

Área 9 – Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade
Cenário de mudanças climáticas, efeitos sobre a produtividade agrícola e seus impactos econômicos e usos da terra nas regiões da Amazônia Legal Brasileira

Diego N. Miyajima¹
Aline Souza Magalhães²
Edson Paulo Domingues³
Terciane Sabadini Carvalho⁴

Resumo: Este artigo estuda os impactos futuros das mudanças climáticas sobre a economia e o uso da terra nas regiões da Amazônia Legal. Para tanto, foram adotados dois modelos econômicos: o modelo de uso da terra e o modelo REGIA. Primeiramente, utiliza-se o modelo de uso da terra, que é um modelo econométrico utilizado para estimar as variações de produtividade em função de fatores climáticos, como precipitação acumulada e temperatura média, para 11 cultivos agrícolas. Essa estimativa é baseada nos cenários climáticos regionais fornecidos pelo modelo climático Eta-CPTEC do INPE. Os cenários considerados nas projeções são RCP 8.5 e RCP 4.5, elaborados para o 5º relatório do IPCC. Em seguida, os resultados obtidos são utilizados para alimentar o modelo REGIA, que é um modelo do tipo equilíbrio geral computável, capaz de analisar 30 mesorregiões da Amazônia Legal e seus respectivos setores econômicos. Os resultados das simulações indicaram quedas nos principais indicadores econômicos da Amazônia Legal em ambos os cenários climáticos analisados. Em relação ao uso da terra, observou-se uma expansão das áreas de lavoura e um aumento do desmatamento em ambos os cenários. Em geral, os efeitos são mais intensos, tanto positivos quanto negativos, no RCP 8.5, o cenário mais pessimista.

Palavras-Chave: Amazônia Legal, impacto das mudanças climáticas, produtividade agrícola, mudanças de uso da terra.

Classificação JEL: Q15; Q54

Abstract: This paper examines the future impacts of climate change on the economy and land use in the Legal Amazon regions. For that, it adopts two economic models: the land use model and the REGIA model. Firstly, the land use model is used, which is an econometric model used to estimate productivity variations based on climate factors such as accumulated precipitation and average temperature for 11 agricultural crops. This estimation is based on regional climate scenarios provided by the Eta-CPTEC climate model from INPE. The scenarios considered in the projections are RCP 8.5 and RCP 4.5, developed for the IPCC's 5th report. Subsequently, the obtained results are used to feed the REGIA model, which is a computable general equilibrium model capable of analyzing 30 mesoregions of the Legal Amazon and their respective economic sectors. The simulation results indicated declines in the main economic indicators of the Legal Amazon under both analyzed climate scenarios. Regarding land use, an expansion of crop areas and an increase in deforestation were observed in both scenarios. Overall, the effects are more intense, both positive and negative, in RCP 8.5, the more pessimistic scenario.

Keywords: Legal Amazon, climate change impacts, agricultural productivity, Land use change.

JEL Classification: Q15; Q54

¹ Doutorando em Economia pelo CEDEPLAR/UFMG.

² Doutora em Economia pelo CEDEPLAR/UFMG e professora do CEDEPLAR/UFMG.

³ Doutor em Economia pela FEA/USP e professor do CEDEPLAR/UFMG.

⁴ Doutora em Economia pelo CEDEPLAR/UFMG e professora do PPGDE/UFPR.

1. Introdução

O aquecimento do sistema climático é evidente. As alterações observadas não têm precedentes em milênios: a atmosfera e o oceano aqueceram, a quantidade de neve e gelo diminuiu, o nível do mar se elevou (IPCC, 2007, 2014). A consequência são mudanças climáticas, que alteram os padrões de chuva e temperatura e tornam mais frequentes os eventos climáticos extremos, como secas, chuvas intensas, ondas de frio e de calor (PBMC, 2013).

Essas mudanças ameaçam os elementos básicos da vida em todo o mundo: restringem o acesso à água, à comida, à saúde e ao uso da terra (STERN, 2007). Os desastres naturais, cada vez mais frequente e severa, geram um ônus crescente para a sociedade. De acordo com a estimativa de Wahlstrom e Guha-Sapir (2015), esse prejuízo é em torno de US\$ 250 a 300 bilhões por ano na economia mundial. Portanto, o impacto da mudança do clima é global, afetando o sistema social, econômico e natural (IPCC, 2014).

Em relação ao Brasil, algumas mudanças do clima são observadas, como o primeiro furacão observado no Atlântico Sul em 2004, o furacão Catarina, seca de 2012-2017 no semiárido nordestino (considerada a pior da história registrada no Brasil) e o aumento da intensidade das chuvas e estiagens no Sul-Sudeste. No futuro, estudos preveem alterações climáticas e apontam inúmeros impactos. Segundo o PBMC (2013), o semiárido nordestino pode se transformar em região árida, o setor agropecuário sofrerá com o aumento da escassez de água, os sistemas naturais terrestres enfrentarão desmatamento, fragmentação e impactos nos recursos naturais renováveis, além do risco de redução das áreas cultiváveis e da produção de alimentos.

Dessa forma, espera-se um potencial impacto das mudanças climáticas sobre a economia brasileira. Esse impacto, de acordo com Margulis e Dubeux (2010), resultaria em uma perda do PIB estimada entre R\$ 719 bilhões a R\$ 3,6 trilhões se os custos forem antecipados até 2050, considerando um valor presente com uma taxa de desconto de 1% ao ano. Ferreira Filho e Moraes (2014) projetaram os impactos dos efeitos climáticos na agricultura, e os resultados indicaram um efeito econômico relativamente pequeno sobre o PIB brasileiro, com uma redução de 0,28% e 1,12% em 2020 e 2070, respectivamente. No entanto, eles constataram efeitos significativos em nível regional, com a região Nordeste sendo a mais afetada, apresentando uma redução de 4,07% (em 2020) e 6,13% (em 2070) do PIB. Domingues, Magalhães e Ruiz (2016) estimaram uma perda do PIB nordestino de R\$ 36,75 bilhões (a preços de 2005) em 2050. Para a economia de Minas Gerais, a FIPE-FEAM (2011) estima os custos em valor presente (preço de 2008) entre R\$ 155 bilhões e R\$ 446 bilhões, aplicando uma taxa de desconto intertemporal de 1% ao ano.

Nesse contexto, a região da Amazônia Legal brasileira (AML) tem uma importância fundamental como objeto de estudo quando se trata das questões de aquecimento global devido à sua vasta reserva de diversidade de biomas e à floresta amazônica. Essa região cobre cerca de 60% do território brasileiro e abriga 21 milhões de habitantes. É composta pela região Norte do Brasil e uma parte do Nordeste (parte do Maranhão) e do Centro-Oeste (estado do Mato Grosso). É predominantemente formada pela floresta tropical amazônica, mas também abriga o cerrado e o pantanal. É uma região importante para mitigar as mudanças climáticas, pois absorve um volume significativo de gás carbônico através da floresta e desempenha um papel fundamental como regulador do clima global, regional e local.

Portanto, projetar os impactos econômicos das mudanças climáticas nas regiões da AML, incorporando a questão da mudança de uso da terra, torna-se relevante. A trajetória da economia pode causar o desmatamento por meio da mudança de uso da terra (CARVALHO; DOMINGUES; HORRIDGE, 2017), e o desmatamento na AML retroalimenta o processo de aquecimento global. Dessa forma, compreender como a mudança do clima afeta a economia e,

consequentemente, a mudança no uso do solo é fundamental para implementar políticas de mitigação e adaptação.

Para tanto, este artigo adotou a estratégia de integração de um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) com os resultados de um modelo econométrico, utilizada em Faria e Haddad (2017). O procedimento metodológico é dividido em duas etapas: primeiro, a estimação das variações de produtividade agrícola em resposta a fatores climáticos com o modelo de uso da terra (modelo econométrico); em seguida, a projeção dos efeitos climáticos na economia da AML com o modelo REGIA (modelo EGC). O recorte temporal escolhido é de 2021-2080, e os cenários climáticos são baseados nos RCP 8.5 e RCP 4.5 do AR5 do IPCC. Além desta introdução, este artigo é composto por mais três seções. A primeira apresenta a metodologia, descrevendo o modelo de uso da terra e o modelo REGIA. A segunda expõe as estratégias das simulações bem como os resultados. A última, tecem-se as considerações finais.

2. Metodologia

2.1 Modelo de uso da terra

O modelo de uso da terra adotado neste trabalho segue a metodologia utilizada por Assunção & Chein (2016) e Tanure (2023). Esse modelo permite estimar a sensibilidade da produtividade agrícola a fatores climáticos, como temperatura e precipitação, e simular os efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade das culturas em nível municipal.

2.1.1 Base teórica

O modelo de uso da terra adotado aqui parte de uma economia agrária com M municípios, em que cada município $m \in M$ possui um produtor agrícola representativo que decide a alocação de terra L_m entre $k \in K$ cultivos distintos. A quantidade de produção Q_{mk} depende da quantidade de terra T_{mk} , de insumos X_{mk} e de um vetor de características geográficas \mathbf{C}_m , representada pela seguinte expressão:

$$Q_{mk}(\mathbf{C}_m) = \gamma_{mk} f^k(T_{mk}, X_{mk} | \mathbf{C}_m) \quad (1)$$

onde γ_{mk} é um vetor de produtividade da cultura k no município m , e a função segue $f_T^k > 0$, $f_X^k > 0$, $f_{TT}^k \leq 0$ e $f_{XX}^k \leq 0$.

Assim, o problema de maximização de lucro do agricultor representativo é composto por duas etapas. Na primeira etapa, dado o preço unitário dos insumos w_m , o agricultor representativo toma sua decisão de alocação dos insumos, escolhendo a quantidade de insumo que maximiza o lucro com a cultura k no município m para cada quantidade de terra L_{mk} , definida da seguinte forma:

$$V_{mk}(T_{mk} | \mathbf{C}_m) = \max_{X_{mk}} [\gamma_{mk} f^k(T_{mk}, X_{mk} | \mathbf{C}_m) - w_m x_{mk}]$$

Na segunda etapa, o agricultor representativo toma sua decisão de alocação de terra, escolhendo a quantidade que maximiza o retorno agregado, sujeito à restrição de terra, dada pela seguinte expressão:

$$\max_{\{T_{mk}\}} \Pi_m(\mathbf{C}_m) = \sum_k V_{mk}(T_{mk} | \mathbf{C}_m), \text{ s. a } \sum_k T_{mk} = T_m$$

As condições de primeira ordem do problema acima são expressas por:

$$V'_{mk}(T_{mk} | \mathbf{C}_m) \geq V'_{mk'}(T_{mk} | \mathbf{C}_m), \forall k, k' > 0 \in K \quad (2)$$

A equação (2) vale com igualdade sempre que $T_{mk}^* > 0$ e com desigualdade estrita sempre que $T_{mk}^* = 0$. Assim, o equilíbrio do modelo é dado pela seguinte igualdade:

$$\sum_k T_{mk}^*(\mathbf{C}_m) = T_m \quad (3)$$

Através das equações (2) e (3), a alocação ótima de terra é definida implicitamente. A mudança no vetor climático \mathbf{C}_m para \mathbf{C}'_m (cenário de mudanças climáticas) afetaria a produtividade agrícola de diferentes culturas, o que implicaria na alocação ótima de terra inicial $T_{mk}^*(\mathbf{C}_m)$ para $T_{mk}^*(\mathbf{C}'_m)$, pois os agricultores transferem as atividades de menor lucratividade relativa para maior lucratividade relativa para maximizar seus lucros.

Para obter a equação que permite capturar os efeitos dos fatores climáticos sobre a produtividade agrícola, considere o vetor de produtividades individuais $\gamma_{m1} = (\gamma_{m1}, \dots, \gamma_{mk})$. Resolvendo o sistema de equações (2) e (3), com a função de produção agrícola da equação (1), é possível obter a função de produtividade para cada cultura no equilíbrio. A função obtida é dada apenas com parâmetros do modelo e é expressa da seguinte forma:

$$Y_{mk}^*(\mathbf{C}_m) = \frac{Q_{mk}^*(\mathbf{C}_m)}{T_{mk}^*(\mathbf{C}_m)} = Y_k(w_m, \gamma_m, \mathbf{C}_m) \quad (4)$$

Assim, a equação (4) permite a estimação dos efeitos dos fatores climáticos (mudança do clima) sobre a produtividade da cultura k no município m .

2.1.2 Especificação e estimação

Para obter o modelo empírico, considere a equação (4). Suponha a hipótese de mobilidade perfeita de fatores produtivos entre os municípios. Isso implica que o preço dos fatores produtivos é igual em todos os municípios da amostra, ou seja, $w = w_m, \forall m$. Portanto, essa hipótese permite a estimação do modelo sem a inclusão dos dados de preços de fatores, e a equação (4) pode ser reescrito da seguinte forma funcional para relação entre produtividade agrícola e fatores climáticos:

$$Y_{mk}^*(\mathbf{C}_m) = Y_k(w, \gamma_m, \mathbf{C}_m) = \exp(\gamma_m + \theta_k(\mathbf{C}_m) + \epsilon_{mk}),$$

em que ϵ_{mk} é um termo de erro idiossincrático. Reescrevendo a expressão acima, temos:

$$\ln Y_{mk} = \gamma_m + \theta_k(\mathbf{C}_m) + \epsilon_{mk}$$

Para possibilitar a estimação da equação acima na ausência de dados em painel, a função é aproximada às características municipais γ_m utilizando as características observáveis \mathbf{X}_m . Assim, obtemos a seguinte equação para a relação entre produtividade agrícola de cultivo k e fatores climáticos:

$$\ln Y_{mk} = \theta_k(\mathbf{C}_m) + \beta'_k \mathbf{X}_m + \epsilon_{mk} \quad (6)$$

O sistema de equações acima apresenta $cov(\epsilon_{mk}, \epsilon_{mk'})$ diferente de zero, pois choques que afetam cultura k provavelmente se correlacionam com choques que afetam outra cultura k' . Nesse caso, deve ser utilizado o método de SUR (*Seemingly Unrelated Regression*) para recuperar a sensibilidade. Porém, como \mathbf{C}_m e \mathbf{X}_m são iguais para todas as culturas, esse método será equivalente à estimação por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). No trabalho similar, Féres, Reis e Speranza (2009) também utilizam a estimação por MQO, ponderada pela área dos estabelecimentos agrícolas.

Por fim, os polinômios quadráticos da temperatura e da precipitação foram incluídos na estimação da equação (6) para capturar a não-linearidade (MENDELSON; NORDHAUS; SHAW, 1994). Isso representa a hipótese de que os valores extremos destas variáveis tendem a prejudicar a produção agrícola. Além disso, para capturar a questão de sazonalidade, as variáveis climáticas são organizadas em médias semestrais, pois cada cultura possui produtividade distinto para cada período do ano (FÉRES; REIS; SPERANZA, 2009).

2.1.3 Base de dados e cenários climáticos

As culturas selecionadas neste trabalho são onze: algodão herbáceo, arroz em casca, café em grão, cana-de-açúcar, frutas cítricas, fumo em folha, mandioca, milho em grão, outros da lavoura, soja em grão e “trigo e cereais”. Esta escolha foi feita para a compatibilizar com os setores agrícolas disponíveis no REGIA.

A principal fonte de dados é o Censo Agropecuário 2006 do IBGE, compatível com o ano base do REGIA. A partir desses dados, foram construídos os indicadores de produção agrícola e área de estabelecimento agrícola para $k \in K$ cultivos e $m \in M$ municípios do Brasil. Essa mesma base de dados foi utilizada para construção de variáveis de controle como indicadores de uso de fatores primários (capital e trabalho). O capital é representado pelo logaritmo natural do valor de capital (veículos, tratores, máquinas e implementos) por hectare. Já o trabalho é representado pelo logaritmo natural do número de trabalhadores por hectare. Outras variáveis de controle também foram incluídas, como área de benfeitorias/caminhos, capital social (proporção de entidade de classe e cooperativa no município) e indicador de instalações representado pelo logaritmo natural de benfeitorias, instalações e prédios. Não foram utilizados variáveis de *dummy* para tipos de solo, pois, segundo Assunção e Chein (2016), os dados de localização geográficos mostraram-se mais importantes aos efeitos marginais, enquanto as características do tipo de solo mostraram-se menos relevantes. Portanto, os dados geográficos foram incluídos como controles na análise empírica. Esses dados são variáveis de altitude, latitude e longitude, obtidos na base de dados do Ipeadata.

A produtividade da cultura k é definida como o valor da produção monetária dividido pela área de terra utilizado pelo essa cultura, sendo expressa da seguinte maneira:

$$Y_m = \frac{\text{Valor da produção de } k \text{ em } m}{\text{Área de cultura } k \text{ em } m}$$

Em relação aos dados climáticos, a precipitação acumulada (mm) e a temperatura média (°C) foram utilizadas para criar os cenários climáticos. Os dados climáticos observados (históricos) foram obtidos a partir da base de dados de *Terrestrial Air Temperature and Precipitation* descritos em Willmott e Matsuura (2012). Essas são estimativas mensais de temperatura e precipitação para todas regiões da Terra, obtidas a partir de interpolações de estações climáticas com resolução de 0.5 graus (dados em *grids*). O período selecionado foi de 1971 a 2005, anos anteriores ao Censo Agropecuário 2006 do IBGE. A partir desses dados, foram calculadas as médias semestrais para 11 cultivos nos seguintes períodos: janeiro a junho (referentes ao período de primavera e verão); e julho a dezembro (referentes ao período de outono e inverno). Por fim, foram municipalizadas a partir de uma média ponderada pela distância dos dados climáticos dos quatro *grids* ao redor do centroide de cada município.

Em relação aos cenários futuros de mudança climática, as projeções de temperatura e precipitação⁵ do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foram utilizadas. Esses dados são fornecidos em projeções mensais nos períodos de 2006-2040, 2040-2070 e 2071-2099, calculados com o modelo climático regional Eta-CPTEC do INPE e são fornecidos em resolução espacial 20km x 20km. Os períodos escolhidos para este artigo são 2021-2050 e 2051-2080, ambos com 30 anos⁶. Os cenários considerados nestas projeções são RCP 8.5 e RCP 4.5 do AR5 IPCC. O RCP 8.5 é o cenário mais pessimista, resultando em um aumento da

⁵ Essa base de dados é fornecida em repositório de dados de projeções climáticas futuras do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE). Disponível em: <http://dadosclima.ccst.inpe.br>.

⁶ Segundo a definição do CEPTEC/INPE, o clima constitui o estado médio e o comportamento estatístico da variabilidade dos parâmetros do tempo (temperatura, chuva, vento etc.) sobre um período, suficientemente, longo de uma localidade. Assim, o período recomendado é de 30 anos

temperatura média global de cerca de 4°C no final do século XXI. Já o RCP 4.5 é o cenário mais otimista, com uma projeção do aquecimento global de cerca de 1°C. O primeiro cenário corresponde aproximadamente ao cenário A2 no AR4 do IPCC, no qual o forçamento radioativo cresce quase linearmente com valores elevados durante o século 21, enquanto o outro cenário corresponde aproximadamente ao cenário B1 no AR4 do IPCC, no qual o forçamento radioativo cresce quase linearmente até o ano 2060 e depois essa taxa de crescimento diminui até o final do século (CHOU *et al.*, 2014).

Os municípios com uso de terra inferior a 100 hectares foram excluídos, pois a produtividade de uso da terra extensivo é diferente do uso intensivo. Também foram excluídos aqueles que não possuíam dados de uso da terra ou dados climáticos. Assim, a amostra final utilizada para a estimação é composta por 5323 municípios.

2.2 Modelo REGIA

O REGIA, desenvolvido por Carvalho (2014), foi construído especialmente para analisar a economia da AML. Trata-se de um modelo de EGC dinâmico inter-regional com módulo de uso da terra, abrangendo 27 setores e 30 mesorregiões da AML, além do restante do Brasil. O modelo será apresentado resumidamente a seguir, pois nenhuma alteração na estrutura teórica ou base de dados foi implementada. Para maiores detalhes consultar Carvalho (2014).

A estruturação teórica é semelhante ao modelo TERM (HORRIDGE *et al.*, 2005). As relações de demanda e oferta assumem as hipóteses de otimização e as condições de equilíbrio de mercado. A produção setorial adota a hipótese de minimização de custos sujeitos à tecnologia de produção com retornos constantes de escala. As combinações de insumos intermediários e fator primário seguem proporção fixa (função Leontief), mas há substituição via preços entre bens domésticos (inclusive entre as regiões) e importados na composição dos insumos, seguindo uma função CES. A substituição entre os fatores primários (capital, trabalho e terra) também é determinado pela função CES, mas a alocação do fator terra ocorre apenas na agricultura e na pecuária. Em relação à demanda, há uma família representativa para cada região. O consumo entre produtos domésticos e importados é determinado pela especificação CES, na qual os bens de diferentes origens são tratados como substitutos imperfeitos (hipótese de Armington). As preferências de consumo são determinadas por um sistema combinado de função de utilidade CES/Klein-Rubin.

O diferencial do REGIA é a incorporação do módulo de uso da terra, também conhecido como ILUC (*indirect land use change*). O uso da terra é dividido em quatro tipos: a) lavoura, destinada à agricultura; b) pasto, utilizado pela pecuária; c) floresta plantada, usada pela silvicultura e exploração florestal; d) floresta natural e demais áreas. As áreas da terra são modeladas separadamente para cada região. A demanda por terra é determinada pela remuneração do fator em cada setor, seguindo uma função CET. Se a remuneração da terra para o setor i for superior à média da região, a terra será alocada em direção ao cultivo i . No lado da oferta, há mobilidade entre as diferentes categorias de uso no período entre o ano t e ano $t + 1$. O processo de conversão é determinado pela *matriz de transição*. Essa matriz contém as informações sobre o grau de conversibilidade entre diferentes tipos de uso da terra. Foi construída adotando a metodologia de Ferreira Filho e Horridge (2014), e calibrada com os dados do TerraClass do PRODES/INPE e do Censo Agropecuário 1995 e 2006.

A base de dados do modelo foi regionalizada a partir da matriz de insumo-produto de 2005 do IBGE e complementada pelos dados defracionados do Censo Agropecuário 2006. Outras fontes de dados (IBGE, RAIS, SECEX, PIA e POF), também, foram utilizadas para construir o modelo. O resultado é um modelo com total consistência de base de dados, coerente com a teoria econômica.

3. Simulações e Resultados

3.1 Simulação no modelo de uso da terra

O objetivo da simulação do modelo de uso da terra é obter as estimativas dos impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade dos cultivos para cada mesorregião considerada no REGIA. Para tanto, foi adotado método de simulação proposto por Assunção e Chein (2016).

O primeiro passo foi estimar a produtividade agrícola do cultivo k no município m para o período base do cenário climático (C_m), utilizando a equação (6) definida na seção anterior. Em seguida, estima-se a mesma equação considerando as projeções climáticas para o período futuro (\hat{C}_m). A variação de produtividade agrícola decorrente das mudanças climáticas é dada pela seguinte expressão: $\Delta E(\ln Y_{mk}) = [\theta_k(\hat{C}_m) + \beta'_k X_m] - [\theta_k(C_m) + \beta'_k X_m]$

A Tabela 1 mostra os coeficientes estimados do clima (temperatura e precipitação) para 11 culturas agrícolas selecionadas. Os resultados indicam claramente a existência das heterogeneidades dos efeitos marginais, tanto nos sinais quanto nas magnitudes entre diferentes cultivos, sugerindo a existência dos efeitos distintos do clima sobre a produtividade de cada cultivo. Algumas significâncias são fracas entre as culturas, mas ainda são razoáveis, e apenas o cultivo de cana-de-açúcar, em especial, apresenta a significância estatística bastante baixa. Porém, o cultivo mais importante da AML, “outros da lavoura”⁷, apresenta alta significância dos parâmetros para a temperatura e precipitação. Os resultados das estimações por cultivo para AML são apresentados na subseção seguinte.

3.2 Simulação no modelo REGIA

A simulação no modelo de EGC dinâmico requer dois cenários: o cenário base e cenário sob impactos/efeitos. O cenário base representa a trajetória econômica sem a interferência dos efeitos externos, servindo como referência para comparação com o cenário econômico sob efeitos externos (efeitos das mudanças climáticas neste caso). Dessa forma, os resultados são reportados na forma de desvios em relação ao cenário base.

Os seguintes dados foram adotados para o cenário base: os dados de Carvalho (2014) para o período 2006-2011; os dados das contas nacionais do IBGE para 2012-2016; as projeções do Banco Central do Brasil para 2017-2080. As taxas adotadas a partir de 2020 são constantes ao ano, sendo os valores de 2021 a 2080 delimitados em taxas acumuladas quinquenais. A taxa de crescimento populacional do período 2012-2016 segue os dados do IBGE e, nos anos subsequentes, é fixada em 1% ao ano. A Tabela 2 apresenta as variações percentuais adotadas na simulação do cenário base.

Tabela 2 - Valores adotados para a construção do cenário base, 2012-2080 (var. % real)

Indicadores	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2080
PIB	1.9	3.0	0.1	-3.8	-3.6	0.53	1.64	2.06	2.18
Consumo das Famílias	3.5	3.5	1.3	-3.9	-4.2	0.53	1.64	2.06	2.18
Gasto do Governo	2.3	1.5	1.2	-1.1	-0.6	0.53	1.64	2.06	2.18
Investimento	0.8	5.8	-4.5	-13.9	-10.2	0.53	1.64	2.06	2.18
Exportações	0.3	2.4	-1.1	6.3	1.9	0.53	1.64	2.06	2.18
Crescimento populacional	0.93	0.9	0.86	0.83	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE e BCB.

⁷ “Outros da lavoura” é composto por restantes dos cultivos que não foram contemplados explicitamente no REGIA como cebola, batata, feijão, melancia, tomate etc.

Tabela 1 – Produtividade por cultivos e fatores climáticos (período de 1971-2005)

	Variável Dependente: log (Produtividade Agrícola por cultivo <i>k</i>)										
	Arroz em casca	Milho	Trigo e Cereais	Cana de açúcar	Soja em grão	Outros da lavoura	Mandioca	Fumo em folha	Algodão herbáceo	Frutas cítricas	Café em grão
Temperatura (Primavera e Verão)	0.819* (0.420)	-0.517*** (0.174)	-0.285 (0.640)	-0.036 (0.293)	-0.265* (0.160)	-2.667*** (0.251)	0.442 (0.276)	-0.813 (0.634)	0.310 (1.175)	1.871** (0.828)	-2.053*** (0.522)
Temperatura (Outono e Inverno)	-0.168 (0.134)	0.082 (0.076)	0.121 (0.354)	-0.079 (0.123)	0.022 (0.081)	1.465*** (0.105)	-0.056 (0.105)	0.466* (0.263)	0.087 (0.438)	-0.355 (0.343)	0.997*** (0.273)
Temperatura ao quadrado (Primavera e Verão)	-0.016* (0.009)	0.010*** (0.004)	0.007 (0.015)	0.004 (0.006)	0.006 (0.004)	0.050*** (0.005)	-0.008 (0.006)	0.018 (0.014)	-0.007 (0.023)	-0.037** (0.018)	0.042*** (0.011)
Temperatura ao quadrado (Outono e Inverno)	0.002 (0.003)	-0.002 (0.002)	-0.005 (0.010)	-0.000 (0.003)	-0.000 (0.002)	-0.029*** (0.002)	-0.000 (0.002)	-0.012* (0.007)	-0.001 (0.010)	0.006 (0.008)	-0.021*** (0.007)
Precipitação (Primavera e Verão)	-0.010*** (0.003)	0.011*** (0.001)	-0.014** (0.006)	0.004* (0.002)	0.011*** (0.004)	0.008*** (0.001)	0.004*** (0.001)	0.006 (0.004)	0.035*** (0.006)	0.008 (0.005)	0.003 (0.003)
Precipitação (Outono e Inverno)	0.004 (0.003)	0.003** (0.001)	-0.015* (0.008)	-0.002 (0.002)	0.011*** (0.003)	0.004*** (0.001)	0.006*** (0.001)	0.019*** (0.003)	0.012* (0.007)	0.007** (0.003)	0.003 (0.004)
Precipitação ao quadrado (Primavera e Verão)	0.000*** (0.000)	-0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000** (0.000)	-0.000*** (0.000)	0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000*** (0.000)	-0.000* (0.000)	-0.000 (0.000)
Precipitação ao quadrado (Outono e Inverno)	-0.000* (0.000)	-0.000 (0.000)	0.000** (0.000)	0.000* (0.000)	-0.000*** (0.000)	0.000 (0.000)	-0.000** (0.000)	-0.000*** (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000** (0.000)	-0.000 (0.000)
Observações	2,718	5,142	732	3,633	1,359	5,312	4,452	807	429	1,963	1,703
R-Quadrado	0.622	0.460	0.311	0.064	0.217	0.217	0.280	0.533	0.736	0.049	0.419

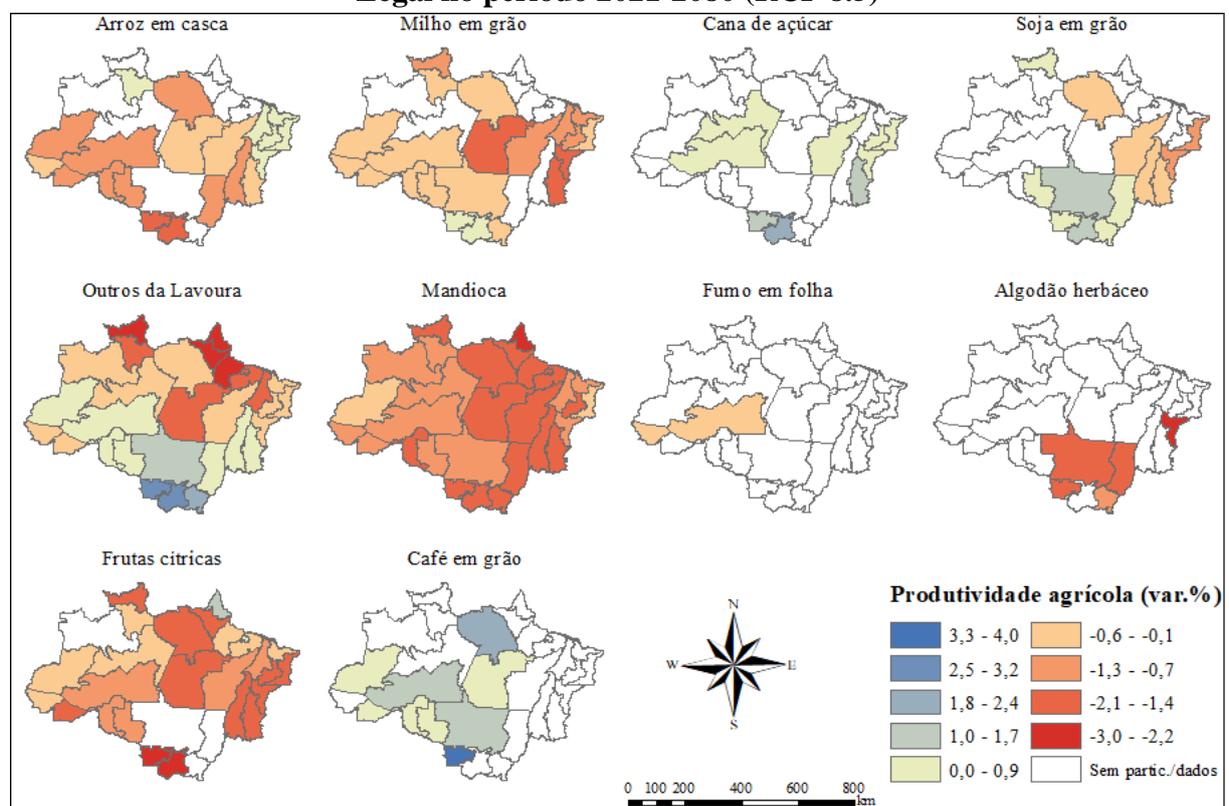
Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo econométrico. Nota: Erro-padrão robusto a heterocedasticidade entre parênteses. *** p-valor <0.01, ** p-valor <0.05, * p-valor <0.

Em relação às taxas de desmatamento, foram utilizadas as informações de Carvalho (2014). Para anos subsequentes (2012-2016), foram calculadas a partir dos dados do Sistema de Monitoramento do Desmatamento na AML do PRODES/INPE. Os valores das taxas de desmatamento são apresentados por mesorregião como a área desmatada em relação à área de floresta natural e demais usos.

Os choques (*input* para alimentar o modelo) adotados para simular o cenário das mudanças climáticas são as variações de produtividade agrícola. Esta escolha é a mais difundida, dado que o setor agrícola é um dos setores mais sensíveis a fatores climáticos e relativamente mais fácil de incorporar ao modelo pela disponibilidade de dados em relação aos demais setores (ex: queda de produtividade, perda das áreas aptas para cultivo e conversão de terra). Vários estudos (DOMINGUES; MAGALHÃES; RUIZ, 2016; FARIA; HADDAD, 2017; FERREIRA FILHO; MORAES, 2014) aplicaram choques na agricultura como forma de mensurar os impactos econômico da mudança do clima. É importante lembrar que essas simulações não incorporam outros efeitos, como inundações, secas, savanização, aumento do nível do oceano, entre outros. Portanto, os resultados captam apenas uma parcela dos impactos da mudança do clima.

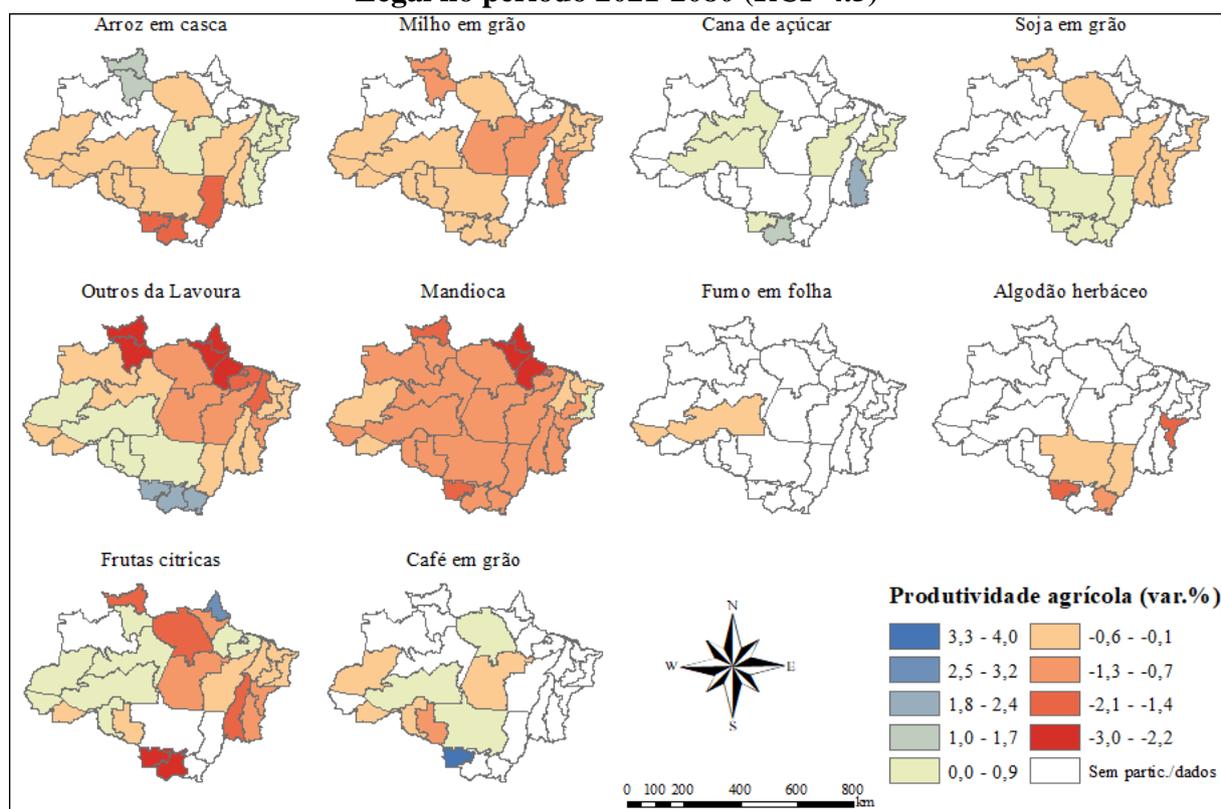
Os choques foram estimados pelo modelo de uso da terra na primeira etapa metodológica. Os resultados das estimações em nível municipais foram agregados, ponderados pela áreas agrícolas, para cada regiões do REGIA por cultivo. Em seguida, os valores foram convertidos em taxas quinquenais, resultando em seis taxas quinquenais uniformes para cada período (2021-2050 e 2051-2080), ou seja, doze taxas quinquenais no total para cada cenário climático. Por fim, alguns ajustes foram adotados: exclusão dos choques dos cultivos de baixa representatividade (participação inferior a 1% na região) e a aplicação de limites para valores extremos.

Figura 4 - Variação média anual de produtividade agrícola por cultivo na Amazônia Legal no período 2021-2080 (RCP 8.5)



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da simulação do modelo de uso da terra.

Figura 5 - Variação média anual de produtividade agrícola por cultivo na Amazônia Legal no período 2021-2080 (RCP 4.5)



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da simulação do modelo de uso da terra.

Os choques aplicados nas simulações encontram-se nas Figura 4 e 5. Estas figuras ilustram a variação percentual anual de produtividade média da terra agrícola por cultivos para período 2021-2080 nos cenários climáticos RCP 8.5 e RCP 4.5, respectivamente. No REGIA, foram aplicados em taxas quinquenais uniformes para dois períodos (2021-2050 e 2051-2080), mas nas figuras estão expressos em taxas anuais para facilitar a identificação dos impactos na AML por mesorregiões. “Trigo e cereais” foi excluído nessas figuras por não apresentar choques para as regiões da AML, mas o choque foi aplicado para o resto do Brasil, uma vez que os efeitos climáticos afetam todo o território nacional. As figuras mostram que as variações de produtividade agrícola têm padrões bastante heterogêneos por cultivo e por mesorregião, destacando a importância de incorporar os impactos diferenciados em cada cultivo e região.

O fechamento refere-se à definição dos conjuntos de variáveis endógenas e exógenas nas simulações. As hipóteses sobre o funcionamento da economia no EGC são determinadas a partir da definição destas variáveis. As principais hipóteses adotadas são seguintes: consumo regional segue a renda regional; os gastos do governo seguem a renda das famílias; o fator terra para “florestas naturais e demais usos” é exógena para as regiões do modelo que não possuem floresta tropical, e a capacidade de expansão da agropecuária por desmatamento é baixa. Neste trabalho, o fechamento está dividido em duas partes.

A primeira parte refere-se ao período “histórico” (2006-2016). As variáveis exógenas são os dados observados, como os indicadores macroeconômicos, a taxa de crescimento populacional e a taxa de desmatamento. As variáveis endógenas são salário nacional, demanda do governo, a quantidade exportada, o uso da terra e as variáveis de deslocamento para a taxa de retorno bruta.

A segunda parte corresponde ao período de projeção (2017-2080). Os indicadores macroeconômicos observados passam a ser endógenos, assim como a taxa de desmatamento e o uso da terra. Em ambas partes, a taxa de crescimento populacional e o índice de preços dos importados são exógenos, e o índice de preços ao consumidor é escolhido como numerário.

3.2.1 Resultados das simulações no REGIA

Os valores dos resultados a seguir representam a variação percentual acumulada e devem ser interpretados como desvios em relação ao cenário base. As projeções para o Brasil e o resto do Brasil, embora tenham sido calculadas pelo REGIA, não serão reportados, uma vez que o Resto do Brasil no modelo é uma região única. Essa região é completamente distinta em termos econômicos, climáticos, ambientais, o que significa que um valor médio de choques de produtividade e os resultados associados a esse choque não capturam adequadamente os efeitos climáticos sobre essa região ampla e heterogênea. No entanto, o choque médio sobre a região (Resto do Brasil) foi considerado para evitar possíveis vazamentos entre as regiões que recebem choques e aquelas que não recebem. Apesar de a mudança climática ter repercussões em todo o país, o foco principal deste estudo será a região da AML.

3.2.1.1 Impactos das mudanças climáticas nos indicadores econômicos regionais

A Tabela 3 apresenta os resultados do impacto das mudanças climáticas, em ambos cenários climáticos (RCP 8.5 e RCP 4.5), sobre os principais indicadores econômicos da AML. De acordo com as simulações, as mudanças climáticas causariam impacto negativo em todos os principais indicadores econômicos da AML no período de 2021-2080. A AML sofreria uma redução do PIB real de 1,92%, no cenário RCP 8.5 e de 1,68%, no cenário RCP 4.5. Se os custos das mudança climáticas na AML até 2080 fossem antecipados para hoje (com o PIB de 2012 como referência) a uma taxa de desconto intertemporal de 1,0% a.a., o custo em termos de PIB ficaria em torno de R\$ 53,2 bilhões (RCP 8.5) a R\$ 48,7 bilhões (RCP 4.5), o que representaria entre 14% a 13% do PIB da AML em 2012.

Tabela 3 - Impacto das Mudanças Climáticas sobre os indicadores econômicos da Amazônia Legal - Cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 (var. % acumulada, 2021-2080)

Indicadores	2021-2080	
	RCP 8.5	RCP 4.5
PIB real	-1,92	-1,68
Consumo das Famílias	-0,86	-0,82
Investimentos	-2,94	-2,82
Exportações	-0,71	-0,90
Emprego	-0,92	-0,87

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações com o modelo REGIA.

A principal causa dessa redução do PIB real é a queda do nível de atividade da agricultura, provocada pela perda de produtividade agrícola devido aos efeitos climáticos. De acordo com os mecanismos do modelo, a redução de produtividade da terra implica em uma maior necessidade de uso desse fator para manter pelo menos o mesmo nível de produção. Nesta condição, o preço relativo do fator terra aumenta e a demanda por outros fatores de produção, como trabalho, capital e insumos intermediários, tende a retrair devido à diminuição dos recursos disponíveis para adquiri-los, já que uma parcela maior de recursos precisa ser alocada para o fator terra. Como resultado, a estrutura de custos das firmas sofre mudanças, tornando os produtos domésticos menos competitivos e impactando negativamente o nível de exportações. Além disso, a redução na demanda por fatores primários diminui a renda das famílias e das firmas, desestimulando o consumo de bens intermediários e finais. Por fim, a contração do consumo pode levar a uma redução nos investimentos e impactar negativamente

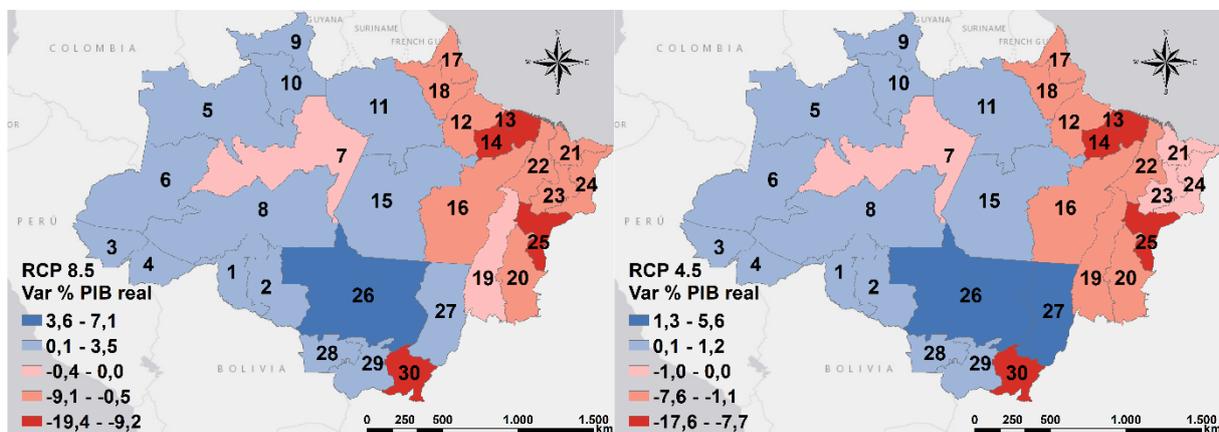
o nível de emprego e produção da economia. Consequentemente, os indicadores econômicos apresentados na Tabela 3, como PIB real, consumo das famílias, investimentos, exportações e emprego, são todos negativos. Entre eles, o investimento é o que apresenta maior redução, da ordem de -2,94% (RCP 8.5) a -2,82% (RCP 4.5).

Sob a perspectiva mesorregional, as regiões não são afetadas homogênea. A Figura 6 ilustra o impacto das mudanças climáticas, em termos de variação percentual acumulada, sobre as atividades econômicas por mesorregião da AML para o período 2021-2080, segundo os cenários RCP 8.5 e RCP 4.5. De forma geral, a economia das mesorregiões da AML sofreria um impacto negativo maior no RCP 8.5 e um impacto menor no RCP 4.5. Esse padrão se repete para os impactos positivos. Essa diferença pode ser explicada pela magnitude das variações de produtividade agrícola, já que os efeitos climáticos tendem a ser mais intensos, tanto para variações positivas quanto negativas, no cenário RCP 8.5 em comparação com o cenário RCP 4.5. Em termos líquidos, o ganho econômico maior não compensaria as perdas para a AML, resultando em uma maior redução do PIB no cenário mais pessimista.

Observa-se também que nem todas as regiões apresentariam impacto negativo. Cerca de metade das mesorregiões apresentaram aumento do PIB real em ambos cenários. O ganho de produtividade de alguns cultivos, como café e cana de açúcar, pode ter amenizado ou até compensado os efeitos das perdas de produtividade em outros cultivos.

Em ambos cenários, as mesorregiões da AML que sofreriam redução do PIB estão localizadas predominantemente na Amazônia Oriental⁸. A projeção de clima mais quente e mais seco no Leste da Amazônia (PBMC, 2013) pode ter contribuído para esse resultado. Por outro lado, a economia das mesorregiões da Amazônia Ocidental se beneficiaria com impacto das mudanças climáticas, com exceção do Centro Amazonense.

Figura 6 - Impacto das mudanças climáticas sobre o PIB real por mesorregiões da Amazônia Legal nos cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 (var. % acumulada em 2021-2080)



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações do modelo REGIA.

Especificamente, as regiões que sofreriam maior dano econômico são o Nordeste Paraense, o Sudeste Mato-grossense, o Sul Maranhense e a Metropolitana de Belém. Em ambos cenários climáticos considerados, o Nordeste Paraense apresentaria a maior queda de atividade econômica dentre todas as regiões da AML, indicando uma redução do PIB entre 19,43% e 17,60% para o período de 2021-2080 em relação ao cenário base, nos cenários RCP 8.5 e RCP 4.5, respectivamente. Essas reduções são decorrentes da elevada taxa negativa de produtividade média agrícola agregada e da alta participação da agricultura na economia desta região (cerca

⁸ A Amazônia Oriental é composta pelos seguintes estados: Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso. E a Amazônia Ocidental é constituída pela área abrangida pelos estados do Amazonas, Acre e territórios de Rondônia e Roraima.

de 52,9%). Os setores responsáveis pelo impacto negativo mais proeminente são a mandioca e “outros da lavoura”, que além de apresentarem quedas de produtividade mais intensas no cenário simulado, têm um peso maior na atividade agrícola dessa região. No caso do Sudeste Mato-grossense, as projeções indicam quedas do PIB de 13,58% (RCP 8.5) e 9,19% (RCP 4.5) em relação ao cenário base. A principal causa decorre da queda significativa de produtividade do algodão, que representa 87,3% da agricultura local. Além disso, a agricultura é responsável por 61,2% do nível de atividade da região.

Em contraste, a região do Sul Maranhense, embora apresente peso menor da agricultura na economia em relação aos casos anteriores (cerca de 28%), sofreria uma perda significativa do PIB da ordem de -10,55% (RCP 8.5) e -7,7% (RCP 4.5). Esse impacto é devido às reduções de produtividade das principais atividades agrícolas da região, soja e algodão.

Por outro lado, os efeitos climáticos causariam impacto positivo significativo no PIB do Norte Mato-grossense e do Nordeste Mato-grossense. O aumento do PIB no Norte Mato-grossense chegaria a 7,08% (RCP 8.5) e 5,58% (RCP 4.5). Esse ganho econômico pode ser explicado pela queda fraca de produtividade agrícola agregada e pelo aumento da produtividade de alguns cultivos, como a soja, que tem uma participação significativa na agricultura da região. Já os resultados para o Nordeste Mato-grossense indicam aumento do PIB de 3,49% (RCP 8.5) a 3,2% (RCP 4.5), favorecido também pela fraca queda da produtividade agrícola em relação às demais regiões.

Todos resultados esses não necessariamente estão ligados a atividade agrícola e à sua importância na economia. A região Metropolitana de Belém se enquadra neste caso, uma vez que possui apenas 9% do peso da agricultura em sua economia, mas é afetada significativamente nas projeções, com perdas do PIB de -9,21% (RCP 8.5) e -8,42% (RCP 4.5).

3.2.1.2 Impactos das mudanças climáticas no uso da terra

Nesta seção, procurou-se avaliar os potenciais efeitos das mudanças climáticas sobre as áreas de lavoura, pasto, floresta plantada e floresta natural na AML, uma vez que a queda de produtividade agrícola da terra, decorrente da mudança do clima, pode alterar significativamente a estrutura produtiva e o padrão de uso da terra da região.

Tendo em vista a heterogeneidade espacial da AML, incluindo os efeitos climáticos, espera-se impactos regionais distintos para cada mesorregião. Assim, a análise dos resultados por mesorregiões permite observar como os impactos da mudança do clima afetam cada região individualmente.

A Tabela 4 reporta as variações das áreas (em milhares de hectares) de lavoura, pasto, floresta plantada e floresta natural para o período 2021-2080 em ambos cenários climáticos (RCP 8.5 e RCP 4.5). Segundo os mecanismos do modelo, a queda de produtividade da terra agrícola causada pelos efeitos climáticos pressiona agricultores a usar mais terra para compensar a perda de produtividade agrícola, levando a um processo de conversão de outros usos da terra em direção à lavoura, uma vez que fator tecnológico se mantém constante. Como a área total de uma determinada mesorregião não pode variar, o aumento de um determinado uso da terra implica necessariamente na redução proporcional dos demais usos da terra. Dessa forma, observa-se que a expansão das áreas de agricultura estaria causando a redução das áreas de pasto e/ou florestas na AML. Nota-se maior proporção de perdas nas áreas de floresta natural em relação aos demais usos e, portanto, o aumento da lavoura seria obtido por meio do sacrifício das áreas de florestas naturais.

No nível mesorregional, a sensibilidade de conversão das terras não é homogênea, uma vez que cada região possui elasticidades de oferta da terra e quantidade de terras disponíveis distintas, bem como dinâmica própria de crescimento (CARVALHO, 2014). No entanto, todas

as mesorregiões apresentam expansão das áreas de lavoura, exceto o Sudoeste Mato-grossense. Tanto no cenário RCP 8.5 quanto no cenário RCP 4.5, as mesorregiões que mais expandiriam as áreas de lavouras em hectares seriam Baixo Amazonas e Marajó. No caso do Baixo Amazonas, esse aumento seria de aproximadamente 586 a 545 mil hectares, e no Marajó, a área de lavoura aumentaria cerca de 523 a 455 mil hectares. Em ambas as regiões, a expansão das áreas de lavouras seria direcionada principalmente ao cultivo de mandioca. A explicação para esse resultado está mais relacionada às elasticidades mais altas da oferta da terra nessas mesorregiões e à possibilidade de conversão, conforme a matriz de transição.

Tabela 4 - Impacto das mudanças climáticas sobre uso da terra no RCP 8.5 e RCP 4.5 (em milhares de hectares, valor acumulado de 2021 a 2080 em relação ao cenário base)

Mesorregiões	Lavoura		Pasto		Floresta Plantada		Floresta Natural	
	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5
1- Madeira-Guaporé	91	68	-38	-25	-4	-3	-49	-41
2- Leste Rondoniense	9	33	-3	-21	-2	-2	-4	-10
3- Vale do Juruá	140	106	-16	-12	-4	-3	-119	-91
4- Vale do Acre	248	169	-98	-63	-5	-3	-145	-103
5- Norte Amazonense	48	35	0	0	-1	-1	-46	-34
6- Sudoeste Amazonense	56	57	-3	-3	-2	-1	-51	-53
7- Centro Amazonense	154	73	-17	-8	-10	-3	-128	-63
8- Sul Amazonense	113	83	-25	-21	-3	-1	-84	-61
9- Norte de Roraima	113	103	-14	-13	-2	-1	-97	-89
10- Sul de Roraima	99	96	-16	-16	-3	-2	-80	-78
11- Baixo Amazonas	586	545	-87	-73	-36	-27	-463	-446
12- Marajó	523	455	-18	-16	-29	-24	-476	-415
13- Metropolitana de Belém	23	23	-12	-11	-5	-4	-7	-7
14- Nordeste Paraense	364	349	-194	-182	-69	-66	-102	-101
15- Sudoeste Paraense	273	246	-61	-53	-16	-10	-196	-183
16- Sudeste Paraense	126	74	-105	-65	-25	-13	4	5
17- Norte do Amapá	150	143	-6	-6	-2	-2	-143	-135
18- Sul do Amapá	259	245	-16	-15	-4	-4	-238	-226
19- Ocidental do Tocantins	59	115	-56	-109	-3	-6	0	0
20- Oriental do Tocantins	19	15	-19	-15	0	0	0	0
21- Norte Maranhense	76	43	-36	-20	-7	-4	-33	-19
22- Oeste Maranhense	70	44	-60	-38	-4	-2	-7	-4
23- Centro Maranhense	55	43	-34	-25	-5	-3	-16	-15
24- Leste Maranhense	3	2	-2	-1	-2	-1	0	0
25- Sul Maranhense	11	9	-10	-8	-1	-1	0	0
26- Norte Mato-grossense	242	142	6	46	-5	0	-242	-187
27- Nordeste Mato-grossense	116	96	-32	-17	-1	1	-82	-80
28- Sudoeste Mato-grossense	-12	-1	10	2	0	0	2	-1
29- Centro-Sul Mato-grossense	16	12	-15	-10	-2	-1	0	0
30- Sudeste Mato-grossense	111	85	-98	-75	-13	-10	0	0
Amazônia Legal	4.142	3.508	-1.075	-872	-265	-198	-2.802	-2.438

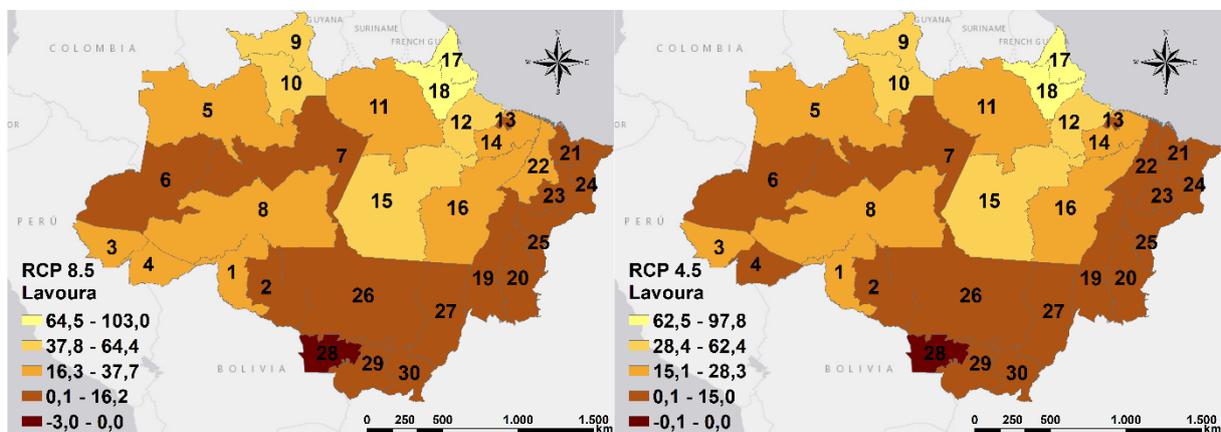
Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações do modelo REGIA.

A Figura 7 ilustra o crescimento percentual acumulado das áreas de lavoura na AML de 2021-2080, segundo os cenários RCP 8.5 e RCP 4.5, em relação ao cenário base. No cenário

RCP 8.5, as regiões com maior expansão das áreas de lavoura seriam Norte do Amapá (região 17; acumulado de 103%) e Sul do Amapá (região 18; acumulado de 93%). Ambas regiões compõem o estado do Amapá. Essas regiões sofreram uma perda significativa de produtividade agrícola, e, portanto, esse resultado é uma forma de compensação dessa perda. No entanto, a variação da produção agrícola nessas regiões ainda foi negativa, ou seja, o aumento da área de lavoura não compensaria a queda acentuada de produtividade da terra. Em relação ao cenário RCP 4.5, os efeitos das mudanças climáticas sobre a lavoura são menos intensos, mas seguem o mesmo padrão e a dinâmica do cenário anterior.

A maior demanda pela lavoura, devido à queda de sua produtividade, provoca aumento da remuneração (preço do fator terra) da lavoura. No entanto, esse aumento do preço não desestimula a expansão das áreas de lavoura, mesmo com o aumento dos custos, porque a queda generalizada da produção agrícola resultante da queda de produtividade permite um aumento significativo no preço desse bem, mantendo o incentivo para expandir a agricultura.

Figura 7 - Variações das áreas de lavouras por mesorregião da Amazônia Legal para o cenário RCP 8.5 e RCP 4.5 - desvio % acumulado em relação ao cenário base, 2021-2080



Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações do modelo REGIA.

Em relação às áreas de pasto, como pode ser visto na Tabela 4, a AML perde cerca de 1 milhão de hectares de terras no setor pecuário no cenário RCP 8.5 até 2080, e 872 mil hectares no cenário RCP 4.5. Em geral, a maioria das mesorregiões consideradas apresenta redução nas áreas de pasto. Entre os fatores de uso da terra (lavoura, pasto e floresta plantada⁹), o pasto é o que sofre maior impacto negativo. Segundo Carvalho (2014), o comportamento da quantidade de áreas para cada uso da terra no modelo REGIA é determinado principalmente pela variação da remuneração dos usos. Portanto, a principal causa da diminuição das áreas de pasto pode ser atribuída à maior perda da remuneração do pasto em comparação com os outros usos.

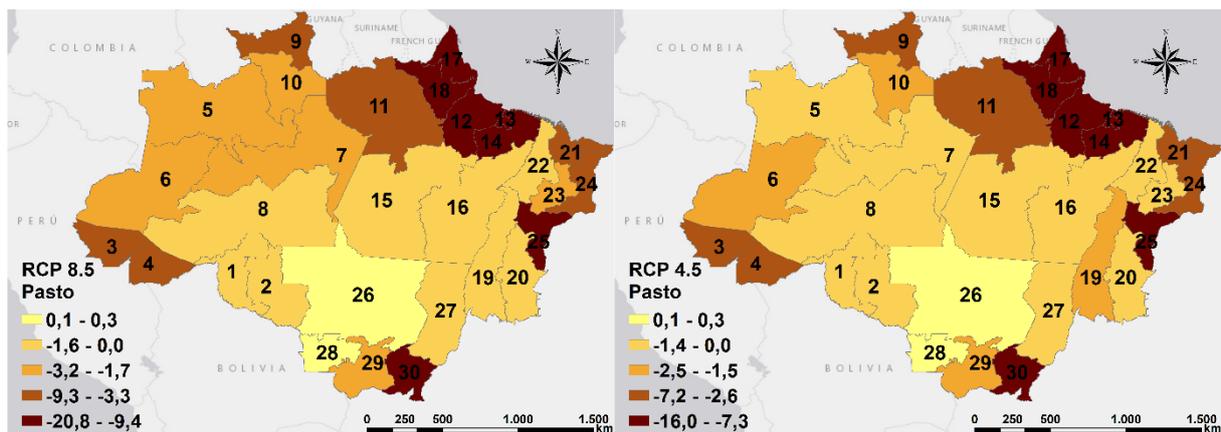
A mesorregião que se destaca com a maior perda de área de pasto é o Nordeste Paraense, com -194 mil hectares (RCP 8.5) e -182 mil hectares (RCP 4.5) acumulados até 2080 em relação ao cenário base. Nesse caso, ao contrário do caso geral, a proporção de conversão de pasto para lavoura foi maior do que a de floresta para lavoura. Isso ocorre devido ao menor peso da pecuária na economia do Nordeste Paraense (apenas 5,4%) em comparação com os outros setores de uso da terra (agricultura 52,9%; extrativismo e silvicultura 21,9%), o que desestimula o uso do pasto mesmo com a queda de produtividade da terra na lavoura.

A Figura 8 mostra o impacto das mudanças climáticas sobre as áreas de pasto em termos de variação percentual acumulada em relação ao cenário base para o período 2021-2080 nos

⁹ Vale ressaltar que as áreas de “floresta natural” não são utilizadas como fator primário de terra por nenhum setor da produção no modelo REGIA.

cenários RCP 8.5 e 4.5. De acordo com as figuras, as mesorregiões que apresentam maior impacto negativo são Sudeste Mato-grossense (região 30), Nordeste Paraense (região 14), Marajó (região 12), Norte do Amapá (região 17), Sul do Amapá (região 18), Metropolitana de Belém (região 13) e Sul Maranhense (região 25), com quedas de 20,8%, 10,8%, 10,7%, 9,6%, 9,6%, 9,4% e 9,4%, respectivamente, no cenário RCP 8.5. O cenário RCP 4.5 segue o mesmo padrão com uma magnitude um pouco menor. A razão dessas quedas reside no aumento do preço (remuneração) do pasto nessas regiões. Ao contrário do caso da agricultura, esse aumento de custo é devido à redução da oferta de pasto devido à conversão de terras para áreas de lavoura, uma vez que a demanda por pasto não sofre grande alteração como na lavoura.

Figura 8 - Variações das áreas de pasto por mesorregião da Amazônia Legal para cenário RCP 8.5 e RCP 4.5 - desvio % acumulado em relação ao cenário base, 2021-2080



Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações do modelo REGIA.

No que se refere à floresta plantada, pode-se observar uma redução geral dessas áreas, conforme mostrado na Tabela 4, mas a magnitude dessa redução é menor quando comparada à do pasto. Isso significa que o aumento do preço da floresta plantada foi relativamente menor do que o do pasto. A AML perderia 265 mil hectares (RCP 8.5) e 198 mil hectares (RCP 4.5) de floresta plantada, o que representa 2,8% a 2,1% da área de floresta natural da região de 2005¹⁰. Entre as mesorregiões da AML, em termos de áreas em hectares, o Nordeste Paraense sofreria a maior diminuição da floresta plantada, 66 mil hectares a 69 mil hectares, dependendo dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

A Figura 9 mostra o impacto das mudanças climáticas sobre as áreas de floresta plantada em cada mesorregião, em termos de variação percentual acumulada em relação ao cenário base, para o período 2021 a 2080 nos cenários RCP 8.5 e 4.5. De acordo com a figura, as mesorregiões mais impactadas negativamente seriam o Sudeste Mato-grossense (região 30) e Sul Maranhense (região 25), com queda de 20,9% e 12,1%, respectivamente, no cenário RCP 8.5. O Sudeste Mato-grossense também apresenta uma queda de 16% no cenário RCP 4.5. Essa redução ocorre devido às restrições ao desmatamento (uso da terra de floresta natural) estabelecidas no modelo¹¹. Com isso, a expansão da agricultura nessa região tem um impacto negativos nas áreas de florestas plantadas, o que também ocorre com o pasto.

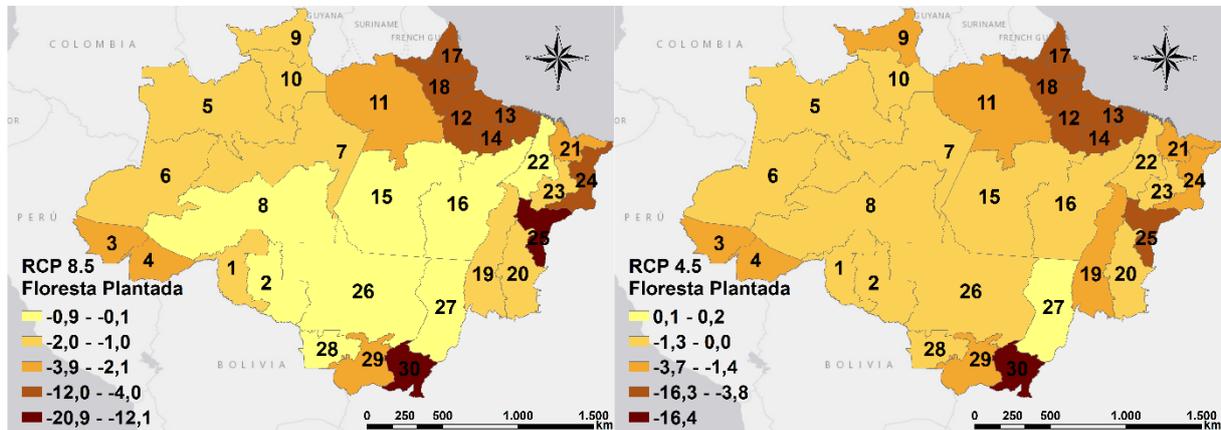
Por fim, em relação às áreas de floresta natural, observa-se a queda acentuada dessas áreas na Tabela 4, o que indica um aumento do desmatamento. Para o caso da floresta natural no REGIA, o valor negativo aqui pode ser interpretado como um aumento das áreas de desmatamento. O impacto seria uma perda de aproximadamente 2,8 a 2,4 milhões de hectares,

¹⁰ As áreas de floresta plantada da Amazônia Legal de 2005 foram extraídas do banco de dados do REGIA.

¹¹ Esta restrição de desmatamento foi estabelecida para a região do REGIA, “que não possui floresta tropical e onde a capacidade de expansão da agropecuária via desmatamento seja pequena” (CARVALHO, 2014, p. 111).

nos cenários RCP 8.5 e RCP 4.5, respectivamente, acumulados até 2080, o que equivale aproximadamente o tamanho do estado do Alagoas, no cenário mais pessimista. Além disso, observa-se que a perda das áreas de floresta natural é causada inteiramente pela expansão das áreas agrícolas, ou seja, a conversão de terra da floresta natural ocorre em direção à lavoura.

Figura 9 - Var. das áreas de floresta plantada por mesorregião da Amazônia Legal para cenário RCP 8.5 e RCP 4.5– desvio % acumulado em relação ao cenário base, 2021-2080

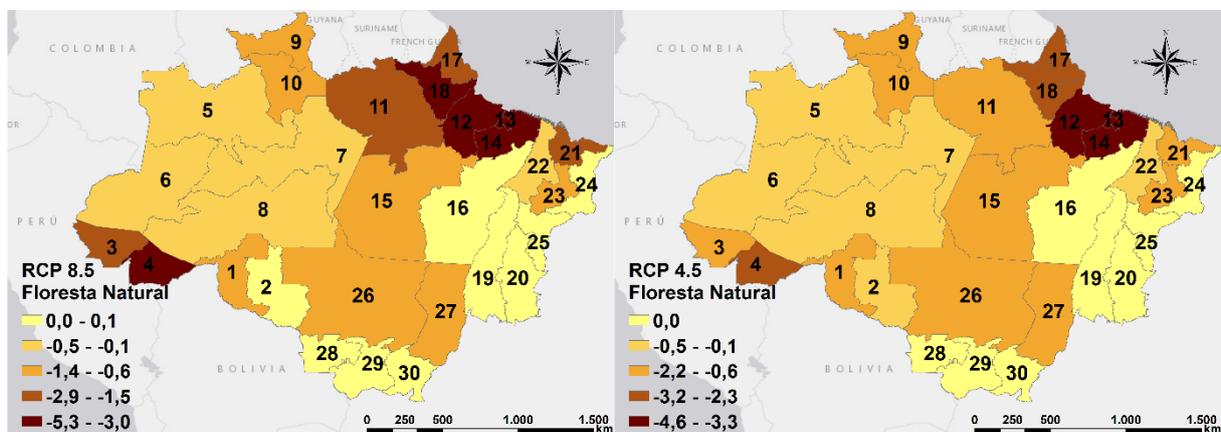


Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações do modelo REGIA.

Assim, os resultados sugerem que os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola tenderiam a estimular o desmatamento na AML. Outros estudos também indicam essa tendência, mesmo utilizando outras metodologias, como a econometria. Esse padrão, por exemplo, é reproduzido nas projeções de estudos de Ferreira (2015) e em projeções para outros biomas, como as projeções realizadas para Minas Gerais (FIPE-FEAM, 2011) e para todas regiões do Brasil (BARBOSA, 2011; FÉRES; REIS; SPERANZA, 2009). Portanto, os estudos empíricos sugerem que a mudança do clima tem potencial de aumentar as áreas de desmatamento, e esse efeito tende a ser maior no cenário climático mais pessimista.

Dentre as mesorregiões com maior área desmatada nas projeções, estão o Baixo Amazonas e Marajó, com 446 mil hectares e 415 mil hectares desmatados, respectivamente, no cenário RCP 4.5. Isso equivale a cerca de 1,4% e 4,2% das áreas de floresta natural dessas mesorregiões. O desmatamento aumenta para 463 mil hectares e 476 mil hectares, respectivamente, no cenário climático mais severo (RCP 8.5).

Figura 10 - Var. das áreas de floresta natural por mesorregião da Amazônia Legal para cenário RCP 8.5 e RCP 4.5 - desvio % acumulado em relação ao cenário base, 2021-2080



Fonte: Elaboração própria com base nos resultados das simulações do modelo REGIA.

A Figura 10 mostra o impacto das mudanças climáticas sobre as áreas de floresta natural (ou desmatamento) em termos de variação percentual acumulada, em relação ao cenário base, para o período de 2021 a 2080 nos cenários RCP 8.5 e 4.5. Nesse caso, essa taxa pode ser interpretada como a taxa de desmatamento. As mesorregiões mais afetadas são o Vale do Acre (região 4), o Marajó (região 12), a Metropolitana de Belém (região 13), o Nordeste Paraense (região 14) e o Sul do Amapá (região 18), com aumento do desmatamento de 3,2%, 5,3%, 3,4%, 3,6% e 3%, respectivamente, no cenário RCP 8.5; e o Marajó (região 12), a Metropolitana de Belém (região 13) e o Nordeste Paraense (região 14), com aumento do desmatamento de 4,6%, 3,3% e 3,6%, respectivamente, no cenário RCP 4.5. A magnitude desses efeitos é relativamente baixa considerando o histórico, em que a taxa de desmatamento entre 2004 a 2015 foi de 78%, segundo o PRODES/INPE. Observa-se que o pior cenário climático causaria um maior desmatamento, afetando áreas mais extensas e em níveis mais elevados.

4. Considerações finais

Este artigo simulou os impactos econômicos das mudanças climáticas na AML com o objetivo de identificar os potenciais danos econômicos regionais, considerando que, de acordo com a literatura, os efeitos das mudanças climáticas globais são heterogêneos e há falta de estudo econômico sobre o tema nesta região.

As simulações representam variações sobre a produtividade agrícola decorrentes de mudanças nos níveis de precipitação e temperatura entre 2021 e 2080, com base em dados do INPE e IPCC. Em linhas gerais, as projeções econômicas indicaram reduções do PIB e nos principais indicadores econômicos na AML, em ambos os cenários climáticos considerados. Dentre eles, o investimento seria o componente a sofrer a maior retração na região. Contudo, o impacto negativo sobre o PIB pode ser considerado relativamente baixo, considerando o longo horizonte de tempo analisado (2021-2080). A queda acumulada do PIB em -1,92% no cenário RCP 8.5, equivale a uma média anual de -0,03%. Nesse ponto, é importante ressaltar dois pontos:

1- O comportamento adaptativo dos produtores diante dos efeitos climáticos ameniza os custos econômicos extremos. Como Mendelsohn *et al.* (1994), os cálculos que consideram apenas a queda de produtividade sem levar em conta a possibilidade de produtores migrarem (se adaptarem) para outra atividade mais rentável tendem a superestimar as perdas econômicas. Portanto, o mecanismo de ajuste de mercado (incluindo a adaptação das firmas) e de preços incorporado no modelo de EGC tende a não potencializar os efeitos econômicos das mudanças climáticas.

2- Todos os possíveis efeitos climáticos não incluídos no modelo tendem a subestimar as perdas econômicas. Como este estudo considerou apenas a queda de produtividade agrícola nas simulações, sem incorporar outros efeitos das mudanças climáticas sobre a região, os resultados deste trabalho podem ser considerados como um limite inferior dos potenciais impactos. É importante ressaltar que pode haver inúmeros fatores decorrentes das alterações climáticas que intensificariam as potenciais perdas econômicas, como elevação do nível do mar, crise hídrica, diminuição da oferta de energia elétrica, catástrofes naturais, entre outros.

No entanto, em uma perspectiva mesorregional, verificou-se um quadro bastante diferenciado espacialmente. Os efeitos climáticos sobre a economia da AML por mesorregião são bastante heterogêneos. Algumas mesorregiões seriam impactadas negativamente com diferentes níveis de magnitudes, enquanto outras seriam beneficiadas em termos econômicos. As mesorregiões mais afetadas seriam Nordeste Paraense, Sudeste Mato-grossense, Sul Maranhense e Metropolitana de Belém. Essas apresentaram, de maneira geral, perdas elevadas na taxa de produtividade da terra dos principais cultivos de cada região. Por outro lado, as

mesorregiões mais favorecidas seriam Norte Mato-grossense e Nordeste Mato-grossense, com baixo nível das perdas de produtividade agrícola e até mesmo com aumento de produtividade, como no caso da cana-de-açúcar e do café.

Outro resultado projetado das simulações diz respeito ao aumento da taxa de desmatamento na região. As projeções sugerem crescimento das áreas desmatadas e um aumento da lavoura na AML como uma das consequências dos efeitos climáticos sobre a produtividade agrícola. A dinâmica consiste basicamente na expansão das áreas de lavoura, que pressionam outros usos da terra, resultando na redução das áreas de pasto e florestas. No entanto, essa dinâmica projetada pelo modelo difere de estudos econométricos para a região (BARBOSA, 2011; FÉRES; REIS; SPERANZA, 2009; FERREIRA, 2015), que apontam para um aumento das áreas de pasto, principalmente. A possível causa da divergência reside no mecanismo de ajuste de mercado e de preços dos modelos de EGC, dado que neste caso, há possibilidade de preços flexíveis e deslocamento de fatores produtivos entre setores e regiões, o que não acontece em modelos de equilíbrio parcial.

Com esses resultados, o presente trabalho procurou contribuir com respostas sobre os possíveis efeitos climáticos na economia da AML ao longo deste século. Identificar as possíveis perdas econômicas decorrentes das mudanças climáticas é relevante, pois há uma crescente necessidade de implementação de políticas de mitigação e/ou adaptação para enfrentar e prevenir danos mais intensos no futuro próximo. Isso se deve ao fato de que as ocorrências de catástrofes naturais têm se tornado mais frequentes nas últimas décadas, resultando em prejuízos econômicos maiores. Nesse contexto, o setor de agropecuária necessita de uma atenção especial, pois diversos estudos apresentam a produção deste setor como a mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas (MAGULIS; DUBEUX, 2010; FIPE-FEAM, 2011; DOMINGUES; MAGALHÃES; RUIZ, 2016; FERES; REIS; SPERANZA, 2009). Assim, o incentivo à pesquisa que visa aumentar a produtividade e resistência dos cultivos (melhoramento genético e outras técnicas adaptativas e sustentáveis), como as já praticadas pela Embrapa e Emater, é fundamental. Além disso, é necessário implementar políticas públicas (políticas adaptativas) para promover a transferência dessas técnicas desenvolvidas aos produtores rurais, pois uma parcela significativa da produção agropecuária da AML (agricultura familiar) tende a ter maior restrições para se adaptar às mudanças climáticas.

5. Referências

- ASSUNÇÃO, J.; CHEIN, F. Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. **Environment and Development Economics**, v. 21, n. 5, p. 581–602, 2016.
- BARBOSA, E. C. P. **Mudanças climáticas e o padrão do uso do solo no Brasil**. 2011. 63 p. Dissertação (Mestrado em Teoria Econômica) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- BCB, Banco Central do Brasil. **Focus - Relatório de mercado**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/GCI/PORT/readout/readout.asp>>. Acesso em: 5 maio. 2016.
- CARVALHO, T. S. **Uso do Solo e Desmatamento nas Regiões da Amazônia Legal Brasileira**: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas. 2014. 219 p. Tese (Doutorado em Economia) - Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P.; HORRIDGE, J. M. Controlling deforestation in the Brazilian Amazon: Regional economic impacts and land-use change. **Land Use Policy**, v. 64, p. 327–341, 2017.
- CHOU, S. C. *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512–525, 2014.

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. Cenários de mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos na região Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 42, n. 2, p. 229–246, 2016.

FARIA, W. R.; HADDAD, E. A. Modeling land use and the effects of climate change in Brazil. **Climate Change Economics**, v. 8, n. 01, 1750002, 2017.

FÉRES, J.; REIS, E.; SPERANZA, J. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. In: Encontro Nacional de Economia, 37., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANPEC, 2009.

FERREIRA, M. D. P. **Climate change, farm size and land use in Brazilian Legal Amazon**. 2015. 92 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Departamento de Economia Rural, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

FERREIRA FILHO, J. B.; HORRIDGE, J. M. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. **Land Use Policy**, vol. 36, p. 595-604, 2014.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; MORAES, G. I. Climate change, agriculture and economic effects on different regions of Brazil. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 01, p. 37–56, 2014.

FIPE/FEAM. **Avaliação de impactos de mudanças climáticas sobre a economia mineira: relatório resumo**. Belo Horizonte: FEAM, 2011. 46p.

HORRIDGE, J. M. *et al.* The impact of the 2002-2003 drought on Australia. **Journal of Policy Modeling**, vol. 27, n. 3, p. 285-308, 2005.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contas Nacionais Trimestrais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/defaultcnt.shtm>>. Acesso em: 05 mai. 2016.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. 104 p.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. (Ed.); MARCOVITCH, J. (Coord.). **Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades**. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. **The American economic review**, v. 84, n. 4, p. 753–771, 1994.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação: Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.

TANURE, T. M. do P.; DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.. Regional impacts of Climate Change on agricultural productivity: evidence on large-scale and family farming in Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 32(1), e262515. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.262515>.

STERN, N. H. **The economics of climate change: the Stern review**. Cambridge University Press, 2007.

WAHLSTROM, M.; GUHA-SAPIR, D. **The human cost of weather-related disasters 1995-2015**. Geneva: UNISDR, 2015.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. **Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950-2010) (Version 3.02)**. Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware, 2012.