

UM EXERCÍCIO DE META ANÁLISE DE ESTUDOS ECONÔMICOS SOBRE OS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NO BRASIL ¹

1 Introdução: teoria econômica e aquecimento global

A preocupação da teoria econômica com o aquecimento global não é recente. Ela data pelo menos desde a apresentação de William Nordhaus no encontro anual da American Economic Association de 1977. Nordhaus foi prêmio Nobel de economia em 2018, “por integrar mudança climática na análise macroeconômica de longo prazo”, conforme o site oficial da Fundação Nobel. Segundo matéria da revista Economist:

Mr. Nordhaus applied himself to solving this problem [i. e. the dangers of climate change]. That meant working out the complex interactions between carbon emissions, global temperature, and economic growth. He combined mathematical descriptions of both climate and economic activity into “integrated assessment models”. This allowed him to project how different trajectories for the world’s carbon emissions would produce different global temperatures. That, in turn, allowed him to estimate the likely costs of these different scenarios—and thus what level of reduction in emissions would be economically optimal. He was the first to suggest that warming should be limited to no more than 2°C higher than the world’s pre-industrial temperature. Models like his have become the linchpin of most analysis of the cost of climate change. (The Economist, Oct 13th edition).²

Incidentalmente, o volume de outono de 2018 do *Journal of Economic Perspectives* reuniu papers sobre o assunto, entre eles Hsiang and Koop (2018) e Auffhammer (2018). O primeiro apresenta um guia completo sobre economia e aquecimento global. Em sua última seção, apresenta algumas reflexões sobre como os economistas podem contribuir com a ciência do clima. Segundo os autores, há pelo menos duas contribuições imediatas, a saber, auxiliar na previsão das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e integrar a pesquisa climática aos efeitos sociais e econômicos

O segundo *paper*, Auffhammer (2018), trata do segundo tema de interesse de Nordhaus: a quantificação de danos econômicos das mudanças climáticas, e oferece uma resenha de como os economistas geralmente calculam o “custo social do carbono” para fins regulatórios.

O objetivo do presente texto é comparar os resultados de estudos econômicos sobre os impactos da Mudança Climática no Brasil. Especificamente, observar se os resultados são robustos e consistentes entre si, apesar das diferentes metodologias adotadas pelos autores. Foram selecionados 6 estudos, a partir das referências apresentadas no mais recente deles, Tanure et al (2020). Não é, portanto, uma *survey* exaustiva do assunto.

Este estudo está organizado em três seções, além desta introdução. A Seção 2 aborda a contribuição de economistas às ciências da mudança climática e no desenvolvimento de metodologia para a quantificação dos danos econômicos das mudanças climáticas. A Seção 3 analisa e compara resultados de vários estudos econômicos sobre o impacto de mudanças climáticas para o Brasil, em especial sobre o uso da terra. Uma última seção apresenta as conclusões, em que se discute se os resultados dos estudos analisados na seção precedente são robustos.

2 A contribuição de economistas às ciências da mudança climática e a quantificação dos danos econômicos relacionados à mudança climática.

2.1 A contribuição dos economistas às ciências das mudanças climáticas

A última seção de Hsiang and Koop (2018) apresenta algumas reflexões sobre como os economistas podem contribuir com a ciência do clima. Segundo os autores, há pelo menos duas contribuições imediatas: (a) auxiliar na previsão das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e (b) integrar a pesquisa climática aos efeitos sociais e econômicos.

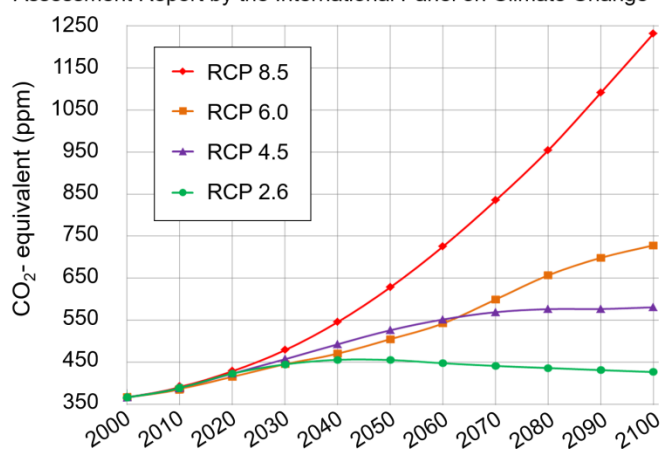
a. O auxílio de economistas nas previsões de emissões de GEE:

As emissões de gases de efeito estufa claramente dependem da atividade econômica global. O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Interdisciplinar de Mudança Climática (IPCC AR5) de 2014 adotou quatro Trajetórias Representativas de Concentração de emissões (ou *RCP emissions*, sigla para *Representative Concentration Pathways*), uma para cada possível cenário de evolução da concentração da emissão de gases de efeito estufa, variando de RCP2,6; RCP4,5; RCP6 e RCP8,5; correspondendo a quatro valores possíveis de força radiativa no ano de 2100 (2,6, 4,5, 6 e 8,5 W/m², respectivamente, veja Figura 1).

Figura 1: Trajetórias Representativas de Concentração de Emissões definidas no IPCC AR5 (2014)

IPCC AR5 Greenhouse Gas Concentration Pathways

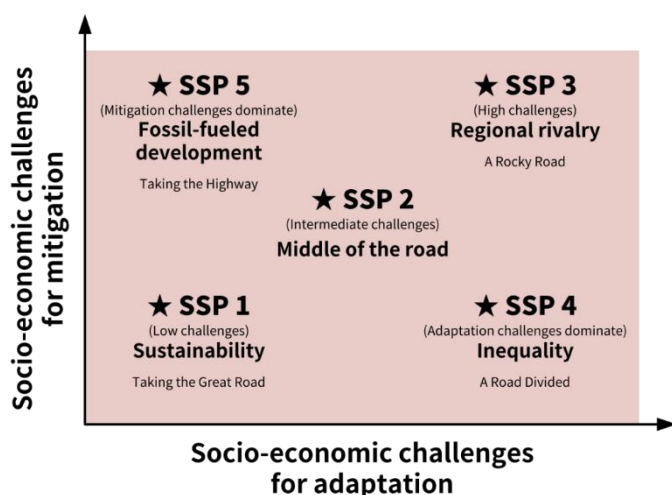
Representative Concentration Pathways (RCPs) from the fifth Assessment Report by the International Panel on Climate Change



Fonte: By Ilinri (talk) (Uploads) - Transferred from en.wikipedia to Commons., CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28855014>

Os cenários RCP são acompanhados de cinco cenários de Trajetórias Sócio-econômicas Compartilhadas (SSP ou Shared Socioeconomic Pathways), que combinam projeções de crescimento populacional, previsões de crescimento econômico, urbanização e de mudança tecnológica no setor de energia. Os cenários são representações de cinco “estados do mundo” alternativos estão representados na Figura 2.

Figura 2: Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSP) definidas no IPCC AR5 (2014)



Fonte: By Sfdiversity - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84203064>

A descrição sucinta de cada cenário está abaixo:

- SSP 1: “Sustentabilidade” ou “Taking the Great Road”, cenário que combina facilidade para a mitigação dos efeitos climáticos e adaptação socioeconômica.
- SSP 2: “Cenário intermediário” ou “Middle of the road”,
- SSP 3: “Rivalidade regional” ou “A Rocky Road”, combinando dificuldade para a mitigação dos efeitos climáticos e para a adaptação sócio econômica. Este cenário prevê o ressurgimento do nacionalismo e preocupações com segurança e competitividade, podendo resultar em conflitos regionais.
- SSP 4: “Desigualdade” ou “A Road Divided”, combinando facilidade para a mitigação dos efeitos climáticos, mas dificuldades para a adaptação socioeconômica. Este cenário prevê grande aumento da desigualdade tanto internacional quanto dentro dos estados.
- SSP 5: “Desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis” ou “Tacking the Highway”, combinando dificuldade para a mitigação dos efeitos climáticos, mas facilidade para a adaptação socioeconômica.

Assim, a combinação do cenário SSP 5 e a ausência de medidas de redução de poluentes é consistente com RCP 8,5; em todas as SSPs, RCPs 4,5 ou 2,6 requerem políticas ativas e intensas de redução de carbonos. Os autores destacam que a atualização desses cenários é tarefa que requer equipes multidisciplinares, incluindo físicos, engenheiros, economistas e sociólogos.

- b. O auxílio de economistas para analisar impactos socioeconômicos das mudanças climáticas.

Hsiang and Koop (2018) alertam que o foco da pesquisa científica em questões de natureza física e biológica pode deixar em segundo plano questões de natureza social e econômica. Os autores elencam duas dificuldades relacionadas à análise dos impactos socioeconômicos associados à mudança climática. Em primeiro lugar, a dificuldade de isolar as consequências econômicas das mudanças climáticas. Em segundo lugar, a dificuldade de obter dados econômicos acurados para compor modelos de mudanças climáticas utilizados nas comparações de programas regionais e internacionais.

2.2 A quantificação dos danos econômicos relacionados à mudança climática

O segundo texto da edição especial do *Journal of Economic Perspectives* dedicado ao tema, Auffhammer (2018), também destaca que o esforço de pesquisa dos efeitos econômicos

e sociais das mudanças climáticas é desproporcionalmente menor do que o dos efeitos físicos e biológicos, e que o desenvolvimento de modelos econômicos e sociais contam com pouco ou nenhum apoio público.

O autor lembra de outros dois motivos que dificultam a mensuração dos efeitos econômicos das mudanças climáticas: (i) em primeiro lugar, o fato de que as mudanças climáticas são um fenômeno global, com desdobramentos que variam no tempo e no espaço; (ii) em segundo lugar, o fato de que os efeitos da emissão de gases estufas são de longo prazo; assim, os fluxos futuros de danos decorrentes da instalação de uma usina termelétrica a carvão no China devem ser considerados em perspectiva global e por centenas de anos.

O objetivo de Auffhammer (2018) é oferecer uma resenha de como os economistas geralmente calculam o “custo social do carbono” para fins regulatórios. O custo social do carbono é uma estimativa do valor presente descontado de uma tonelada equivalente de CO₂ emitida em determinado momento. Dada a natureza cumulativa, esse custo marginal é crescente no tempo, isto é, as últimas toneladas são mais custosas em termos sociais. O cálculo é obtido por meio de Modelos de Avaliação Integrados.

Os modelos de avaliação integrados mais conhecidos são o DICE (*Dynamic Integrated Climate-Economy*)³, desenvolvido por William Nordhaus, FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*)⁴, desenvolvido por David Anthoff e Richard Tol, e o PAGE (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect*), desenvolvido por Chris Hope⁵. Nas palavras de Auffhammer (2018):

“Esses modelos ‘integram’ cenários socioeconômicos que produzem trajetórias futuras de emissões [como as RCPs, veja acima], as quais alimentam um modelo climático simples que traduz trajetórias de emissão em concentrações e produz cenários para futuras temperaturas, precipitações e níveis do mar” (Auffhammer, 2018, p. 34, tradução livre).

Num segundo momento:

“Esses resultados climáticos alimentam um conjunto de funções de dano, que mapeiam o resultado do modelo climático em danos econômicos em nível regional ou global. A diferença dos danos descontados entre uma linha de base futura e um futuro com uma tonelada adicional de emissão é então o custo social do carbono – essencialmente o custo externo [das externalidades geradas por] uma tonelada adicional de CO₂ num determinado ponto no tempo”. (Auffhammer, 2018, p. 34, tradução livre).

Assim, por exemplo, o Grupo de Trabalho Inter-Agência formado durante a administração Obama utilizou-se dos três modelos e estimou que o custo marginal da emissão de uma tonelada de CO₂ em 2020, obtido a partir de 50.000 simulações em cada um dos três modelos a uma taxa de desconto de 3% era de US\$ 42, a preços de 2007. Se a taxa de desconto aumentasse para 5%, o custo cairia para US\$ 12; e se fosse reduzida para 2,5%, o custo aumentaria para US\$ 62.⁶

Nesta estimativa está implícita uma função de dano que relaciona resultados climáticos a resultados econômicos. As primeiras estimativas de função de dano que relacionavam resultados climáticos a econômicos datam dos anos 70, e procuravam analisar os efeitos de mudanças climáticas na agricultura. As estimativas de função de dano incluem adaptações de margem extensiva (instalação de equipamentos e adaptação de infraestrutura) e de margem intensiva (uso mais frequente dos equipamentos instalados) para todos os setores que são afetados pelo resultado climático.

Há, portanto, dois contrafactuais a serem considerados:

- Qual seria o resultado econômico caso não houvesse a mudança climática? e
- Havendo mudança climática, qual seria o resultado econômico se não houvesse adaptação (extensiva e intensiva)?

Auffhammer (2018) classifica as metodologias de estimação de função de dano climático em quatro tipos: (i) Abordagem Cross Section Ricardiana; (ii) Abordagem de Dados em Painel; (iii) Estimações de Diferenças Longas e (iv) Estimativas de Respostas Climáticas Adaptativas (esta última combinando as duas primeiras).

a. Abordagem Cross Section Ricardiana

A Abordagem Cross Section Ricardiana foi utilizada em Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994), reconhecida como a primeira tentativa de estimar econometricamente uma função de dano com objetivo explícito de simular os impactos da mudança climática na atividade econômica de um setor específico, no caso, a agricultura.

A abordagem consiste em regredir o valor da terra contra diversas características, incluindo variáveis climáticas, e observa o valor do efeito marginal das variáveis climáticas sobre o valor da terra. A metodologia utiliza localizações mais quentes como contrafactuais das localizações mais frias sob efeito de aquecimento global e pressupõe implicitamente a adaptação do fazendeiro a mudanças climáticas, o que confere a ela o caráter “Ricardiano”, derivado da teoria da renda da terra de David Ricardo.

Auffhammer (2018) levanta três críticas a esta abordagem.

Em primeiro lugar, a função dano é muito sensível ao viés de omissão de variável. Como exemplo, Schlenker, Hanemann, and Fisher (2005) reexaminaram o estudo de Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994), incluindo a variável irrigação, que foi omitida no estudo original. A inclusão da variável alterou o efeito marginal de variações climáticas em terras aráveis ao leste do 100° meridiano (isto é, praticamente a metade leste do território dos Estados Unidos da América), de “ligeiramente benéfico para robustamente negativo” (Auffhammer, 2018, p. 42).

Em segundo lugar, a Abordagem Cross Section Ricardiana também pressupõe implicitamente que a migração para colheitas mais adequadas a temperaturas maiores por parte do agricultor (a margem extensiva) é realizada sem custo algum para o agricultor. Alternativamente, considerando *switching costs*, o efeito marginal obtido pelo modelo estaria subestimado, já que o agricultor permaneceria plantando colheitas adaptadas a climas frios mesmo em climas mais quentes.

Em terceiro lugar, a abordagem tradicional não considera as expectativas dos fazendeiros quanto a alterações climáticas. Considerando que os agricultores já tomam suas decisões com base nessas expectativas, os efeitos marginais obtidos pelo modelo podem estar também subestimados.

b. Abordagem de dados em Painel

A análise de dados em Painel, em que tanto as variáveis dependentes (resultados agrícolas) quanto as independentes (temperatura, precipitações) são introduzidas no modelo de regressão em diferenças, tem a vantagem de contornar o problema da omissão de variáveis. Dessa forma, os modelos de análise em painel podem controlar os efeitos fixos de localização e de tempo cronológico.

Os modelos mais simples, em que as variáveis independentes, em diferenças, entram na regressão de maneira linear, capturam bem as margens intensivas, mas não as margens extensivas, isto é, os efeitos de adaptação, comuns em análises de longo prazo. Uma maneira, também simples, de contornar esse problema, é incluir as variáveis independentes em polinômios de segundo grau.

Estudos recentes que se utilizaram dessa metodologia encontraram impacto das mudanças climáticas sobre o PIB mundial da ordem de 20%, significativamente maiores do que os resultados obtidos nos estudos que se utilizaram de modelos de avaliação integrada.

Outra crítica que se faz ao modelo é que os resultados são sensíveis a erros de mensuração, comuns em estudos sobre clima. A precisão das informações sobre temperatura, por exemplo, depende da distância das estações de coleta de dados, que não é regular nas diferentes partes do planeta.

c. Estimação de diferenças longas

Para contornar tanto o viés de omissão de variáveis dos modelos ricardianos quanto as deficiências dos modelos de análise em painel de capturar os efeitos de adaptação de longo prazo, Burke and Emerick (2016) propuseram um modelo que utiliza diferenças de médias móveis de 5 anos das variáveis dependente e independentes, separadas por vinte anos, ao invés das diferenças anuais dos modelos tradicionais de análise em painel.

Os resultados obtidos pelos autores são a metade dos resultados obtidos pelos modelos de painel, mas a dispersão não permite descartar que são equivalentes. A grande desvantagem do método é a necessidade de grande volume de dados, muitas vezes não disponíveis, em especial para países em desenvolvimento.

d. Estimação de resposta adaptativa ao clima

Uma última abordagem combina a metodologia Ricardiana com a de análise de dados em painel, e busca estimar funções de dano que variam junto com a mudança climática. Auffhammer (2018) apresenta duas metodologias nesse sentido. Na primeira, identificam-se processos adaptativos, usando-os para separar duas sub-amostras, e aí estimam-se as funções de dano para cada uma delas. Uma segunda metodologia utiliza-se de análise de dados em painel para “uma grande quantidade de unidades (condados, domicílios ou firmas), em um número significativo de períodos, cobrindo uma área espacial com grande heterogeneidade de clima” (p. 46). Dessa forma, estimam-se funções de resposta para subgrupos de observações e, em um segundo estágio, estimam-se as inclinações das respostas dentro dos subgrupos, para se obter funções de dano de longo prazo específicas para cada subgrupo com diferentes climas, população, renda, ou outra variável observada.

Embora o apelo a essa última metodologia seja grande, ela não supera algumas das críticas dirigidas aos modelos de análise em painel. Em particular, ainda que se tente controlar as diferenças entre as áreas (os subgrupos) pela renda, população, área, ou qualquer outra variável, “Fresno pode ser estruturalmente muito diferente de São Francisco” (p. 46).

3 Uso de modelos de equilíbrio geral para a simulação dos impactos socioeconômicas das mudanças climáticas no Brasil.

O objetivo dessa seção é analisar estudos sobre o impacto socioeconômico de mudanças climáticas no Brasil. Os estudos levantados estão listados a seguir, em ordem cronológica de publicação:

- Evenson, R. E. e Alves, D. C. (1998): Technology, climate change, productivity, and land use in Brazilian agriculture. *Planejamento e Políticas Públicas*, n.18, dez/1998.
- Féres, J, Reis, E. e Speranza, J. (2009): “Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil”. *XXXVII Encontro Nacional de Economia*, 2009, Foz do Iguaçu. Anais.
- Massetti, E., Nascimento Guiducci, R.D.C., Fortes De Oliveira, A., Mendelsohn, R.O., (2013). The Impact of Climate Change on the Brazilian Agriculture: A Ricardian Study at Microregion Level. *CMCC Research Paper*, n. 200.
- Ferreira filho, J. B. S., Moraes, G. I. (2014). Climate change, agriculture, and economic effects on different regions of Brazil. *Environment and Development Economics* 20 (01), 37–56.
- Assunção e Chein (2016): “Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives”. *Environment and Development Economics* 21: 581–602.
- Tenure et al (2020): The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Revista Economia da ANPEC*, v. 21, p. 73-90, 2020.

O conjunto de estudos analisados acima foi levantado a partir da bibliografia citada nos dois estudos mais recentes (Assunção e Chein, 2016) e Tenure et al (2020). Não é um levantamento exaustivo do tema, apenas permite a realização deste exercício.

3.1 Evenson e Alves (1998)

Os autores estendem um modelo ricardiano de produtividade da terra para analisar os impactos da mudança climática sobre a produtividade da terra e sobre o uso da terra entre agricultura, pasto e floresta. Adicionalmente, combinam os choques derivados da mudança climática com choques tecnológicos, de intensificação da atividade de pesquisa e desenvolvimento. Usam dados dos censos agrícolas de 1975, 1980 e 1985, em nível municipal, suplementando com dados climáticos, institucionais e tecnológicos.

Para fins desse trabalho, consideram-se apenas os efeitos exclusivos dos choques climáticos, sem incluir o efeito combinado da pesquisa tecnológica. Os resultados estão na Tabela 1. A tabela indica que, partindo de uma base de 22% do uso da terra para colheitas anuais, o efeito combinado de um aumento de 3% no volume de chuvas e de 1 °C na temperatura fará com que áreas de colheita ocupem 22,85% do território total considerado no Censo Agropecuário de 1985.

Tabela 1: Evenson e Alves (1998): efeitos parciais estimados de Mudança Climática

	Área agrícola		Área de pasto		Florestas		Impacto no valor da terra
	Anual	Perena	Natural	Plantada	Natural	Plantada	
1985 Part %	22	7	30	19	17	2	
a. 3% aumento de chuvas	0,35	-0,09	-0,78	0,33	0,14	-0,04	4.59
b. 1 °C aumento da temperatura	0,5	0,17	3,54	-1,07	-1,98	-0,14	-5.36
c. Efeito combinado do aumento de chuva e de temperatura	0,85	0,08	2,76	-0,73	-1,84	-0,18	-1.23

Fonte: Evenson e Alves (1998).

À luz de hoje, chama a atenção a redução de 2,02% da área florestal, incluindo as áreas florestais naturais e plantadas e a redução de 1,23% do valor da terra. Entretanto, destaca-se ausência de horizonte temporal no artigo: não há indicação de quando (em que intervalo de tempo) esses resultados serão observados.

3.2 Féres, J, Reis, E. e Speranza, J. (2009)

O objetivo dos autores também é avaliar o impacto esperado das mudanças climáticas sobre o padrão de uso da terra nos estabelecimentos agrícolas brasileiros. Utilizam um modelo econométrico para estimar alterações na alocação da terra entre área agrícola, pecuária e cobertura florestal. O choque simulado corresponde a cenários definidos do relatório IPCC vigente. Os resultados “apontam uma redução significativa das áreas de florestas e matas nos estabelecimentos agrícolas, com a conversão das áreas florestais para o uso na pecuária e um aumento da pressão por desmatamento na região Amazônica” (p. 1, Resumo).

Os autores utilizam os dados do Censo Agropecuário de 1995/96 do IBGE, em nível municipal, censos anteriores, informações agroeconômicas da EMBRAPA, informações climáticas do *Climate Research Unit (CRU/University of East Anglia)* e do modelo PRECIS, do CPTEC/INPE, que também foi utilizado para regionalizar as estimativas. Adicionalmente, estimaram impacto sobre a produtividade de sete culturas: arroz, cana, feijão, fumo, milho, soja e trigo.

Os choques climáticos implementados correspondem aos cenários de emissões A2 (mais pessimista, que estima um aumento de temperatura entre 2 °C e 5,4 °C até 2100) e B2 (mais

otimista, que prevê um aumento de temperatura entre 1,4 °C e 3,8 °C em 2100), conforme definidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – AR4), em três períodos: (i) 2010-2040; (ii) 2040-2070 e (iii) 2070-2100.

Os resultados estão na Tabela 2, onde as variações percentuais possuem como período de referência a utilização do solo conforme o Censo Agropecuário de 1995. Para fins deste trabalho, apresentam-se apenas as estimativas para o Brasil, sem a regionalização, ainda quem uma das conclusões importantes do trabalho é a de que há grande “heterogeneidade espacial das mudanças climáticas”, seus efeitos são “radicalmente distintos nas diferentes regiões do país”. (p. 17, Conclusões).

Tabela 2: Féres et al (2009): Variações de áreas de lavoura, pasto e floresta nos estabelecimentos agrícolas

BRASIL	2010-2040			2040-2070			2070-2100		
	lavoura	pasto	floresta	lavoura	pasto	floresta	lavoura	pasto	floresta
Cenário A2	-1,7%	+11,1%	-17,1%	+3,1%	+11,1%	-19,36%	+11,0%	+6,5%	-15,4%
Cenário B2	+0,5%	+9,9%	-16,2%	+2,7%	+10,6%	-18,2%	-3,0%	+10,1%	-15,0%

Fonte: elaborado a partir de Féres et al (2009).

Os resultados apontam grande substituição de áreas florestais para áreas de pasto. Em comparação com o estudo anterior, observa-se alguma convergência em relação às alterações da área agrícola, mas grande defasagem em relação às estimativas para o aumento da área de pasto e, especialmente, em relação à redução da área florestal.

3.3 Masseti et al (2013)

Masseti et al (2013) utilizam um modelo Ricardiano para estimar o impacto da mudança climática na agricultura brasileira nos períodos 2046-2065 (denominado “2060”) e 2080-2099 (“2100”). Os autores utilizam os dados históricos dos censos agropecuários de 1975, 1985, 1995 e 2006, e duas especificações do modelo Ricardiano – um modelo em pool (*pooled model*) e um modelo em dois estágios baseado – para estimar os efeitos marginais do aumento da temperatura e da variação da chuva (aumento no Sul, Sudeste e Centro-Oeste; redução no Norte e Nordeste). Os efeitos marginais são particularmente danosos para o Norte e Nordeste; nas demais regiões, os efeitos marginais são ambíguos.

A partir da estimativa desses efeitos marginais, os autores utilizam três cenários GCM (*General Circulation Models*) para estimar os impactos futuros da mudança climática na agricultura brasileira. Para 2060, os impactos dos três cenários é negativo de maneira geral. Para 2100, entretanto, apenas um modelo prevê impacto negativo; um segundo modelo não prevê alteração significativa no valor da terra; e o terceiro cenário até contempla eventual efeito benéfico, em especial nas regiões Sul e Sudeste.

O modelo Ricardiano elaborado pelos autores regride o valor da terra por hectare contra preço de mercado do produto, volume de produção, valor do insumo (excluindo a terra), um vetor de variáveis climáticas e outras variáveis, como densidade populacional, renda, solo etc.). O modelo é dinâmico, isto é, inclui a variável tempo e uma taxa de desconto intertemporal e longitudinal entre microrregiões. O modelo então é estimado em duas especificações, em *pooled cross section*, ou dados em painel e em dois estágios.

A partir desse modelo, os autores estimam elasticidades do valor da terra em relação à temperatura e à precipitação de chuvas e os efeitos marginais. Particularmente em relação a esta última variável, as duas especificações do modelo ricardiano preveem redução importante de chuvas tanto na Região Norte quanto na Região Nordeste, e eventual aumento de chuvas na Região Sul.

Os autores então utilizam o resultado para estimar o impacto da mudança climática na agricultura brasileira em três cenários de GCM: (i) HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model, version 3*, desenvolvido no *United Kingdom Meteorological Office*), (ii) o MIMR (do *Center for Climate System Research*, da Universidade de Tóquio), e (iii) o NCPCM (do *National Center for Atmospheric Research*, dos EUA). A Tabela 3 mostra as previsões de cada cenário para as variações de temperatura e de precipitação de chuvas na região Norte para cada estação do ano. Perceba que o cenário HadCM3 prevê aumento de até 8,1 °C na temperatura média da Região Norte no inverno e forte redução das chuvas, em especial na primavera (-7 cm/mês).

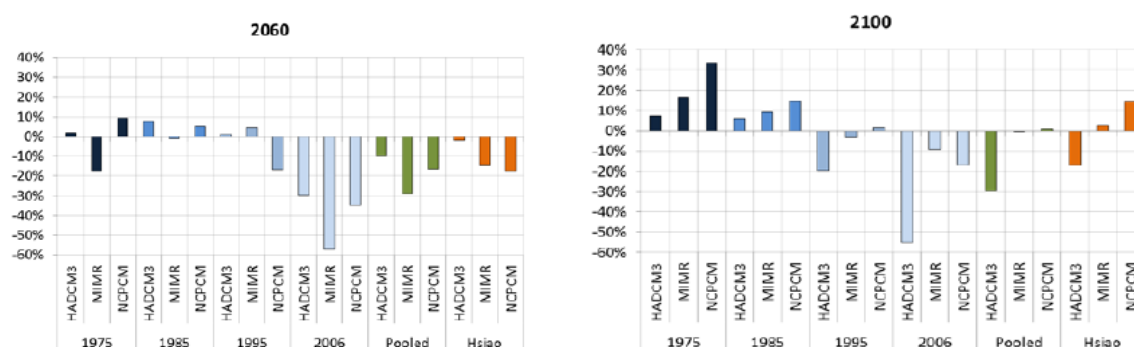
Tabela 3: Masseti (2014): Variações de temperatura e precipitação na Região Norte, por período e Modelo de Circulação Geral.

Região Norte		Temperatura (°C)				Precipitação (cm/mês)			
		Verão	Outono	Inverno	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Primavera
1990	CRU	26,2	26,2	25,9	26,8	24,4	25,1	10,2	13,6
2060	HADCM3	3,7	3,4	4,2	4,4	-2,8	-1,5	-1,8	-4,3
	MIMR	2,8	2,4	2,8	3,1	-0,9	-0,1	-0,6	0
	NCPCM	1,2	1,1	1,5	1,3	2,2	1,2	0,1	2,1
2100	HADCM3	6,5	6,5	8,1	7,5	-5,7	-3,7	-3,4	-7
	MIMR	4,9	4,7	5,4	5,6	0,4	0	-1	0,5
	NCPCM	2,2	2,3	2,7	2,4	2,8	0,7	0,3	2,5

Fonte: Masseti (2014)

Os resultados são apresentados apenas na forma de figuras e mapas, como a Figura 3. Como se observa, para o período 2060, as estimativas da variação do valor da terra são todas negativas, nos três cenários, utilizando as elasticidades obtidas nas duas especificações do modelo Ricardiano (*pooled* e *panel*). No entanto, para o período 2100, o cenário HadCM3 apresenta resultados negativo nas duas especificações, o cenário MIMR apresenta resultado insignificante nas duas especificações, e o cenário NCPCM, chega a apresentar resultado positivo na especificação em *panel*.

Figura 3: Masseti et al. (2014): Impacto das mudanças climáticas sobre o valor da terra na agricultura brasileira – agregado.



Fonte: Masseti et al. (2014).

Nas conclusões, os autores destacam que as mudanças climáticas vão afetar negativamente grandes áreas do território brasileiro, em especial o bioma das Savanas (Cerrado) do Centro-Oeste. Mas ressalva, como antecipado, que eventual efeito benéfico no Sul e nas áreas costeiras do Sul e Sudeste não pode ser descartado.

3.4 Ferreira Filho, J. B. S., Moraes, G. I. (2014).

Ferreira-Filho e Moraes (2014) analisam o efeito econômico potencial das mudanças climáticas sobre cenários da agricultura brasileira em uma estrutura de equilíbrio geral regionalizada, tendo como base o ano de 2005. Em comparação com outros trabalhos, os autores detalham os choques por produto e por região, ressaltam as conexões entre os impactos sobre a produção agrícola e o mercado de trabalho, de um lado, e os gastos domiciliares, por outro lado. Os autores concluem que apesar do relativamente pequeno impacto macroeconômico na agricultura brasileira, o impacto regionalizado é muito heterogêneo, com consequências severas para as regiões mais pobres e para os trabalhadores mais pobres nessas regiões.

O estudo utiliza o modelo de equilíbrio geral TERM BR CGE (*The Enormous Regional Model BR – Computable General Equilibrium Model*), que é um modelo estático e inter-regional, consistindo de 27 modelos CGE separados (um para cada estado e Distrito Federal), relacionando mercado de bens e de fatores de produção, incluindo importação e exportação inter-regional para bens e insumos de produção. O fator trabalho é função de 10 diferentes tipos de trabalho, com níveis de salários e de habilidades específicos. O modelo inclui 35 setores ou indústrias, sendo 14 da agropecuária. O fechamento do modelo é de equilíbrio de longo prazo com mobilidade de capital. A quantidade total de mão de obra é fixa, mas móvel entre os setores da economia. O fator terra também é móvel entre os setores da atividade econômica. Todos os parâmetros de produtividade são fixos, com exceção da produtividade dos setores agropecuários. Consumo, gasto do governo e investimentos por setor são endógenos ao modelo, mas os investimentos afetam apenas a demanda agregada, e não a capacidade produtiva.

Os autores simularam dois cenários de mudança climática baseados nos relatórios do IPCC, o cenário A2 para 2020 e B2 para 2070. O recorte considera um hipotético esforço de adaptação decorrente de um eventual cenário pessimista em 2020, em direção a um eventual cenário mais otimista em 2070. Os cenários representavam redução da área viável para agricultura e queda da produtividade, conforme resultados de Assad e Pinto (2008), apresentados na Tabela 4.

Os choques exógenos são particularmente severos para as regiões Nordeste e Centro Oeste, especialmente para as culturas de algodão, soja, arroz, milho e café. Para a cultura da cana de açúcar, entretanto, a área potencial de plantio mais do que dobra e quase triplica em alguns cenários.

Tabela 4: Assad e Pinto (2008): Variação das áreas com potencial pra o plantio das principais culturas brasileiras nos anos de 2020, 2050, e 2070 na comparação com o momento atual (2006) de acordo com as simulações dos modelos PRECIS para os cenários A2 e B2 do IPCC (AR4)

CULTURA	ÁREA POTENCIAL ATUAL (KM2)	MODELO PRECIS B2			MODELO PRECIS A2		
		VAR% SOBRE ÁREA "ATUAL"			VAR% SOBRE ÁREA "ATUAL"		
		2020	2050	2070	2020	2050	2070
Algodão	4.029.507	-11,04%	-14,17%	-15,71%	-11,07%	-14,40%	-16,11%
Arroz	4.168.806	-8,56%	-12,53%	-14,31%	-9,70%	-12,32%	-14,19%
Café	395.976	-6,75%	-18,32%	-27,61%	-9,48%	-17,15%	-33,02%
Cana	619.422	170,93%	146,77%	143,42%	159,76%	138,58%	118,18%
Feijão	4.137.837	-4,35%	-10,01%	-12,75%	-4,36%	-10,21%	-13,30%
Girassol	4.440.650	-14,10%	-16,63%	-18,25%	-14,16%	-16,47%	-18,17%
Mandioca	5.169.601	-2,51%	7,29%	16,61%	-3,15%	13,48%	21,26%
Milho	4.381.791	-12,17%	-15,13%	-17,43%	-11,98%	-15,18%	-17,28%
Soja	2.790.265	-21,62%	-29,66%	-34,86%	-23,59%	-34,15%	-41,39%

Fonte: Assad e Pinto, 2008, p. 30-31.

Os resultados da implementação desses choques estão na Tabela 5. Como antecipado, os impactos para o Brasil são pequenos, mas há grande heterogeneidade entre as regiões. Por exemplo, o PIB real do Brasil cai -1,12% em 2070, enquanto no Nordeste, cai -6,13%. Em se tratando de salário, a queda no Brasil é de -1,81% em 2070, enquanto no Nordeste é de -4,54%.

Tabela 5: Ferreira Filho e Moraes (2014): resultados macroeconômicos selecionados.

	PIB Real		Salário real		Consumo domiciliar real		Emprego		Inflação	
	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70
N	-0,01	0,15	-0,19	-1,46	0,36	-1,03	0,45	0,48	0,27	0,41
NE	-4,07	-6,13	-2,44	-4,54	-4,73	-7,58	-2,18	-2,95	0,61	0,85
SE	0,83	0,36	-0,22	-1,30	0,15	-0,80	0,34	0,55	-0,14	-0,13
S	-0,15	-1,35	-0,19	-1,78	0,19	-1,70	0,38	0,02	-0,11	-0,42
CO	-2,98	-4,41	-0,75	-1,46	-0,70	-0,95	-0,17	0,43	-0,26	-0,18
Brasil	-0,28	-1,12	-0,53	-1,81	-0,70	-2,09	0	0	-	-

Fonte: Ferreira Filho e Moraes (2014).

Na Tabela 5, os valores negativos foram destacados em vermelho e os positivos em preto, com exceção dos dados de inflação, em que as cores foram invertidas, por conta da natureza da informação.

Mas o que importa para este estudo são os resultados em termos de uso da terra, que está na Tabela 6. Em particular, observa-se a redução do uso da terra para florestas em 2070, em especial nas regiões Norte (-19,9%), Nordeste (-45%), Sudeste (-46,1%) e Centro Oeste (-20,8%). Os vários resultados de queda de 80% (por exemplo, na linha associada ao café) decorrem de ajuste feito pelos pesquisadores, de imposição de limite superior para a inviabilidade da terra. A redução do uso do solo para pasto (linhas para Gado e Leite) em 2070 também é muito significativa, assim como para a maior parte das lavouras, com exceção de milho, trigo, algodão e café no Sul⁷.

Tabela 6: Ferreira Filho e Moraes (2014): Redução (%) do uso da terra em dois cenários.

	N		NE		SE		S		CO	
	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70	A2/20	B2/70
Arroz	-6,10	-15,10	-54,50	-57,80	-12,20	-21,50	-9,70	-18,50	-3,70	-9,20
Milho	-3,90	-15,70	-49,70	-70,60	-3,20	-5,40	-5,80	9,00	-5,40	-6,40
Trigo	-12,10	-22,60	-17,20	-23,30	-33,50	-49,60	-9,90	3,80	-3,10	-20,70
Cana de açúcar	-51,50	-11,20	-4,20	-2,30	0,00	0,00	-0,20	0,00	0,00	0,00
Soja	-20,80	-24,00	-47,70	-46,70	-4,70	-32,50	-37,00	-74,90	-33,30	-35,00
Mandioca	-3,90	-14,20	-34,00	-38,40	-11,10	-20,60	-18,40	-7,20	5,20	-17,10
Tabaco	-11,10	-22,30	-30,20	-59,70	-30,80	-50,40	-12,50	-14,90	-13,90	-31,00
Algodão	-5,80	-17,60	-19,40	-24,30	-25,90	-39,20	-8,30	28,60	-2,70	-23,60
Cítricos	-10,80	-20,50	-43,00	-80,00	-30,20	-48,00	-10,20	-9,50	-19,80	-36,90
Café	-80,00	-80,00	-80,00	-80,00	-11,20	-31,60	-7,80	24,70	-80,00	-80,00
Florestas	-10,50	-19,90	-21,40	-45,20	-31,60	-46,10	-10,40	0,00	-3,30	-20,80
Gado	-7,70	-19,20	-44,30	-82,50	-31,30	-46,10	-10,30	-9,40	-4,30	-24,30
Leite	-7,30	-19,40	-50,30	-82,60	-26,30	-41,20	-11,40	-9,40	-8,30	-26,00
Outros agríc.	-7,80	-18,00	-13,90	-19,30	-3,30	-5,20	-11,30	-10,40	0,30	-2,70
Total	-2,00	-4,20	-9,80	-24,00	-1,30	-2,70	-12,20	-20,60	-12,40	-21,20

Fonte: Ferreira Filho e Moraes (2014).

Os resultados referentes ao uso da terra neste trabalho de Ferreira-Filho e Moraes (2014) parecem indicar que que parte importante do solo estará inviável para a produção em 2070, de maneira muito mais pessimista do que os estudos congêneres. Segundo esses resultados, quase um quarto da terra atualmente utilizada no Nordeste deixará de ser utilizada para estas finalidades em 2070; no Centro Oeste, a variação é de quase um quinto da terra utilizada. Na Região Norte, apesar da significativa redução do uso da terra para as diversas culturas agrícolas, pecuária e florestas, a redução total do uso da terra é de apenas 4,20%.

Na conclusão, os autores informam que “a despeito do cenário severo de perda de terra e de produtividade agrícola” (p. 50), os impactos macroeconômicos de longo prazo serão relativamente pequenos. Mas alertam fortemente para os efeitos regionais, que preocupam pelo seu impacto sobre a pobreza e sobre movimentos migratórios. Por fim, ressaltam as limitações de um estudo estático, e não dinâmico, onde as trajetórias das variáveis poderiam indicar situações que alterariam qualitativamente o equilíbrio final.

3.5 Assunção e Chein (2016)

Assunção e Chein (2016) analisam o impacto da mudança climática na produtividade da agricultura entre municípios brasileiros, a partir das previsões do IPCC (AR4) para o período 2030-2049. De acordo com o IPCC AR4, a temperatura média no Brasil aumentará 1,43 oC, e a precipitação anual diminuirá em 1,44% no período 2003-2049.

A principal conclusão dos autores é a significativa queda da produtividade agrícola no Brasil, de 18% em média (veja Tabela 7), variando de -40% a +15% entre os municípios, favorecendo os municípios da Região Sul em detrimento dos municípios das Regiões Norte e Nordeste.

A abordagem empírica do trabalho combina elementos da abordagem ricardiana e da abordagem da função de produção (séries de tempo). Os autores utilizam análise longitudinal (*cross-section*) entre os municípios brasileiros. Embora utilizem metodologia baseada na

função produção, o modelo estimado permite adaptação em termos de mix de lavouras e de mobilidade do fator trabalho.

Os dados climáticos utilizados vêm da *Climate Research Unit (CRU) at the University of East Anglia* (UEA), do IPCC AR4 e do *Atmosphere–Ocean Coupled Global Circulation Models* (AOGCMs), tipo de solo da EMBRAPA, produtividade agrícola das Pesquisas Agrícolas Mensais e dos Censos Agropecuários do IBGE, e as previsões de alteração de pluviometria e de temperatura, do IPCC AR4 para 2030-2049.

Tabela 7: Assunção e Chein (2016): Efeitos simulados da mudança climática no produto agrícola por hectare.

	Mudança pluviométrica		Mudança na temperatura		Produto agríc. por hectare		Previsão do produto agríc por hectare		Mudança da produtividade %	Intervalo de confiança (95%)	
	média	d.p.	média	d.p.	média	d.p.	média	d.p.	média	mín	máx
Brasil	-0,71%	3,07%	6,57%	0,87%	1.751,90	636,53	1.474,52	678,73	-18,2%	-18,6%	-17,9%

Fonte: elaborado a partir de Assunção e Chein (2016).

Apenas para comparar, no artigo de Evenson e Alves de 1998 o valor da terra se reduzia em 1,23%, enquanto neste artigo, a produtividade da terra cai 18,2%.

3.6 Tanure et al (2020)

O objetivo do artigo é verificar os impactos econômicos da redução da produtividade devido à mudança climática na região da Amazônia Legal, especialmente na produção agrícola, uso da terra, PIB e emprego. O modelo utilizado é o REGIA – *Inter-regional General Equilibrium Model for the Brazilian Legal Amazon*. Os choques simulados foram baseados nos resultados de redução de produtividade obtidos no artigo Assunção e Chein, 2016, que por sua vez utilizaram os parâmetros de mudança climática propostos pelo IPCC (AR4). Os principais resultados incluem a redução do PIB real de 1,18% em 2049 decorrente da queda da produção e do emprego na agricultura, e o aumento do desflorestamento, em decorrência da troca de áreas de pastos por área de plantio.

O modelo de equilíbrio geral REGIA foi desenvolvido em Carvalho (2014) para estudar o impacto regional e setorial do desflorestamento da Amazônia Legal. É um modelo recursivo dinâmico, baseado no modelo TERM. A alocação do fator terra entre três diferentes usos – agricultura, pecuária e florestas naturais – é o principal diferencial do modelo, e se aplica apenas à área disponível para a atividade econômica, excluindo, portanto, Reservas Legais (RLs) e Áreas de Preservação Permanente (APPs).

Os dados do modelo REGIA estão baseados na matriz de insumo produto do IBGE para 2005, complementados pelo Censo Agrícola de 2006 e por dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS, do Ministério do Trabalho), da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) e da Pesquisa de Orçamento Familiar (POF). Ao final, a matriz de contabilidade social do modelo REGIA consiste em 31 regiões e 27 setores econômicos.

Para a construção do choque, os resultados de Assunção e Chein (2016) foram agregados para as 30 mesorregiões da Amazônia Legal e uma região adicional correspondente ao resto do país. Em relação ao fechamento do modelo, foram construídos dois cenários. No primeiro cenário, as principais variáveis macroeconômicas do país foram definidas exogenamente a partir dos resultados observados entre 2006 e 2015 e hipotéticos entre 2016 e 2050. Outras variáveis como demanda do governo, exportações regionais, propensão nacional a consumir e mudança tecnológica são endógenas ao modelo. A taxa de desflorestamento é exógena até 2016, mas endógena a partir desta data até 2050. No segundo cenário, o choque de produtividade é exógeno e as principais variáveis macroeconômicas passam a ser endógenas,

com exceção do nível de emprego, mas essa variável permanece móvel entre os setores industriais.

Os resultados estão nas tabelas abaixo. Em particular, a queda da produtividade da agricultura é parcialmente compensada pelo aumento da área plantada, em detrimento das áreas de pasto e de florestas (Tabela 8). Mesmo assim, haverá redução da produção de todas as principais lavouras, variando de -1,14% (mandioca) a -11,34% (cana de açúcar), conforme Tabela 9. Em termos macroeconômicos, o PIB da região cairá apenas 1,18% de maneira acumulada entre 2030 - 2049 (Tabela 10)

Tabela 8: Tanure et al. (2020): Efeito da mudança climática no uso da terra, em milhões de hectares, acumulado entre 2030 e 2049.

	Agricultura	Pecuária	Florestas Plantadas	Florestas Naturais
Amazônia Legal	2,1	-1,06	-0,10	-0,90

Fonte: Tanure et al (2020)

Tabela 9: Tanure et al. (2020): Impacto na produção agrícola por cultura (desvio percentual acumulado entre 2030 e 2049 em relação à linha de base).

	Arroz	Milho	Soja	Cana de açúcar	Algodão	Mandioca	Outras lavouras
Amazônia Legal	-7,55	-7,9	-7,87	-11,34	-1,89	-1,14	-2,21

Fonte: Tanure et al (2020)

Tabela 10: Tanure et al. (2020): Variáveis macroeconômicas da Amazônia Legal (desvio percentual acumulado entre 2030 e 2049 em relação à linha de base).

	Consumo familiar	Investimento	Consumo do governo	Exportações	Importações	PIB
Amazônia Legal	-1,03	-3,34	-1,03	-0,23	-0,94	-1,18

Fonte: Tanure et al (2020)

4 Conclusões

A primeira parte desse estudo apresentou elementos metodológicos da contribuição de economistas para a pesquisa sobre os impactos do aquecimento global.

A segunda parte analisou e comparou resultados dos estudos econômicos sobre os impactos do aquecimento global no Brasil. Em síntese, os resultados dos trabalhos analisados estão listados abaixo.

- O estudo de Evenson e Alves (1998) apresenta aumento de aproximadamente 1% da área agrícola e da área de pasto, e de redução de 2% da área de florestas no país.
- O estudo do Feres et al. (2009) apontam grande substituição da área de floresta por área de pasto. Florestas chegam a recuar até quase 20% e pasto a aumentar até 11%. Área agrícola aumenta significativamente em apenas um cenário, o mais pessimista, no longo prazo.
- O estudo do Masseti et al (2013) usa um modelo Ricardiano e mostra que o valor da terra pode cair, ficar estável ou até aumentar, dependendo da especificação do modelo da função de dano e do modelo climático para o futuro.
- O estudo de Ferreira Filho e Moraes (2014) utiliza o estudo de Assad e Pinto e um modelo de Equilíbrio Geral Computável e conclui que o resultado da mudança climática em termos de PIB é muito pequeno, mas há variações regionais importantes. O estudo também prevê importante redução da área de florestas (excluindo áreas de preservação ambiental), da ordem de 20% na Região Norte em 2070.

- O estudo de Assunção e Chein (2016) combina função de dano ricardiana com séries de tempo e conclui que haverá queda da produtividade média da agricultura brasileira da ordem de 18,2 %.
- Finalmente, o estudo de Tanure et al (2020) utiliza o resultado de Assunção e Chein em um modelo regionalizado de equilíbrio geral computável construído para a Amazônia Legal e conclui que haverá redução da área de pasto e aumento da área dedicada a agricultura na Amazônia Legal, mas que o impacto no PIB regional será bem pequeno, -1,18% acumulado entre 2030 e 2049.

Como se observa, há grande dispersão de resultados nos estudos, mesmo entre aqueles que utilizam metodologia semelhante para a estimação da função de dano. Quando os resultados da função de dano são combinados com modelos de equilíbrio geral computável, os efeitos macroeconômicos parecem se diluir, agora de maneira mais consistente. Outro resultado mais robusto na comparação dos artigos é que impacto regional estimado é muito heterogêneo, em geral indicando que os efeitos serão mais intensos nas regiões Nordeste, Norte e Centro Oeste, e menos intensos nas demais.

O exercício de meta-análise realizado neste texto não é exaustivo, há outros estudos que podem ser ainda incorporados, mas os resultados parciais obtidos até agora sugerem a necessidade de mais esforço de pesquisa, especialmente na estimação dos parâmetros da função dano dos efeitos climáticos sobre a agricultura e uso do solo no Brasil.

5 References

- Assad, E.D., Pinto, H.S., 2008. Aquecimento Global e a Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil. CEPAGRI – Unicamp /EMBRAPA.
- Assunção, Juliano, Chein, Flávia, 2016. Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. *Environment and Development Economics*, 1–22.
- Auffhammer, Maximilian (2018): Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*—Volume 32, Number 4—Fall 2018—Pages 33–52
- Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia (2007). *Contribuições do Brasil para Evitar a Mudança do Clima*. 2007. (Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/73007.html>)
- Burke, Marshall, and Kyle Emerick. (2016). "Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8 (3): 106-40.DOI: 10.1257/pol.20130025
- Carvalho, T. S., 2014. *Uso do Solo e Desmatamento nas Regiões da Amazônia Legal Brasileira: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas*. Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional (Cedeplar) Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, Belo Horizonte, pp. 219 p, 2014.
- Domingues, E. P. Magalhaes, A. S.; Ruiz, R. M. (2008) *Cenários de Mudanças Climáticas e Agricultura no Brasil: Impactos Econômicos na Região Nordeste*. Texto para Discussão 340/CEDEPLAR. Belo Horizonte. Disponível em: www.cedeplar.ufmg.br/pesquisas/td/TD%20340.pdf
- Economist (2018). Paul Romer and William Nordhaus win the economics Nobel. Oct 13th 2018. Disponível em <https://www.economist.com/finance-and-economics/2018/10/13/paul-romer-and-william-nordhaus-win-the-economics-nobel>. Acesso em 30/11/2018.
- Evenson, R. E. e Alves, D. C. (1998): Technology, climate change, productivity, and land use in Brazilian agriculture. *Planejamento e Políticas Públicas*, n.18, dez/1998.

- Féres, J, Reis, E. e Speranza, J. (2009): “Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil”. XXXVII Encontro Nacional de Economia, 2009, Foz do Iguaçu. *Anais*.
- Ferreira filho, J. B. S., Moraes, G. I. (2014). Climate change, agriculture, and economic effects on different regions of Brazil. *Environment and Development Economics* 20 (01), 37–56.
- Hope, C., Anderson, J., Wenman, P. (2003): Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model. *Energy Policy*. Volume 21, Issue 3, March 1993, Pages 327-338. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90253-C](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90253-C). Acessado em 24/10/2020.
- Hsiang, Solomon and Kopp, Robert E. (2018): An Economist’s Guide to Climate Change Science. *Journal of Economic Perspectives*—Volume 32, Number 4—Fall 2018—Pages 3–32
- IPCC. Climate Change 2019: Global Warming of 1,5 °C. (Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>. Acesso em 29/11/2018)
- Massetti, E., Nascimento Guiducci, R.D.C., Fortes De Oliveira, A., Mendelsohn, R.O., (2013). The Impact of Climate Change on the Brazilian Agriculture: A Ricardian Study at Microregion Level. *CMCC Research Paper*, n. 200
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W., & Shaw, D. (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, 84(4), 753-771. Acessado em 25/10/2020 <http://www.jstor.org/stable/2118029>
- Schlenker, Wolfram, W. Michael Hanemann, and Anthony C. Fisher. 2005. "Will U.S. Agriculture Really Benefit from Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach." *American Economic Review*, 95 (1): 395-406. DOI: 10.1257/000282805382845
- Tanure, T. M. P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P. e Carvalho, T. S. (2020): The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Revista Economia da ANPEC*, v. 21, p. 73-90, 2020.

¹ Relatório de pesquisa. Agradeço o apoio do GVPesquisa.

² <https://www.economist.com/finance-and-economics/2018/10/13/paul-romer-and-william-nordhaus-win-the-economics-nobel> Acessado em 10/10/2020.

³ <https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice>

⁴ <http://www.fund-model.org>. Acessado em 24/10/2020. Literatura sobre o modelo pode ser encontrada no site.

⁵ Hope, C. et al (2003). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030142159390253C> Acessado em 24/10/2020.

⁶ Essa e as demais estimativas do custo marginal da tonelada de CO₂ já estariam defasadas. Os estudos mais recentes datam de 2009, utilizando dados e parâmetros dos anos 90; a atualização desses estudos foi abandonada após o Grupo de Trabalho Inter Agência ter sido desmontado na administração Trump

⁷ É curioso que o modelo esteja prevendo o aumento do cultivo de algodão no Sudeste, uma vez que uma praga fez com que a produção de algodão se deslocasse do Sudeste para o Centro Oeste nos anos 1990.