41% de áreas de baixo risco para o plantio em 2070, em decorrência do aumento da deficiência hídrica, gerando um prejuízo de 14 bilhões de reais (BALBINO, 2020). A justificativa para a perda de água das plantas é dada no trabalho elaborado por Pinto e Assad (2008) onde afirmam que existe a constatação que o aumento da temperatura pode ampliar a deficiência hídrica devido a maior evapotranspiração, e desse modo, acabam por gerar maior risco para os produtores de soja.

De modo geral, a soja se adapta melhor em temperaturas entre 20°C e 30°C, sendo que a temperatura ideal para o desenvolvimento da planta está em torno de 25°C. A semeadura da soja não deve ser feita quando a temperatura estiver abaixo dos 20°C, porque a emergência e germinação da planta ficam comprometidas, sendo que 25°C a temperatura ideal para emergência rápida e uniforme. Locais com temperaturas menores ou iguais a 10°C são impróprios para o cultivo de soja, pois tanto o crescimento vegetativo quanto o desenvolvimento da soja são nulos ou pequenos, em contradição, temperaturas acima de 40°C, provocam danos à floração e diminuem a capacidade de retenção das vagens (FARIAS, 2010).

Além da temperatura outro aspecto que deve ser observado são as necessidades hídricas da cultura da soja que devem ser explicadas. A soja precisa de um total de 450 mm e 800 mm de água para completar o seu ciclo de desenvolvimento, ademais, é preciso levar em consideração outros fatores como as condições climáticas e o manejo da cultura. As fases que são consideradas críticas com relação a exigência de água são emergência, germinação, formação de vagens, floração e enchimento dos grãos. É importante salientar que a semente da soja precisa de 50% do seu peso em água para iniciar o processo de germinação, sendo mais exigente que a maioria das culturas. Menor quantidade de água durante a época da floração e o enchimento de grãos provocam mudanças fisiológicas na planta (CENTURION e GHINI, 2008).

Ademais, é importante mencionar os eventos climáticos, El Niño e La Niña, que afetam os padrões da produção agrícola no Brasil. O fenômeno climático denominado El Niño é caracterizado por um aumento da temperatura do Oceano Pacífico de aproximadamente 3°C a 5°C próximo a costa da América do Sul. Já as condições de La Niña as águas dos oceanos passam de 25°C (condição normal) para 22°C. Pensa-se que os efeitos que são produzidos pelas duas fases do ENSO acontecem apenas em uma região, mas de maneira oposta. Entretanto, a La Niña chega a afetar de 5% a 15% das áreas continentais (ALMEIDA, 2014)

Estudos buscam compreender o efeito do ENOS na produção de soja, dentre eles, pode-se citar a pesquisa de Pavan et. Al (2013) que analisaram o efeito do ENSO sobre a produção de soja no estado do Rio Grande do Sul entre as safras de 1991 a 2010. Onde utilizaram uma série histórica de dados de produtividade da soja e concluíram que em anos que ocorreu o El Niño houve um aumento da produtividade da soja quando comparado a La Niña e a anos neutros.

Para as lavouras dos Estados do Sul do Brasil (RS, SC e PR) e também Mato Grosso do Sul, o principal risco para a produção de soja, está associado a falta de chuva. Os maiores riscos de escassez ocorrem nos anos da La Niña, nos anos neutros (sem El Niño ou La Niña) ocorrem estiagens regionalizadas, alternados com períodos de chuvas. Quando ocorre El Niño ocorre mais chuvas no verão e reduz o risco de estiagens severas/secas severas (CANAL RURAL, 2020).

Alguns trabalhos empíricos buscaram compreender a influência das mudanças climáticas sobre a produção de diferentes culturas, como exemplo, tem-se a pesquisa realizada por Moraes (2010) onde esse estudou o impacto econômico de cenários de mudança climática para a agricultura brasileira. A pesquisa foi realizada com oito culturas que seriam: feijão, milho, soja, algodão, arroz, cana de açúcar, mandioca e café, os dados foram analisados através do modelo de Equilíbrio Geral Computável, o The Enormous Regional Model for Brazil (TERM – BR), e Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e concluiu que os efeitos negativos das mudanças climáticas se concentravam na região Nordeste, como consequência ao clima semiárido.

Ademais, Oliveira (2016) também elaborou um estudo que visava o acompanhamento das mudanças climáticas sobre a produção de soja. O objetivo do estudo foi investigar o comportamento dos custos de produção da soja em relação aos fatores climáticos nas principais produtoras do Brasil entre os anos de 2005 e 2015. Foi analisado a temperatura, fotoperíodo e disponibilidade hídrica e dentre as principais conclusões foi constatado que o aumento de chuvas aumentou os custos de produção com operação de máquinas, sementes, fertilizantes, agrotóxicos e mão de obra permanente. Os métodos utilizados para a realização das estimativas foi correlação linear simples e regressão linear múltipla.

3. METODOLOGIA

3.1 Objeto de estudo

Conforme visto anteriormente, o clima (precipitação e temperatura) exerce um papel fundamental para o cultivo da soja, que se estende desde o plantio até a colheita. Durante todo o ciclo, a cultura necessita entre 550 mm a 800mm de água e uma temperatura variando entre 20°C a 30°C para atingir uma produtividade ótima. Porém, durante o cultivo da soja existem dois períodos chave para a exigência hídrica: a semeadura (emergência) e durante o enchimento dos grãos (EMBRAPA, 2021).

Em um primeiro momento, a umidade do solo é extremamente importante no período da realização do semeio, em que a soja é uma das culturas que mais exige umidade para germinar, absorvendo cerca de 50% a 55% do seu peso em água, da mesma forma, a temperatura

também é um fator crucial para a germinação da soja, sendo seu nível ideal em torno de 25 °C, a necessidade hídrica da cultura é progressiva durante todo o ciclo, sendo que atinge seu máximo durante o período de floração-enchimento dos grãos (7 a 8 mm /dia), e decrescendo após essa fase (EMBRAPA, 2021).

3.2 Dados e modelo econométrico

Duas vertentes da literatura econômica buscam, de forma distinta, analisar o efeito das mudanças climáticas sobre a produção agrícola. A primeira vertente, que é mais tradicional, assume uma função de produção subjacente e estima os impactos variando uma ou algumas variáveis de entrada, como temperatura, precipitação e dióxido de carbono (Callaway *et al.*, 1982; Burke e Emerick, 2016). Segundo Mandelsohn (1994) essa abordagem fornece uma linha de base útil para estimar o impacto das mudanças climáticas na agricultura, porém, esses estudos têm um viés inerente e tendem a superestimar os dados. Esse viés é intitulado como “cenário de dumbfarmer” e sugere que esses modelos omitem uma variedade de adaptações que os agricultores podem adotar em resposta as mudanças econômicas e ambientais.

A segunda vertente surge com o intuito de sanar esse viés de adaptação, utilizando dados econômicos do valor da terra. Essa abordagem é chamada de Ricardiana, no qual ao invés de estudar produtos de culturas específicas, avalia como as mudanças climáticas em diferentes locais afetam a renda líquida ou valor da propriedade rural. Ao analisar diretamente os preços ou receitas das propriedades rurais é possível avaliar os impactos diretos do clima no produto das culturas, como também a substituição indireta de insumos, introdução de atividades, e outras adaptações para diferentes climas (MANDELSON, 1994).

Outras estratégias surgem dentro da abordagem de função de produção para tentar incluir e modelar as possíveis adaptações adotadas pelos empresários rurais. Por exemplo, Burke e Emerick (2016) incluem a adaptação por meio da modelagem do problema de decisão dos fazendeiros entre duas culturas, uma com desempenho melhor em climas mais frios e outra com desempenho melhor em climas mais quentes, a decisão de produção dos fazendeiros em determinado período depende de sua informação a respeito da mudança média de temperatura em um período anterior.

A indisponibilidade de dados é uma outra limitação dos modelos de função de produção, o que pode impossibilitar o controle de variáveis importantes, como trabalho e capital, na determinação da produtividade. Com o intuito de sanar essa limitação, Ceballos-Sierra e Dell’Erba (2021) adotaram uma modelagem dinâmica da função de produção de café para a Colômbia, incluindo variáveis climáticas como precipitação, temperatura e suas versões quadráticas, além de incluir o nível de produtividade do período anterior, o que resolve o problema da heterogeneidade não observada, mas, por outro lado, não capta a sensibilidade às mudanças adaptativas que podem ser adotadas pelos fazendeiros frente as mudanças climáticas.

Em um primeiro momento, optou-se por adotar a metodologia dinâmica para avaliar qual o efeito das mudanças climáticas sobre os níveis de produtividade da soja nos 8 principais estados produtores do Brasil entre o período de 2002 a 2016. Um ponto forte dessa metodologia é a possibilidade de tratarmos o viés de variável omitida, mas, por outro lado, o modelo não possibilita tratar o viés proveniente das mudanças adaptativas.

Os dados de produtividade da soja (razão toneladas e área plantada) foram coletados no IBGE-SIDRA em nível municipal. As variáveis climáticas, precipitação média anual em milímetros e temperatura média anual em graus Celsius foram extraídas das estações da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e pela indisponibilidade de dados para todos os municípios da amostra em todos os períodos de tempo foi aplicado um método de interpolação estatística.

A partir dos dados coletados foram gerados quatro modelos econométricos, à título de

testes, com o objetivo de entender qual a relação entre as mudanças climáticas e a produtividade da soja: *Ordinary Least Squares (OLS)*, *Least Squares Dummy Variables (LSDV)*, *Difference GMM* e *System GMM*. A especificação do modelo estimado é mostrada abaixo:

$$Prod_{it} = Prod_{it-1} + temp_{it} + temp_{it}^2 + chuva_{it} + chuva_{it}^2 + chuva_{it} \cdot temp_{it} + temp_{it-1} + temp_{it-1}^2 + chuva_{it-1} + chuva_{it-1}^2 + chuva_{it-1} \cdot temp_{it-1} + ocean_t + c_i + \mu_t \quad (1)$$

Onde $Prod_{it}$ é a produtividade da soja no município i no ano t , $Prod_{it-1}$ é a produtividade da soja do ano anterior, $temp_{it}$ é a temperatura média em graus Celsius no município i no ano t , $chuva_{it}$ é o nível de precipitação do município i no ano t , também foram incluídas as formas quadráticas de $temp_{it}$ e $chuva_{it}$, e um termo de interação entre elas. Além disso, como o plantio da soja ocorre subjetivamente em outubro, novembro ou dezembro e sua colheita por volta de fevereiro, março ou abril, foram incluídas as defasagens temporais das variáveis climáticas com o intuito de captar o efeito da variabilidade climática do ano anterior sobre a safra do ano atual.

Conforme mencionado anteriormente, é de extrema importância que o El Niño-Southern Oscillation (ENSO) seja controlado no modelo, a estratégia adotada foi incluir a variável $ocean_t$ que representa a temperatura do oceano na 3.4 região do pacífico equatorial com o objetivo de captar o efeito dos eventos sobre a produtividade da soja nos oito maiores estados produtores das regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil. Caso a temperatura da superfície do oceano pacífico da 3.4 região seja maior do que 0.5°C durante 5 meses consecutivos, esse período é classificado como um evento El Niño, e quanto maior a temperatura acima desse limite, maiores os níveis de temperatura e precipitação nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, em decorrência disto, presume-se que haja maiores níveis de produtividade da soja. Por outro lado, caso a temperatura oceânica exceda o limite de -0.5°C durante 5 meses consecutivos, o período é classificado como um evento La Niña, ademais, quanto menor a temperatura oceânica abaixo desse limite, maior a intensidade do evento, e como consequência, menores os níveis de temperatura e precipitação nas regiões, ocasionando possivelmente menores níveis da produtividade de soja. A variável $ocean_t$ é a temperatura do oceano em graus Celsius. Por fim, as variáveis c_i e μ_t são os efeitos fixos de localidade e tempo, respectivamente.

A principal hipótese adotada no modelo dinâmico em painel é que a heterogeneidade não observada presente no erro não seja correlacionada ao longo do tempo para cada unidade *cross-section*. Nesse caso, devemos assumir que um choque na produtividade, que não esteja sendo captado pelo modelo, em determinado período do tempo, não esteja correlacionado com quaisquer choques, não captados, que ocorram em outros períodos de tempo.

4. RESULTADOS

O modelo 1, descrito na sessão anterior, foi estimado por meio dos quatro estimadores propostos com o propósito de analisar mais profundamente a relação entre a variabilidade climática e a produtividade da cultura da soja. Primeiramente, a tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo.

Tabela 1 – Estatísticas Descritivas

	Desvio Padrão	Média	Mediana	Min	Max	Classificação
Chuva	3.324	12.479	12.248	4.916	30.857	Milímetros
Temp.	2.812	23.746	23.920	12.129	31.371	Graus Celsius
Soja	1.270	0.865	0.000	0.000	12.000	Toneladas/hectares

						Graus Celsius da temperatura
Oceano	0.968	0.090	-0.040	-1.501	2.286	oceânica

Fonte: Elaboração própria

Com base nas estatísticas acima, é possível observar uma média anual de 1200 milímetros de precipitação e uma média anual de 23.7°C para os municípios da amostra. Além disso, o nível de precipitação municipal anual apresenta um desvio-padrão de 332 milímetros e a temperatura média municipal um desvio-padrão de 2.8°C na amostra utilizada, indicando uma determinada heterogeneidade no que tange as variáveis climáticas. A produtividade da soja apresenta uma média anual de 800kg de soja por hectare plantado, e um desvio-padrão de 1200kg por hectare, porém, essa grande variabilidade da produtividade é devida ao grande número de municípios com produção zero em um ou mais dos anos do período de análise. A temperatura da superfície do oceano pacífico na 3.4 região apresentou uma média anual de aproximadamente 0.10°C e um desvio-padrão de 0.96, indicando um nível médio neutro e com desvio-padrão de quase 1°C.

O modelo foi estimado via 4 estimadores com o propósito de entender como os coeficientes estão se comportando diante de diferentes estratégias empíricas. A maioria dos coeficientes estimados via OLS apresentam significância estatística, com exceção dos coeficientes das variáveis de precipitação defasadas temporalmente, além do mais, é possível observar que os coeficientes apresentam resultados intuitivos, de forma que o coeficiente do *lag* da produtividade apresenta um resultado positivo e dentro do intervalo 0 e 1, demonstrando um efeito de convergência para o nível de produtividade de equilíbrio. Os coeficientes de interesse, também apresentaram resultados relevantes, de forma que os níveis de precipitação e temperatura mostraram efeitos positivos, mas decrescentes, sobre a produtividade da soja.

Tabela 2 – Estimações do modelo (1)

Variáveis	OLS	LSDV	Diff GMM	System GMM
(Lag da) Prod. Soja	0.8649*** [0.0018]	0.4129*** [0.0034]	0.2973*** [0.0096]	0.4929*** [0.0282]
Chuva	0.2775*** [0.0119]	0.1937*** [0.0131]	0.1496*** [0.0123]	0.6223*** [0.0306]
Chuva ao quadrado	-0.0012*** [0.0001]	0.00003 [0.0001]	0.0004*** [0.0001]	-0.0048*** [0.0003]
(Lag da) Chuva	0.0158 [0.0117]	0.0158 [0.0128]	0.0559*** [0.0138]	0.3450*** [0.0293]
(Lag da) Chuva ao quadrado	-0.0018 [0.0001]	-0.0004** [0.0001]	-0.0005*** [0.0001]	-0.0049*** [0.0003]
Temperatura	0.0819** [0.0344]	-0.1657*** [0.0360]	-0.1649*** [0.0433]	0.5522*** [0.0554]
Temperatura ao quadrado	-0.0013* [0.0007]	0.0028*** [0.0007]	0.0029*** [0.0009]	-0.0084*** [0.0010]
(Lag da) Temperatura	0.2747*** [0.0349]	0.0997*** [0.0339]	0.2908*** [0.0374]	0.7054*** [0.0569]
(Lag da) Temperatura ao quadrado	-0.0042*** [0.0007]	-0.0013* [0.0006]	-0.0056*** [0.0007]	-0.0116*** [0.0010]
Chuva X Temperatura	-0.0092*** [0.0004]	-0.0071*** [0.0004]	-0.006*** [0.0004]	-0.0181*** [0.0008]
(Lag da) Chuva x Temperatura	0.0018*** [0.0004]	0.0006 [0.0004]	-0.0019*** [0.0004]	-0.0068*** [0.0008]

Temp. Oceano	0.2007*** [0.0135]	0.1455*** [0.0125]	0.0470*** [0.0114]	0.1603*** [0.0125]
Observações	77,798	77,798	72,241	77,798
R	0.81	0.72	0.64	0.75
Hansen Test			6799.74	1.15
P-value			0	0.283
Sargan Test			1411.47	1.3
P-value			0	0.254
AR (1), p-value			0	0
AR(2), p-value			0	0.349

Fonte: Elaboração própria

Notas:

1. Os asteriscos denotam o nível de significância: * 10%; ** 5%; *** 1%.

2. R^2 é o coeficiente de correlação quadrado e é estimado como a correlação entre o valor previsto e observado da variável dependente ($Corr(\hat{y}, y)^2$), é semelhante ao R^2 nos estimadores de máxima verossimilhança e é convencionalmente estimado nos modelos GMM.

Porém, há um problema em estimar o modelo de interesse (1) via OLS, pelo fato de que a variável dependente *lag* da produtividade $Prod_{it-1}$ é correlacionada com o efeito fixo presente no erro, o que gera um viés no painel dinâmico. Por exemplo, suponhamos que haja um choque negativo não explicado na produtividade da soja em 2010, e esse choque apareça no termo de erro. Tudo o mais constante, o efeito fixo para aquele município para o período 2002-2016 será menor, ou seja, o desvio da produtividade média não explicada da média amostral será menor. Dado isso, em 2011 tanto o *lag* da produtividade quanto o efeito fixo serão menores, de forma que existe uma correlação positiva entre o componente fixo do erro e a variável explicativa, violando o principal pressuposto para estimar consistentemente OLS (Roodman, 2009).

Uma primeira estratégia adotada, com o intuito de tratar essa endogeneidade, foi retirar os efeitos fixos de dentro do termo de erro, colocando *dummies* para cada município. Esse estimador é conhecido como Least-Squares Dummy Variables (LSDV). Mas essa transformação *within-group* ainda não elimina o viés do painel dinâmico (Nickell, 1981; Bond, 2002), de modo que o erro e o *lag* da produtividade ainda se movem juntos por compreenderem um termo em comum.

Por outro lado, o coeficiente do *lag* da produtividade estimado via LSDV é viesado pra baixo, pois há uma correlação negativa entre o termo de erro e a variável dependente atrasada, ao contrário do que ocorre quando estimado via OLS. Dessa forma, espera-se que o coeficiente seja menor do que o coeficiente estimado via OLS (Roodman, 2009). Os coeficientes dos estimadores foram 0.86 e 0.41 para OLS e LSDV, respectivamente, apresentando os resultados esperados e seguindo a literatura. Com isso, espera-se que boas estimativas do verdadeiro parâmetro estejam dentro desse intervalo.

Alternativamente, o método difference GMM é uma estratégia empírica usual na literatura e foi proposta inicialmente por Arellano e Bond (1991) para resolver o viés do painel dinâmico. O difference GMM propõe utilizar um modelo dinâmico em primeiras diferenças para excluir o efeito fixo do modelo c_i , contudo, a variável *lag* da produtividade ainda permanece endógena, pois $\Delta y_{t-1} = y_{t-1} - y_{t-2}$ ainda é correlacionado com o termo de erro diferenciado $v_t = v_t - v_{t-1}$, pelo fato de y_{t-1} e v_{t-1} serem correlacionados. Porém, defasagens mais longas do que a de segunda ordem podem ser utilizadas como bons instrumentos.

Os resultados mostraram coeficientes significativos estatisticamente, mas com resultados divergentes do esperado, em que o *lag* da produtividade apresentou um coeficiente fora do intervalo 0.41 e 0.86. Além disso, os coeficientes das variáveis chuva ao quadrado, temperatura e temperatura ao quadrado mostraram resultados distintos dos outros modelos, indicando um efeito positivo e crescente da chuva sobre a produtividade da soja e um efeito negativo e crescente da temperatura sobre a produtividade da soja, o que não condiz com a literatura e com as exigências hídricas e térmicas da cultura da soja. O teste de autocorrelação serial dos resíduos também indica uma

correlação serial a partir da segunda defasagem, sendo que (AR (2), p-valor = 0), rejeitando a hipótese nula de não autocorrelação de segunda ordem. Outra evidência da má definição do difference GMM são os testes de Hansen e Sargan que apresentaram valores de 6799.74 e 1411.47, respectivamente, indicando uma rejeição da hipótese nula de exogeneidade dos instrumentos utilizados.

Com intuito de alcançar maior eficiência, Blundell e Bond (1998) e Arellano e Bover (1995) desenvolveram o estimador system GMM, que tem uma abordagem distinta do difference GMM. O estimador system GMM utiliza o modelo em nível, porém, os instrumentos são utilizados em diferenças para torna-los exógenos aos efeitos fixos. Todos os coeficientes estimados via system GMM apresentaram significância estatística a 1% de significância. O *lag* da produtividade apresentou um coeficiente 0.49 que está dentro do intervalo dos coeficientes estimados via OLS e LSDV, 0.41 e 0.86, respectivamente, mostrando indícios de boa definição.

Os coeficientes das variáveis climáticas, chuva e temperatura, apresentaram efeitos positivos e decrescentes sobre a produtividade da soja, o que condiz com os resultados esperados. Além de que, o teste de autocorrelação serial dos resíduos de segunda ordem mostrou que (AR (2), p-valor = 0.349), indicando uma não rejeição da hipótese nula de que os resíduos de segunda ordem não são serialmente auto correlacionados. E por fim, os testes de Hansen e Sargan mostraram resultados ambos dentro do intervalo de confiança, indicando a não rejeição da hipótese nula de exogeneidade dos instrumentos.

O coeficiente que representa os eventos climáticos ENSO apresentou um sinal positivo, de forma que quanto maior a temperatura do oceano na 3.4 região do pacífico, maior a produtividade da soja nas regiões de análise, e quanto menor a temperatura do oceano, menor a produtividade da soja. Essa relação positiva é importante, pois indica que em períodos (outubro a abril) de alta temperatura do oceano na 3.4 região do pacífico há uma maior produtividade da soja no ano de colheita, e em períodos de baixa temperatura oceânica há uma menor produtividade. Os períodos em que a temperatura excede o limite de 0.5°C e -0.5°C são determinados como períodos de El Niño e La Niña, respectivamente, dessa forma, espera-se que períodos de alta temperatura oceânica, e de possivelmente El Niño, sejam acompanhados de períodos de altos níveis de temperatura e precipitação nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, ocasionando uma maior produtividade da cultura da soja. Por outro lado, em períodos de baixa temperatura oceânica, e possivelmente de La Niña, sejam acompanhados de menores níveis de temperatura e precipitação nas regiões de análise, levando a uma menor produtividade da soja.

Dada a boa definição do modelo system GMM, foram calculados os efeitos marginais médios (AME) para as variáveis de interesse, chuva e temperatura, e plotados abaixo. Também foram calculados os efeitos marginais da chuva em valores representativos da chuva, com o objetivo de observar como a chuva afeta a produtividade da soja em localidades com níveis de precipitação menores e maiores do que a média da amostra.

Os resultados abaixo indicam que um aumento de 10% no nível de precipitação proporciona um aumento de 1.3% na produtividade da soja, o que mostra um efeito relevante dos níveis de precipitação sobre a produtividade da cultura. Por meio dos efeitos marginais da chuva em valores representativos da chuva, foi possível observar um efeito decrescente da chuva sobre a produtividade nos níveis de chuva, ou seja, municípios que possuem um menor padrão de precipitação recebem um maior efeito em sua produtividade de soja decorrente de um aumento nos níveis de precipitação, e por outro lado, municípios com altos níveis de precipitação recebem um menor efeito. Evidenciando, novamente, que a cultura da soja exige níveis ótimos de precipitação.

Tabela 3 – Efeitos Marginais Médios e Representativos

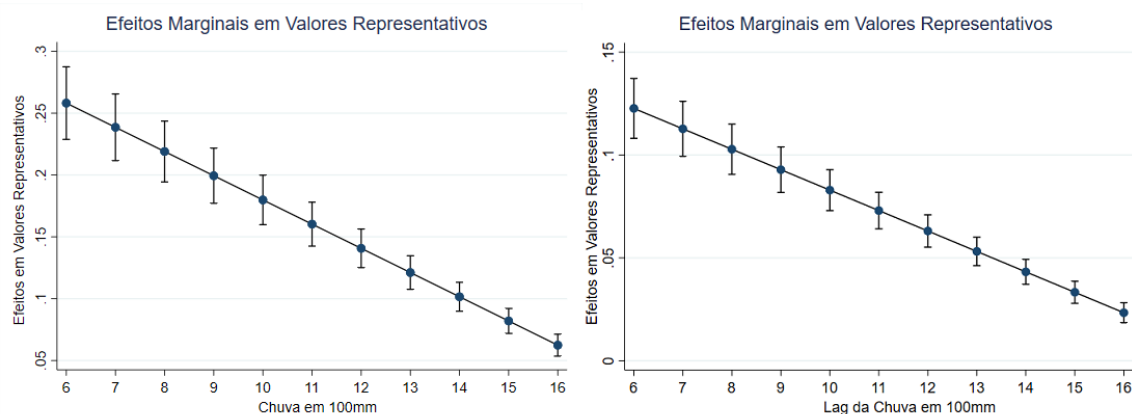
	System GMM dy/dx
Chuva	0.1312***
Lag da Chuva	0.0578***
Temp	(-0.0074)***
Lag da Temp	0.0674***
Temp. Oceano	0.1603***
<hr/>	
Chuva cond.	
Chuva	
600mm	0.258123
700mm	0.2385533
800mm	0.2189836
900mm	0.1994139
1000mm	0.1798441
1100mm	0.1602744
1200mm	0.1407047
1300mm	0.121135
1400mm	0.1015652
1500mm	0.0819955
1600mm	0.0624258

Fonte: Elaboração própria

Notas:

1. Os asteriscos denotam o nível de significância: * 10%; ** 5%; *** 1%.

Figura 1 – Efeitos Marginais dos níveis de chuva e do lag da chuva em valores representativos dos níveis de chuva.

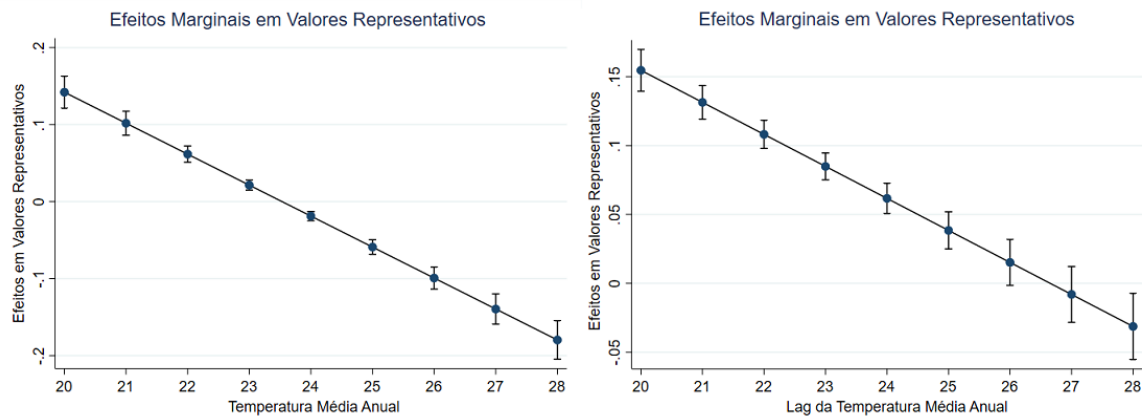


Fonte: Elaboração própria

Por outro lado, o efeito da temperatura média anual sobre a produtividade é pouco relevante, mostrando que um aumento em 10% na temperatura média anual proporciona uma queda da produtividade da cultura da soja em 0.07%, evidenciando um efeito marginal médio negativo da temperatura sobre a produtividade da soja, pelo gráfico abaixo é possível observar que o efeito marginal em valores representativos se torna negativo a partir do nível de temperatura de 24°C, de forma que temperaturas muito altas na segunda metade do período de safra não são benéficas para a produtividade da soja. Já na primeira metade do período de safra a temperatura apresentou um efeito marginal médio positivo sobre a produtividade da cultura, em que um aumento em 10% da

temperatura média anual ocasiona um aumento de 0,6% na produtividade da soja. Porém, dado os baixos valores apresentados pelos coeficientes, é possível observar um efeito mais tímido da temperatura sobre a produtividade, além disso, cabe ressaltar que na prática um aumento em 10% na temperatura média anual a curto prazo é um evento pouco provável, dada a sua baixa variabilidade.

Figura 2 – Efeitos Marginais dos níveis de temperatura e do *lag* da temperatura em valores representativos dos níveis de temperatura.



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, o efeito marginal médio da temperatura do oceano pacífico na 3.4 região apresentou sinal bastante relevante e estatisticamente significativo, indicando que um aumento da temperatura do oceano, e conseqüentemente uma intensificação do evento El Niño, possibilita maiores níveis de precipitação e temperatura nas regiões de análise, que são fatores importantes para uma maior produtividade da soja. E por outro lado, uma menor temperatura do oceano gera uma maior intensificação do evento La Niña, levando a menores níveis de precipitação e temperatura nas regiões de análise, ocasionando uma menor produtividade da cultura.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar qual o efeito da variabilidade climática sobre a produtividade da soja nos 8 maiores estados produtores do Brasil. Duas vertentes teóricas buscam analisar qual a relação entre as mudanças climáticas e a produtividade agrícola na literatura econômica recente, a Ricardiana e a de função de produção. Pelo fato do objeto de estudo ser uma cultura em específico, optou-se por utilizar a abordagem de função de produção, pois melhor se adequa nesse caso.

Pela indisponibilidade de dados sobre variáveis que determinam os níveis de produtividade agrícola dos municípios, como níveis de capital e trabalho, optou-se por utilizar um método dinâmico que utiliza a variável dependente atrasada em um período como variável dependente e instrumentaliza-a com a própria variável dependente de segunda ordem. O modelo foi estimado via system GMM e apresentou resultados relevantes e estatisticamente significantes, que indicaram efeitos positivos, mas decrescentes, dos níveis de precipitação e temperatura sobre a produtividade da cultura da soja.

Outro fator importante foi a inclusão da variável de temperatura oceânica na 3.4 região do pacífico equatorial, que representa a intensidade dos eventos climáticos ENSO, esses eventos exercem grande influência em todo regime climático da América do Sul. Uma limitação do modelo foi a impossibilidade de incluir as variáveis *dummies* que representam a determinação dos eventos El Niño e La Niña devido a colinearidade apresentada, porém, alternativamente, a variável de temperatura oceânica foi incluída com o intuito de possibilitar a análise do efeito da intensidade dos eventos ENSO sobre a produtividade da soja nas regiões de análise. Os resultados foram relevantes e indicaram que há uma relação positiva entre a temperatura oceânica e a produtividade da soja nos oito maiores estados produtores da cultura no Brasil, ambos localizados nas regiões sul, sudeste e centro-oeste.

Contudo, essa estratégia não possibilita distinguir qual a diferença de produtividade em períodos de El Niño, La Niña e Neutral.

Além dessas duas limitações, outro grande desafio quando se trabalha com a relação entre mudanças climáticas e produtividade agrícola é o viés de “dumbfarmer”, que ocorre quando não são modeladas as possíveis adaptações dos produtores frente as mudanças climáticas ao longo do tempo, superestimando assim, o efeito das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola. Neste artigo, como foram feitas apenas estimações preliminares, não foi inclusa nenhuma estratégia empírica com o objetivo de sanar esse viés.

Ademais, os dados de precipitação e temperatura foram utilizados em um período anual, o que também pode estar influenciando os resultados, pois a soja é cultivada no Brasil entre outubro e abril, com um período de cultivo, do plantio à colheita, de 4 meses. Com o objetivo de tornar o trabalho mais robusto, um dos objetivos futuros é exatamente trabalhar com dados de precipitação e temperatura do período adequado para o cultivo no Brasil. Outro objetivo seria sanar o viés de “dumbfarmer” utilizando alguma estratégia empírica para modelar a adaptação dos produtores frente as mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ADAMA. “Chuvas na cultura da soja: entenda como elas afetam a produção”. Rio de Janeiro: **Portal ADAMA**. Disponível em: < <https://portaladama.com/chuvas-na-cultura-da-soja/> > acesso em maio de 2021.

Agência Embrapa de Informação tecnológica, 2010.

ALMEIDA, A. T. Impactos do fenômeno El Niño Oscilação Sul na variabilidade climática e seus efeitos na produtividade da cultura da cana-de- açúcar em diferentes regiões brasileiras. Dissertação (Engenharia de Sistemas Agrícolas), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo, 2014.

ARELLANO, M; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. **The review of economic studies**, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.

ARELLANO, Manuel; BOVER, Olympia. Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. **Journal of econometrics**, v. 68, n. 1, p. 29-51, 1995.

BALBINO, A. O impacto das mudanças climáticas na agricultura. São Paulo: **Agrosmart**, disponível em: < <https://agrosmart.com.br/blog/impacto-mudancas-climaticas-na-agricultura/> > acesso em maio de 2021.

BLUNDELL, R; BOND, S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. **Journal of econometrics**, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

BRITTO; BERLATA E MENDONÇA, Regionalização sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2008.

BURKE, M.; EMERICK, K. Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 8, n. 3, p. 106-40, 2016.

CALLAWAY, J.M. **An Analysis of Methods and Models for Assessing the Direct and**

CAMARGO, O.A.; RAIJ, B. van; GROHMANN, F. Fixação do fósforo avaliada pelo índice de Bache e Williams e sua correlação com outras propriedades. **Ciência e Cultura** v.26, p.681-685, 1974

CANAL RURAL. Clima: como influenciará a produção da soja no Brasil? CANAL RURAL, São Paulo, disponível em: < <https://www.canalrural.com.br/ihara/clima-como-influenciara-a-producao-da-soja-no-brasil/> > acesso em junho de 2021.

CEBALLOS-SIERRA, F.; DALL'ERBA, S. The effect of climate variability on Colombian coffee productivity: A dynamic panel model approach. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103126, 2021.

CENTURION, M.A.P.C; GHINI, R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças e o desenvolvimento da soja no Brasil. Brasília, **EMBRAPA**, 2008.

FARIAS, J.R.B; NEUMAIER, N; NEPONUCENO, A. L. *Árvore do conhecimento soja*. Brasília:

FERREIRA, D.B. “Relações entre a variabilidade da precipitação e a produtividade agrícola de soja e milho nas regiões Sul e Sudeste do Brasil”. 123 p. dissertação (mestrado em meteorologia) – INPE, São José do Campos, 2006.

Indirect Economic Impacts of CO2 Induced Environmental Changes in the Agricultural Sector of the US Economy. Pacific Northwest Laboratory, 1982.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. **The American economic review**, p. 753-771, 1994.

MORAES, G.I. Efeitos econômicos de cenários de mudança climática na agricultura brasileira: um exercício a partir de um modelo de equilíbrio geral computável. 267 pag. **Tese** (doutor em Ciências), ESALQ, Piracicaba, 2010.

Morgan, J.A.; Pataki, D.E.; Körner, C.; Clark, H.; Del Grosso, S.J.; Grünzweig, J.M.; Knapp, A.K.; Mosier, A.R.; Newton, P.C.D.; Niklaus, P.A.; Nippert, J.B.; Nowak, R.S.; Parton, W.J.;

OLIVEIRA, K.G. Efeito dos fatores climáticos no comportamento dos custos de produção da soja: um estudo nas principais cidades produtoras brasileiras no período de 2005 e 2015. 106 pag. **Dissertação** (ciências contábeis), UFU, 2016.

OLIVEIRA, L.A.E. Impactos das mudanças climáticas no risco da cultura da soja e suas implicações no seguro agrícola. **Dissertação** (Escola de economia de São Paulo), FGV, São Paulo, 2020.

Oliveira, L.J.C.. Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no Estado de Minas Gerais. **Dissertação** de Mestrado em Meteorologia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 67pp, 2007

PAVAN, M et.al. Influência do fenômeno ENOS na produtividade da cultura da soja de 1990 a 2010 no Estado do Rio Grande do Sul. XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belém, 2013.

PBMC. Base científica das mudanças climáticas, Contribuição do grupo de trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. [Ambrizzi, T; ARAUJO, M] COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 464 p., 2014.

PINTO, H.S; ASSAD, E.D. Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira. Campinas: Embrapa; Unicamp, 2008.

Polley, H.W.; Shaw, M.R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO2. *Oecologia*, 140: 11-25, 2004.

ROODMAN, D. How to do xtabond2: An introduction to difference and system GMM in Stata. **The stata journal**, v. 9, n. 1, p. 86-136, 2009.