



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Instituto de Economia

Daniel Herrera Pinto

**Políticas de Mitigação de Mudanças Climáticas  
para o Brasil: Análise com um modelo dinâmico  
de Supermultiplicador Sraffiano com  
consistência de fluxos e estoques (SFC)**

Campinas

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Instituto de Economia

Daniel Herrera Pinto

**Políticas de Mitigação de Mudanças Climáticas para o  
Brasil: Análise com um modelo dinâmico de  
Supermultiplicador Sraffiano com consistência de fluxos e  
estoques (SFC)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Ciências Econômicas

Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Aggio

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Daniel Herrera Pinto, e orientada pelo Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Aggio

---

Campinas

2019

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 1576970

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6846-1741>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Economia  
Mirian Clavico Alves - CRB 8/8708

P658p Pinto, Daniel Herrera, 1992-  
Políticas de mitigação de mudanças climáticas para o Brasil : análise com um modelo dinâmico de Supermultiplicador Sraffiano com consistência de fluxos e estoques (SFC) / Daniel Herrera Pinto. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Gustavo de Oliveira Aggio.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia.

1. Economia ecológica. 2. Mudanças climáticas. 3. Macroeconomia - Modelos matemáticos. 4. Análise fluxo-estoque. I. Aggio, Gustavo de Oliveira, 1982-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Climate change mitigation policies for Brazil : analysis with a stock-flow consistent Sraffian Supermultiplier dynamic model

**Palavras-chave em inglês:**

Ecological Economics

Climate Change

Macroeconomics - Mathematical models

Stock-flow analysis

**Área de concentração:** Teoria Econômica

**Titulação:** Mestre em Ciências Econômicas

**Banca examinadora:**

Gustavo de Oliveira Aggio [Orientador]

Esther Dweck

Ademar Ribeiro Romeiro

**Data de defesa:** 14-02-2019

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências Econômicas



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE ECONOMIA**

**DANIEL HERRERA PINTO**

**Políticas de Mitigação de Mudanças Climáticas para o  
Brasil: Análise com um modelo dinâmico de  
Supermultiplicador Sraffiano com consistência de fluxos e  
estoques (SFC)**

**Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Aggio – orientador**

**Defendida em 14/02/2019**

**COMISSÃO JULGADORA**

**Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Aggio - PRESIDENTE  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

**Prof. Dr. Ademar Ribeiro Romeiro  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Esther Dweck  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**

A Ata de Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no processo de vida acadêmica do aluno.

# Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Sem esse apoio, as questões materiais teriam sido um empecilho muito maior à realização de todas as atividades acadêmicas.

Isso, posto, agradeço, antes de tudo, a meus pais. Por seu suporte incondicional aos meus estudos, pela dedicação em despertar em mim o interesse pelo conhecimento e pelos esforços - diversas vezes financeiros - para possibilitar que eu trilhasse esse longo caminho até a pós-graduação.

Agradeço a meus professores, e em especial a meu orientador Gustavo, pela paciência que tiveram comigo, pelos ensinamentos e por me mostrarem os caminhos que eventualmente me levaram a essa dissertação.

Agradeço à Unicamp, meu centro de formação, por tudo que aprendi não apenas sobre economia, mas também sobre como me tornar um cidadão e um ser humano melhor.

Agradeço a meus colegas, pelas extensas conversas, pelas dúvidas sanadas, pela parceria nos momentos angustiantes, mas também nos momentos de alegria e comemoração.

E, finalmente, a Ana Paula, minha companheira, meu porto seguro. Por estar ao meu lado ao longo desses últimos três anos, por tudo que me ensinou nesse período, pelas inúmeras revisões de texto, pelas opiniões e por me ajudar a seguir em frente mesmo nos momentos em que achei não ser capaz.

Sem vocês, essa pesquisa não teria sido realizada. Obrigado a todos!

# Resumo

As evidências científicas mais recentes vêm corroborando as projeções de que o aquecimento global é uma realidade e que, no curso atual, os aumentos da temperatura mundial podem gerar impactos catastróficos e irreversíveis. Em meio a esse debate, diferentes correntes da economia têm se posicionado em torno do tema, contrastando suas visões de mundo e suas políticas de enfrentamento do problema.

No presente trabalho buscamos nos inserir nesse debate construindo um modelo de crescimento econômico para a economia brasileira que induz e está sujeito às mudanças climáticas. Para tal, utilizamos duas metodologias heterodoxas: a consistência entre fluxos e estoques (SFC) e o Supermultiplicador Sraffiano. Contrastamos também as duas principais linhas da literatura: a teoria dos limites ao crescimento e a hipótese do descolamento. Em termos gerais, a segunda se mostrou mais eficiente na prevenção do colapso econômico, enquanto a primeira se mostrou menos efetiva para o caso brasileiro.

**Palavras-chaves:** economia ecológica; macroeconomia ecológica; mudanças climáticas; consistência entre fluxos e estoques; supermultiplicador sraffiano.

# Abstract

Current scientific evidences have been indicating that global warming is in fact real and that global temperature rises could become catastrophic and irreversible if nothing is done to prevent it. Amidst this debate, different economic schools of thought have been debating their visions and policies to face the problem.

Here we intended to take part in this debate by building a growth model for the Brazilian economy which causes and is affected by climate change. In order to do that, we worked with two heterodox frameworks: stock-flow consistent models (SFC) and Sraffian Super-multiplier models. We've also compared the two major propositions in the literature: the limits to growth agenda and the decoupling hypothesis. In general, the latter seemed more effective in preventing economic collapse, while the first seemed less effective for the Brazilian case.

**Keywords:** ecological economics; ecological macroeconomics; climate change; stock-flow consistency; sraffian supermultiplier.

# Sumário

<b>Introdução</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>1 Revisão de Literatura</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1 Trabalhos Pioneiros . . . . .	13
1.2 A Abordagem da Economia Ecológica . . . . .	15
1.3 Desenvolvimentos Recentes . . . . .	18
1.4 O Caso Brasileiro . . . . .	21
1.5 Considerações Finais . . . . .	23
<b>2 Metodologia</b> . . . . .	<b>24</b>
2.1 Consistência entre Fluxos e Estoques (SFC) . . . . .	24
2.2 Equações Econômicas do Modelo . . . . .	27
2.3 Equações Ambientais do Modelo . . . . .	34
2.4 Considerações Finais . . . . .	37
<b>3 Resultados</b> . . . . .	<b>39</b>
3.1 Funcionamento do Modelo sem Políticas de Enfrentamento das Mudanças Climáticas . . . . .	39
3.2 Políticas de Enfrentamento - Limites ao Crescimento . . . . .	45
3.3 Políticas de Enfrentamento - Investimentos em Mitigação . . . . .	48
3.4 Considerações Finais . . . . .	53
<b>Conclusão</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>Referências</b> . . . . .	<b>56</b>
<b>ANEXO A Parâmetros e Valores Iniciais</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>ANEXO B Funções de Dano</b> . . . . .	<b>64</b>

# Introdução

A problemática do aquecimento global e das mudanças climáticas vem ganhando cada vez mais espaço no debate político e econômico mundial. A comunidade científica já aponta com crescentes graus de confiança que estamos chegando ao fim de um período de larga estabilidade climática. O atual período geológico do Holoceno (que se estende pelos últimos dez mil anos) contrasta-se com os anteriores exatamente por sua excepcional estabilidade climática. Isso se deve à capacidade dos atuais ecossistemas de se autorregularem de forma a manter relativamente constantes temperaturas, disponibilidade de água e os fluxos bioquímicos. Contudo, desde a revolução industrial e, mais significativamente, desde o século passado, o mundo vem apresentando mudanças muito mais velozes que podem levar à desestabilização desse longo período de equilíbrio (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009, p. 472).

Dentro desse contexto, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram em 1988 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a fim de produzir relatórios que agrupassem os resultados científicos da comunidade acadêmica acerca das mudanças climáticas e seus determinantes (OLIVEIRA, 2014, p. 12). O último desses relatórios, o AR5 (*Assessment Report 5*, no inglês) confirma que, ao menos desde o último século, as temperaturas médias globais e os níveis dos oceanos vêm aumentando gradativamente (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 3), estes últimos decorrentes do derretimento de grandes massas de gelo nos polos, em montanhas e na Groelândia (OLIVEIRA, 2014; ROCKSTRÖM *et al.*, 2009, p. 473). Ademais, são também observadas mudanças como aumento na acidificação dos oceanos, com impactos negativos sobre os ecossistemas marinhos, além de mudanças nos níveis pluviais dentre outras alterações no ciclo da água (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 4).

Seguindo as tendências atuais, essas mudanças provavelmente acarretarão em diversos prejuízos à humanidade, como, por exemplo, aumento da frequência e severidade de tempestades extremas, aumento das chuvas nas áreas mais úmidas, ao mesmo tempo em que se observará diminuição da precipitação nas áreas mais secas, e aumento das ondas de calor. Deve-se observar também uma diminuição da segurança alimentar mundial em decorrência da diminuição da pesca, da produtividade das culturas de trigo, arroz e milho nas regiões mais próximas aos trópicos e da disponibilidade de água tanto superficial quanto subterrânea nas regiões mais secas do globo. Ainda, as mudanças climáticas devem amplificar problemas de saúde já existentes, especialmente nos países mais pobres

(PACHAURI *et al.*, 2014, p. 10–11) (STERN, 2007, p. viii).

Para entender essas mudanças, é preciso entender um pouco sobre o funcionamento do sistema climático. Como explica Oliveira (2014, p. 15), este sistema “evolui no tempo sob influência da sua própria dinâmica interna e de forçantes radiativas externas”<sup>1</sup>. Nesse sentido, o último relatório do IPCC mostra que a principal forçante radiativa tem vindo da atividade humana, por meio do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera:

“Anthropogenic greenhouse gas emissions have increased since the pre-industrial era, driven largely by economic and population growth, and are now higher than ever. This has led to atmospheric concentrations of carbon dioxide, methane and nitrous oxide that are unprecedented in at least the last 800,000 years. Their effects, together with those of other anthropogenic drivers, have been detected throughout the climate system and are *extremely likely* to have been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century.” (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 4, itálico no original)

Gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> e vapor d’água, quando presentes na atmosfera, são capazes de absorver parte da radiação solar incidente e emitir calor. Por isso, são chamados de gases de efeito estufa, uma vez que são responsáveis por reter calor e aumentar a temperatura média na superfície terrestre (OLIVEIRA, 2014, p. 21). As emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da queima de combustíveis fósseis e dos processos industriais foram a maior fonte de emissão de GEE entre 1970 e 2010 (65%) e do crescimento dessas emissões no mesmo período (78%) (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 5). Ainda, se atribuirmos as emissões aos respectivos setores econômicos responsáveis, 35% das emissões de GEE em 2010 teriam sido realizadas pelo setor energético, 21% pela indústria, 14% pelos transportes e 21% pela somatória da agricultura, pecuária e mudanças no uso da terra (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 46).

Através desses números, é possível notar que o processo atual de emissão de GEE em larga escala é dificilmente dissociável da atividade econômica, especialmente nas últimas décadas. Adicionalmente, o crescimento populacional também tem se mostrado uma força indireta importante sobre o aumento das emissões, uma vez que um maior contingente populacional implica em maior necessidade de provisão de bens e serviços:

“Globally, economic and population growth continue to be the most important drivers of increases in CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel combustion. The contribution of population growth between 2000 and 2010 remained roughly identical to that of the previous three decades, while

<sup>1</sup> Segundo a autora, uma forçante radiativa é a quantidade de energia que um determinado fator impõe sobre o equilíbrio radiativo da Terra. Ou seja, uma forçante radiativa positiva significa que um determinado fator impõe um aumento energético ao sistema climático, enquanto uma forçante negativa implica em uma diminuição energética ao sistema.

the contribution of economic growth has risen sharply (*high confidence*)” (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 46, itálico no original)

Junto com o aumento da população mundial, o rápido crescimento econômico das últimas décadas mais do que compensou os importantes ganhos de eficiência energética e a relativa melhora em termos de descarbonização da matriz energética mundial (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 47). Com isso, o padrão explosivo do aumento das emissões de GEE no mundo acontece a despeito de ganhos de eficiência da ordem de 45% entre 1970-2010 (BLANCO *et al.*, 2014, p. 365). Ainda que o crescimento populacional tenda a desacelerar ao longo do século XXI de acordo com as previsões atuais<sup>2</sup>, o crescimento econômico deve continuar a taxas relativamente constantes, ampliando a pressão sobre o clima.

Ainda nesse sentido, observa-se que as emissões mais ligadas à atividade econômica (energia fóssil e outros processos industriais) vêm subindo de forma praticamente continua ao menos desde os anos 1970, enquanto as emissões mais ligadas ao crescimento populacional (agropecuária, desmatamento e demais mudanças de uso da terra) se mantiveram relativamente estáveis ao longo do período. Assim, prevê-se que nas próximas décadas o crescimento econômico represente um fator cada vez maior vis-à-vis o crescimento populacional (BLANCO *et al.*, 2014, p. 365).

Em meio a esse cenário de agravamento da crise ambiental, existem ainda riscos adicionais atrelados aos mecanismos de retroalimentação do sistema climático, os quais podem amplificar as forçantes radiativas derivadas da ação humana. O acúmulo de vapor de água na atmosfera, por exemplo, amplia a retenção de radiação infravermelha e induz aumentos na temperatura. Da mesma forma, a diminuição de camadas de gelo polar reduz a capacidade refletora da superfície terrestre e também auxilia no aumento das temperaturas globais. Em um ambiente mais quente, a taxa de evaporação da água e de degelo polar tende a aumentar, amplificando o processo inicial. Assim, ainda que as emissões de GEE e outras forçantes radiativas sejam completamente controladas, não é possível descartar o risco de que os sistemas de retroalimentação por si só deem continuidade ao processo de aquecimento global (OLIVEIRA, 2014, p. 22).

Por isso, esforços globais vêm sendo implementados a fim de reduzir as emissões de GEE e impedir que o processo de aquecimento se torne irreversível. No mais recente desses esforços, o Acordo de Paris, os signatários se comprometeram a adotar medidas para garantir que o aquecimento global não ultrapasse 2°C acima dos níveis

<sup>2</sup> Segundo dados da ONU (UN, 2017, p. xxv; 3) a população mundial deve continuar a crescer ao longo de todo século XXI, puxada principalmente pelo crescimento asiático e africano até a metade do século e em seguida apenas pelo último. Contudo, a taxa de crescimento deve desacelerar paulatinamente ao longo deste século até tornar-se muito próxima de 0% em 2100. Nesse cenário, a população mundial deve atingir o pico de 11,2 bilhões de habitantes.

pré-industriais (UN, 2015, p. 3). Tal limite visa reduzir os riscos de que pontos críticos sejam ultrapassados em diversas variáveis climáticas como o aumento do nível dos mares, o degelo polar e mudanças abruptas em ecossistemas. Caso ultrapassados, pode-se desencadear processos de retroalimentação irreversíveis com consequências tanto imprevisíveis quanto desastrosas (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009, p. 472-473).

Sendo o Brasil um dos signatários do Acordo de Paris e um dos 10 maiores emissores mundiais de GEE (CAIT, 2017), o presente trabalho busca se incorporar a esse debate de forma a produzir estimativas e cenários para avaliações de possíveis caminhos a serem tomados pelo país. Para isso, buscou-se construir aqui um modelo de simulação que conecta o crescimento e variáveis econômicas ao processo de acúmulo de GEE e aos aumentos das temperaturas médias globais.

Além desta introdução, o trabalho se subdivide em mais 3 capítulos, além de uma breve conclusão. No capítulo 1, retomamos os principais debates recentes sobre as mudanças climáticas no âmbito da ciência econômica, passando pelos primeiros estudos empíricos sobre políticas de mitigação dos impactos ambientais, pela crítica da economia ecológica aos trabalhos tradicionais e pelos desenvolvimentos mais recentes. Dadas as especificidades do padrão brasileiro de emissões de GEE em relação ao resto do mundo, uma última seção sobre a relevância dos impactos da agropecuária e do desmatamento no Brasil fecha o capítulo.

O capítulo 2 explica a estrutura do modelo proposto, além de apresentar as duas metodologias aqui utilizadas: a Consistência entre Fluxos e Estoques e os modelos de crescimento do tipo Supermultiplicador Sraffiano. Por sua vez, o capítulo 3 mostra o funcionamento do modelo, as diferentes hipóteses simuladas e compara os resultados obtidos por elas. Finalmente, a conclusão faz um balanço dos resultados à luz das diferentes abordagens teóricas apresentadas e delinea os possíveis caminhos que o país poderia tomar a fim de cumprir as diretrizes expostas no Acordo de Paris.

# 1 Revisão de Literatura

## 1.1 Trabalhos Pioneiros

Por sua relação com a atividade econômica, as mudanças climáticas e seus impactos passaram a ser gradativamente mais objeto de estudos no campo da economia, movimento que se torna mais evidente a partir dos anos 1980 e 1990 (SPASH, 1999, p. 420) (DIETZ; STERN, 2015, p. 575). Dentre esses trabalhos pioneiros, William Nordhaus desenvolve um modelo de análise de custo benefício para políticas de enfrentamento das mudanças climáticas baseado em uma função social de bem-estar e em uma função de custo de mitigação dos impactos ambientais. Nele, o bem-estar da sociedade é derivado exclusivamente do consumo e está sujeito a reduções pelo aumento da temperatura média global. Por sua vez, a curva de custos de mitigação agrega as opções ótimas disponíveis na época e cresce junto com a quantidade de carbono atmosférico a ser neutralizado (NORDHAUS, 1991).

Com esse arcabouço, o autor busca otimizar o consumo intertemporal alocando fundos entre o consumo corrente e os gastos com mitigação das mudanças climáticas, os quais reduzem os prejuízos futuros ao consumo derivados do agravamento da situação ambiental. Ao determinar o ponto de intersecção entre os benefícios e custos marginais da política de enfrentamento das mudanças climáticas, Nordhaus busca estabelecer a quantidade ótima de CO<sub>2</sub> a ser retirada da atmosfera de forma a maximizar o consumo intertemporal da sociedade.

Na mesma linha, o autor desenvolve nos anos seguintes seu modelo DICE (*Dynamic Integrated Climate-Economy*, no inglês) o qual tem sua primeira versão publicada em 1992 (NORDHAUS, 1992a; NORDHAUS, 1992b) e sua versão mais nova em 2013 (NORDHAUS; SZTORC, 2013). Enquanto no modelo de 1991 o produto crescia a uma taxa exógena fixa, no modelo DICE Nordhaus utiliza um modelo de crescimento de Ramsey, o qual endogeniza o crescimento. Com isso, os agentes buscam maximizar sua utilidade não só pela decisão de mitigar em maior ou menor grau os impactos ambientais, mas também por alocar os recursos disponíveis em consumo corrente ou em acumulação de capital e capacidade produtiva futura. Ainda assim, em ambos os trabalhos as emissões de GEE são diretamente proporcionais ao nível de atividade econômica, acumulando-se na atmosfera, induzindo aumentos na temperatura global e danos ao sistema produtivo. Novas versões desse modelo foram publicadas em 1996 e em 2000 com a desagregação do modelo global original em dez regiões (modelo RICE). Os dados foram atualizados e

alterações marginais foram introduzidas de forma que o modelo conservou seu desenho original baseado no modelo de Ramsey (NEWBOLD, 2010, p. 2).

Mais recentemente, outro trabalho também bastante influente foi o relatório desenvolvido por Nicholas Stern para o governo do Reino Unido (STERN, 2007). Nele, o autor aborda as evidências científicas sobre as mudanças climáticas, suas causas e impactos, além de desenvolver várias simulações de políticas a serem implementadas para lidar com tais impactos. Diferentemente dos trabalhos de Nordhaus, os quais previam uma redução ótima nas emissões de GEE na ordem de 10% a um custo de cerca de 1% do PIB mundial (NORDHAUS, 1991; NORDHAUS, 1992b), o relatório Stern estima danos muito superiores decorrentes das mudanças climáticas, de forma que defende reduções muito mais drásticas nos níveis de emissões (STERN, 2007, p. 2-3).

Ainda que o modelo utilizado no Relatório Stern<sup>1</sup> apresente um bloco ambiental muito mais complexo do que o proposto por Nordhaus, as principais diferenças significativas entre os trabalhos estão nos valores dos parâmetros de desconto intertemporal<sup>2</sup> e de dano derivado do acúmulo de GEE na atmosfera<sup>3</sup>. Ao usar uma taxa de desconto muito menor do que a usual e uma taxa de dano maior, Stern amplifica o valor presente dos danos ambientais, tornando os esforços de mitigação mais rentáveis do que nos trabalhos de Nordhaus (ACKERMAN, 2009). A mudança na taxa de desconto é defendida com base em uma posição filosófica de entender as diferentes gerações como tendo a mesma importância entre si. Dessa forma, não seria justo descontar em demasia a utilidade das gerações futuras e os impactos sobre elas. Muitos autores foram críticos dessa posição, pois entendem que os agentes revelam suas preferências pelo presente sobre o futuro através de suas decisões de poupança (ACKERMAN, 2009, p. 36).

Outros críticos, como Sir Partha Dasgupta, argumentam que uma taxa de desconto muito baixa implica em um favorecimento excessivo às gerações futuras em relação à geração atual. Isso porque assume-se que, dado o crescimento econômico, as gerações futuras serão mais ricas do que a presente, de forma que ao favorecê-las estaríamos penalizando a geração mais pobre em favor das mais ricas. Por isso, para a defesa de uma postura igualitária intergeracionalmente, dever-se-ia considerar uma taxa de desconto que levasse em conta essas diferenças de renda (DASGUPTA, 2007). Por outro lado, se considerarmos os danos ambientais como potencialmente catastróficos ou, ao menos, mais severos dos que os considerados por Nordhaus, então é provável que as gerações futuras se tornem em verdade mais pobres que a atual. Nesse sentido, o argumento da Dasgupta

<sup>1</sup> O modelo PAGE2002 utilizado é detalhado em Hope (2006).

<sup>2</sup> A taxa de desconto é a que traz a valor presente o consumo, a utilidade e os danos climáticos futuros, de forma que taxas maiores priorizam o consumo presente em detrimento do bem-estar das futuras gerações.

<sup>3</sup> O parâmetro de dano ambiental, por sua vez, é o que estabelece a porcentagem do produto total que seria perdida a cada duplicação do volume de GEE acumulados na atmosfera.

acabaria por reforçar a escolha de Stern por uma taxa de desconto inferior à convencional (ACKERMAN, 2009).

De qualquer forma, tanto os trabalhos de Nordhaus como o de Stern analisam o problema do aquecimento global unicamente sob um prisma de prejuízos monetários à atividade econômica. Essa abordagem baseia-se na visão da economia ambiental que encara os problemas ambientais como falhas de mercado e que, portanto, podem ser corrigidos pela precificação, valoração do meio ambiente e pela introdução de mecanismos de coordenação entre os agentes. A solução mais comum nesses casos, é a criação e regulamentação de um mercado de carbono.

Contudo, essa abordagem não é a única a tratar dos problemas do aquecimento global dentro da economia. A vertente da economia ecológica se desenvolve ao longo das décadas de 1960-1980, consolidando-se como corpo teórico a partir do final dessa última década e início da década de 1990 (SPASH, 1999, p. 422). O objetivo dessa nova corrente é unir as ideias da economia ambiental neo-clássica com a ecologia, buscando abordar os problemas ecológicos de maneira mais interdisciplinar e holística (COSTANZA, 1989). A seção seguinte trata da visão da economia ecológica e da forma como lida com as mudanças climáticas e com a relação entre o econômico e o ambiental.

## 1.2 A Abordagem da Economia Ecológica

Como apresentado acima, a corrente da economia ecológica se desenvolve para contrapor-se à visão então hegemônica da economia ambiental dentro das ciências econômicas. Dentre seus expoentes, Daly e Farley (2011, p. 15–16) defendem uma visão alternativa sobre o funcionamento da economia e sua relação com o meio ambiente. Nela, criticam a visão convencional na qual o sistema econômico é visto como “o todo” em prol de uma visão na qual a economia se torna apenas um subsistema menor que se desenvolve dentro do meio ambiente. Esse sistema menor retiraria a energia e os materiais necessários à sua reprodução do meio ambiente.

Essa distinção se torna importante para mostrar que a ampliação da economia requer uma entrada cada vez maior de materiais retirados do meio ambiente. Sendo a quantidade desses materiais finita, vê-se que a expansão do sistema econômico não poderia se dar perpetuamente sem que houvesse a exaustão completa dos insumos necessários para sua reprodução. Além disso, toda a matéria processada no sistema econômico seria devolvida ao meio ambiente na forma de resíduos<sup>4</sup>.

Aqui, vale ressaltar que os economistas ecológicos de um modo geral reco-

<sup>4</sup> A geração de energia por meio da queima de combustíveis fósseis, por exemplo, libera diversos GEE na atmosfera, os quais também trazem riscos à expansão econômica futura.

nhecem que, dentre os problemas relacionados ao crescimento econômico, a escassez de recursos é um inconveniente de prazo muito mais longo do que a capacidade de absorção dos resíduos pelo meio ambiente:

“Indeed, the growing accumulation of waste products from fossil fuel use and the negative impacts these have on planetary ecosystems is probably a far more imminent threat to human welfare than depletion; the sink will be full before the source is empty” (DALY; FARLEY, 2011, p. 81).

Ainda, diversos economistas ecológicos argumentam que o crescimento econômico não só incorre em custos ambientais, como também apresenta capacidades limitadas em prover bem-estar à população (JACKSON, 2013; VICTOR, 2008). Um padrão de rendimentos decrescentes para a renda pode ser observado não só em relação à felicidade reportada (EASTERLIN; ANGELESCU, 2009; EASTERLIN *et al.*, 2010), mas também em dados menos subjetivos como educação, mortalidade infantil e expectativa de vida ao redor do mundo (JACKSON, 2013, p. 44–47). Nesse sentido, muitos economistas ecológicos argumentam que as necessidades básicas já foram de um modo geral supridas nos países desenvolvidos, de forma que o crescimento econômico seria um instrumento muito menos relevante para estes do que para países em desenvolvimento (JACKSON, 2013, p. 9; 46).

Dentro desse novo paradigma, o crescimento econômico não mais ocorre sem um custo de oportunidade ambiental. Portanto, na proposição de Daly e Farley (2011), esses custos devem ser confrontados com os reais benefícios gerados pelo crescimento econômico, os quais, como apresentado acima, parecem apresentar rendimentos decrescentes em termos de geração de bem estar à sociedade.

Com base nesse entendimento, muitos autores defendem a ideia de “limites ao crescimento”, isto é, defendem que o sistema econômico deve ser impedido de se expandir indefinidamente para que os danos ambientais não se tornem excessivos (VICTOR, 2008; DALY; FARLEY, 2011; LATOUCHE, 2012; VEIGA; ISSBERNER, 2012; JACKSON, 2013).

Mesmo dentro da economia ecológica, há aqueles que buscam alternativas para a manutenção do crescimento econômico por mais algum tempo sem que se incorra em seus riscos ambientais associados. A saída normalmente apresentada baseia-se na hipótese do descolamento, a qual propõe que a produção se torne progressivamente menos dependente do uso de materiais físicos e menos impactante na geração de resíduos. Dessa forma, seria possível expandir momentaneamente o sistema econômico sem incorrer em crescentes pressões sobre a provisão de insumos e sobre a capacidade ambiental de absorção de resíduos (JACKSON, 2013, p. 52).

Sobre essa possibilidade, Jackson (2013) e Veiga e Issberner (2012) delimitam dois tipos de processos de descolamento: (i) descolamento relativo, no qual o impacto ambiental por unidade de PIB diminuiria, de forma que o uso de materiais crescesse a uma taxa inferior à taxa de crescimento do PIB. Nesse cenário, ainda haveria expansão no uso de materiais e na emissão de resíduos, ainda que a taxas decrescentes; (ii) descolamento absoluto entre o crescimento do produto e sua base material. Nesse cenário, a expansão da produção não incorreria em maiores impactos ambientais. Dentro dessa tipologia, a hipótese do descolamento só se tornaria uma solução viável no contexto atual caso se configurasse como um descolamento absoluto.

Os mesmos autores afirmam que os dados mundiais recentes apresentam apenas um descolamento relativo, sem qualquer evidência de descolamento absoluto (VEIGA; ISSBERNER, 2012; JACKSON, 2013, p. 52–59). Essa leitura vai ao encontro dos dados levantados pelo IPCC apresentados na introdução deste trabalho (PACHAURI *et al.*, 2014, p. 47) (BLANCO *et al.*, 2014, p. 365), corroborando a leitura dos proponentes dos limites ao crescimento de que apenas a estagnação econômica seria capaz de frear as mudanças climáticas em curso.

Ainda assim, outros economistas ecológicos se aproximam mais do entendimento convencional de que haveria a possibilidade de um descolamento absoluto. Harris (2008), por exemplo, propõe que dividindo-se os componentes do PIB (consumo, investimento, gasto do governo e setor externo) de acordo com seu impacto sobre o meio ambiente e sua intensidade material, seria possível analisar e fomentar mudanças estruturais em direção aos setores de menor impacto. Segundo o autor, seria uma questão de suprimir os setores de maior impacto em prol de setores de baixo impacto. Dessa forma, estes últimos seriam capazes de sustentar o crescimento econômico sem grandes prejuízos ambientais.

A proposta de Harris encontra alguma ressonância mesmo dentro dos proponentes dos limites ao crescimento. Daly e Farley (2011), por exemplo, admitem que a atividade econômica (medida pelo PIB) não possui uma relação necessariamente direta com o processamento físico de materiais:

“Still others assert that economic value is not a measure of a physical quantity, and therefore it is not at all obvious that the production of economic value has physical limits.

It is true that economic value is not a physical quantity. Economic production is really all about creating welfare, quality of life, utility, or whatever else we choose to call this psychic flux of satisfaction” (DALY; FARLEY, 2011, p. 63–64)

Em meio a esse debate, diversos trabalhos recentes vêm desenvolvendo modelos de macroeconomia ecológica para avaliar políticas de enfrentamento dos impactos

ambientais, em especial políticas de redução das emissões de GEE. Dentre esses trabalhos, pode-se encontrar simulações tanto de políticas de descolamento (relativo ou absoluto), quanto de limites ao crescimento. Isso posto, a seção seguinte aborda esses desenvolvimentos de forma a mapear o panorama atual do debate.

### 1.3 Desenvolvimentos Recentes

Primeiramente, convém separar os trabalhos a serem apresentados entre dois grupos: (i) aqueles nos quais o crescimento do produto é dado pelas condições de oferta (normalmente modelos do tipo Ramsey-Cass-Koopman); e (ii) aqueles nos quais o produto é determinado pelo lado da demanda<sup>5</sup>.

No primeiro grupo, destacam-se os trabalhos já citados de Nordhaus (NORDHAUS; SZTORC, 2013) baseados na otimização de funções intertemporais de utilidade. Nesses modelos, os agentes são racionais e buscam maximizar seu consumo ao longo do tempo, de forma a distribuírem sua renda entre consumo presente, investimento e gastos com mitigação das emissões de GEE. Além de seu pioneirismo, o modelo de Nordhaus e Sztorc (2013) introduz funções de dano ambiental sobre o produto baseado nos trabalhos de Tol (2009) e nos relatórios do IPCC. Sua função de dano se tornou tão influente na literatura especializada que é utilizada tanto por outros trabalhos *supply-side* (DIETZ; STERN, 2015) quanto por trabalho *demand-led* (DAFERMOS *et al.*, 2017; BOVARI *et al.*, 2018).

Rezai *et al.* (2016), por sua vez, introduzem uma restrição adicional ao modelo inspirados pela proposição de Foley (2007). A diferença deste trabalho para o de Nordhaus está no fato de que os gastos com mitigação penalizam apenas o investimento, de forma que o consumo corrente não é afetado. Essa inovação foi proposta por Foley para mostrar que o enfrentamento das mudanças climáticas não se configura como um *trade-off* entre consumo presente e consumo futuro, mas sim como uma decisão de tipos de investimento. Dessa forma, o investimento corrente deve ser redirecionado para gastos em mitigação na medida em que os ganhos com redução dos danos ambientais sejam superiores às perdas em termos de acumulação de capital.

Dietz e Stern (2015) também desenvolvem um modelo Ramsey-Cass-Koopman (RCK) para avaliar os impactos de diferentes funções de dano ambiental sobre o sistema econômico. Neste trabalho, confrontam o formato utilizado por Nordhaus e Sztorc (2013) com o defendido por Weitzman (2012), além de introduzir uma terceira calibragem própria para os parâmetros dessa função. Com isso, mostram que as conclusões dos modelos são

<sup>5</sup> Por praticidade, os trabalhos em que o produto é determinado pelas condições de oferta serão denominados futuramente como “*supply-side*” e os trabalhos em que o produto é determinado pela demanda como “*demand-led*”.

amplamente sensíveis ao formato da função de dano utilizado<sup>6</sup>.

Quanto aos impactos ambientais, em todos os trabalhos acima o sistema produtivo apresenta um coeficiente de emissões de GEE por unidade de produto implicitamente ligado ao consumo de energia e à queima de combustíveis fósseis. Nordhaus e Sztorc (2013) e Dietz e Stern (2015) incluem também emissões relacionadas a mudanças de uso da terra (MUT), provenientes principalmente do desmatamento. Nessa formulação, as emissões por MUT são muito inferiores às do consumo energético, além de decaírem a uma taxa fixa e exógena. Com isso, o total de emissões se torna praticamente proporcional ao tamanho do PIB.

Pelo lado dos modelos *demand-led*, as metodologias empregadas são muito mais diversas, destacando-se os modelos do tipo Consistência entre Fluxos e Estoques (SFC, no inglês) (GODIN, 2012; BERG *et al.*, 2015; NAQVI, 2015; JACKSON *et al.*, 2016a; JACKSON *et al.*, 2016b; BOVARI *et al.*, 2018; DAFERMOS *et al.*, 2017) e modelos Neo-Kaleckianos (TAYLOR; FOLEY, 2014; TAYLOR *et al.*, 2016; FONTANA; SAWYER, 2016; BOVARI *et al.*, 2018; REZAI *et al.*, 2018). É importante salientar que essas e outras metodologias não são incompatíveis entre si, o que possibilita combinações, por exemplo, de modelos SFC com Insumo-Produto (BERG *et al.*, 2015) ou de modelos SFC/Neo-Kaleckianos (BOVARI *et al.*, 2018). Deleidi *et al.* (2018), por exemplo, unem modelos SFC, pós-keynesianos e de Supermultiplicador Sraffiano, uma abordagem muito semelhante à nossa.

Quanto aos vetores dos impactos ambientais, a maioria dos modelos *demand-led* também os apresentam como uma relação direta do nível de atividade, de forma que o crescimento econômico resulta quase necessariamente em um aumento dos impactos, seja via maior emissão de GEE, seja via esgotamento de matérias primas. Os modelos de Bovari *et al.* (2018) e Dafermos *et al.* (2017) também incluem os impactos derivados das MUT, ainda que estes sejam sempre incorporados como taxas exógenas que se reduzem ao longo do tempo.

Outras distinções importantes dentre os modelos podem ser observadas:

- Economia aberta ou fechada: a maioria dos modelos utilizam economias fechadas e mundiais pois os impactos ambientais e suas consequências não se restringem às fronteiras nacionais<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Uma descrição mais detalhada das funções de danos citadas e suas diferenças será realizada no capítulo 2 - quando defendemos a escolha pela equação de Weitzman (2012) - e no anexo B.

<sup>7</sup> As exceções são ambos os trabalhos de Jackson *et al.* (2016a), Jackson *et al.* (2016b) e Deleidi *et al.* (2018), os quais trabalham com economias nacionais e abertas, e o trabalho de Naqvi (2015), o qual trabalha com a economia europeia e utiliza um modelo de economia fechada por simplicidade.

- Tipos de impacto ambiental: variam desde esgotamento do capital natural (FONTANA; SAWYER, 2015; DELEIDI *et al.*, 2018), índices de impacto ambiental (JACKSON *et al.*, 2016b) e dissipação de calor (BERG *et al.*, 2015), até aquecimento global decorrente da emissão de GEE por consumo de energia e MUT.
- Danos ambientais: estão presentes principalmente nos modelos preocupados com aquecimento global e podem afetar a taxa de lucro, a produtividade do trabalho e do capital, a depreciação do estoque de capital e/ou a capacidade produtiva de um modo geral.

Os trabalhos citados podem também ser divididos entre dois grupos em termos das hipóteses testadas: (i) aqueles nos quais a redução das emissões se dá via redução da atividade econômica; e (ii) aqueles nos quais a redução das emissões se dá via melhoria da eficiência energética/investimento em mitigação. O primeiro caso se alinha mais com as ideias dos limites ao crescimento, na medida que entende que o processo de aquecimento global só pode ser atenuado pela desaceleração da economia. O segundo caso, por outro lado, segue uma linha mais próxima da de Harris (2008), Foley (2007) e da hipótese do descolamento, nos quais busca-se saídas para reduzir os impactos ambientais sem grandes prejuízos para o sistema econômico.

Exemplos do primeiro grupo, os trabalhos de Naqvi (2015) e Dafermos *et al.* (2017) mostram que reduções no consumo de fato permitem reduções no nível de emissões no longo prazo, contudo, o menor dinamismo econômico leva também a aumentos do desemprego e da renda per capita. Em sentido semelhante, Jackson *et al.* (2016b) também observam um aumento do desemprego nas simulações em que o produto interrompe seu crescimento, porém, mostram que um papel ativo da política fiscal poderia mitigar esses efeitos adversos sobre o nível de emprego. Além disso, Jackson *et al.* (2016a) e Berg *et al.* (2015) buscam defender que um sistema econômico sem crescimento seria possível mesmo na existência de taxas de juros positivas, o que rebateria certas críticas à proposta dos limites ao crescimento.

Já no segundo grupo, Nordhaus e Sztorc (2013), Dietz e Stern (2015) e Rezai *et al.* (2016) argumentam que a introdução de um sistema de preços de carbono internalizaria os custos ambientais às funções de utilidade dos agentes, os quais, dotados de racionalidade perfeita, investiriam em mitigação o suficiente para reduzir as emissões e seus decorrentes impactos a um nível mínimo. No entanto, mesmo Rezai *et al.* (2016), Taylor e Foley (2014) e Taylor *et al.* (2016) admitem que a hipótese de um agente representativo otimizador não apresenta grande aderência com a realidade, ainda que os experimentos citados possam iluminar as trajetórias ótimas de mitigação a serem perseguidas.

Partindo desse entendimento, Taylor e Foley (2014), Taylor *et al.* (2016) e Rezai *et al.* (2018) introduzem gastos de mitigação determinados exogenamente, de forma a mostrar que investimentos na ordem de 1% a 6% do PIB mundial ao ano seriam suficientes para mitigar todas as emissões de GEE e, com isso, eliminar seus impactos sobre as mudanças climáticas<sup>8</sup>. Pensando nisso, Foley (2007) admite que tais investimentos requereriam a mobilização de largas massas de capital, de forma que o financiamento dos projetos de mitigação deve incorrer em aumento do nível de endividamento do sistema. Ainda assim, defende que seria mais eficiente que esse custo fosse arcado pelas gerações futuras, uma vez que seriam justamente elas as maiores beneficiadas pela prevenção das mudanças climáticas.

Na mesma linha, Bovari *et al.* (2018) determinam um custo de mitigação baseado no preço do carbono, que é imposto às firmas. Com isso, parte do investimento é revertido para mitigação das emissões de GEE e das mudanças climáticas. Por fim, Naqvi (2015) e Dafermos *et al.* (2017) simulam processos de transição energética em direção a uma matriz geradora de baixa emissão de GEE. Dessa forma, permitem ao mesmo tempo algum alívio ao sistema econômico e reduções nas taxas de emissão. No entanto, nenhum dos dois trabalhos apresenta contenção da temperatura média global mesmo frente a uma desaceleração das emissões, o que deveria levar, no mínimo, a questionamentos quanto à adoção das políticas propostas. Deleidi *et al.* (2018) também trabalham nessa linha através de políticas públicas de inovação como instrumento de fomento à transição.

Uma vez apresentadas brevemente as características principais dos trabalhos que buscam soluções para as mudanças climáticas, passaremos agora para apresentação das especificidades do padrão de emissões de GEE brasileiros. Esse recorte visa justificar a adoção de um modelo relativamente mais abrangente do que os desenvolvidos na literatura, de forma que as características brasileiras não sejam excessivamente simplificadas.

## 1.4 O Caso Brasileiro

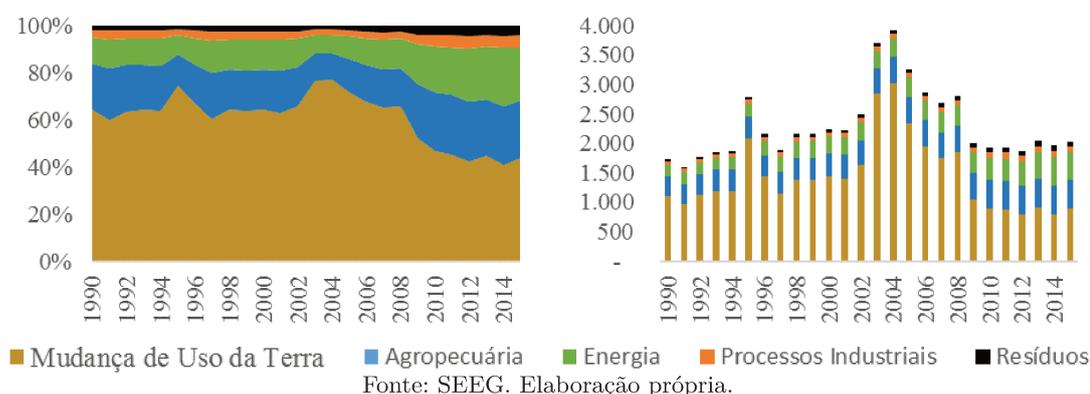
Como apresentado na seção anterior, a maioria dos modelos ecológicos apresentados se concentra, de uma forma ou de outra, nas emissões e impactos derivados do consumo de energia e de combustíveis fósseis, o que se alinha com os dados do IPCC acerca da economia global. De um modo geral, as mudanças de uso da terra e a agropecuária representam um fator muito menos importante de pressão ambiental na maioria dos países do que a indústria e o decorrente consumo de combustíveis fósseis (CAIT, 2017).

Por outro lado, os dados do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de

<sup>8</sup> Esses valores são os mesmos encontrados por Rezai *et al.* (2016) em seu modelo de otimização.

Efeito Estufa (SEEG) mostram que o cenário brasileiro difere muito do panorama mundial. Primeiramente, a agropecuária gera uma quantidade de emissões tão grande quanto a dos setores de energia e combustíveis somados. Em segundo lugar, as MUT representam entre 40% e 60% de todas as emissões no período de 1990-2015 (figura 1.1).

Figura 1.1 – Emissões de GEE no Brasil por Fonte (1990-2015)

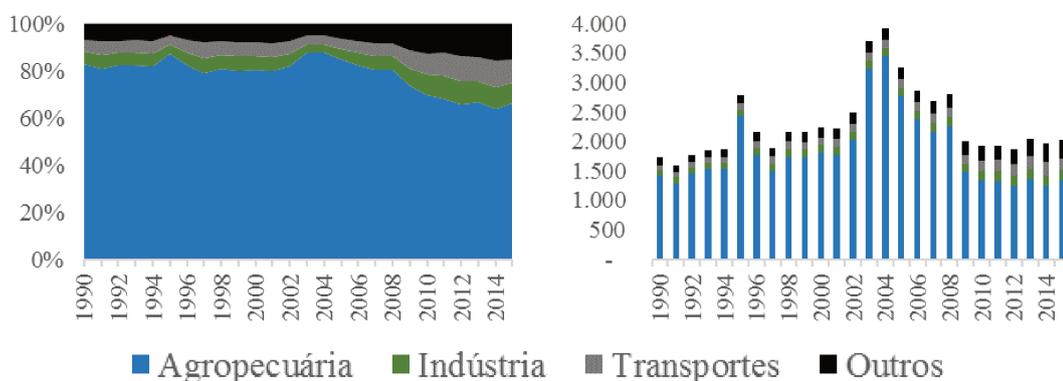


Essas diferenças se baseiam em três fatores principais: (i) a matriz energética brasileira é composta principalmente de usinas hidrelétricas, as quais apresentam emissões muito inferiores às de usinas termoelétricas (AZEVEDO, 2016, p. 23); (ii) a importância do setor agropecuário tanto na provisão ao mercado interno quanto para as exportações; e (iii) as vastas áreas do território ainda cobertas por florestas como a Amazônica, a Atlântica e o Cerrado. Tais características tornam o peso do setor energético e do consumo de combustíveis muito inferior ao normalmente observado nos demais países, ao mesmo tempo em que amplifica os potenciais de emissão da agropecuária e do desmatamento.

Ainda, os principais estados produtores de carne e grãos no Brasil estão localizados em regiões cobertas ou próximas da floresta Amazônica e do Cerrado, o que torna a agropecuária o principal vetor de desmatamento no país (ARIMA; VERÍSSIMO, 2002, p. 6) (MERTENS *et al.*, 2002, p. 271) (MARGULIS, 2003, p. 6) (DINIZ *et al.*, 2009) (CARVALHO; DOMINGUES, 2016, p. 589) (BARBOSA *et al.*, 2015, p. 27). Por isso, se juntarmos o impacto direto da agropecuária com seu impacto indireto sobre o desmatamento, o setor se torna responsável por cerca de 80% do total de emissões no período (figura 1.2).

Com isso, é possível perceber que a composição das emissões de GEE brasileiras é muito distinta da composição da maioria dos outros países. A geração e o consumo de energia não são um problema tão grande quanto o desmatamento e os impactos da pecuária e do uso de fertilizantes na agricultura, o que torna as oportunidades de mitigação dos impactos ambientais muito distintas de uma “simples” mudança da matriz energética. Nesse sentido, reduções muito importantes poderiam ser atingidas, por exemplo, através de mudanças dietéticas e de melhor manejo do esterco na produção de rebanhos bovinos

Figura 1.2 – Emissões de GEE no Brasil por Setor (1990-2015)



Fonte: SEEG. Elaboração própria.

(CERRI *et al.*, 2010, p. 107) (GERBER *et al.*, 2013, p. 45) (SMITH *et al.*, 2014, p. 831), da ampliação das áreas de plantio direto (as quais absorvem mais CO<sub>2</sub> da atmosfera) e de ganhos de eficiência na agropecuária que pudessem reduzir a conversão de florestas em pastos e plantações (CERRI *et al.*, 2010, p. 108–110).

## 1.5 Considerações Finais

Explicitadas essas diferenças, defendemos que um modelo de análise de políticas de mitigação para o Brasil precisa incluir não só as emissões e políticas voltadas ao setor energético, mas também soluções pensadas para o setor agropecuário e o desmatamento. Por isso, o modelo a ser apresentado no capítulo 2 inclui esses três vetores de emissão de GEE e as políticas de mitigação são testadas sobre todos eles.

Ainda, buscou-se comparar não somente estratégias de mitigação, como também estratégias ligadas à crítica de economia ecológica e aos limites ao crescimento. Dessa forma, confrontam-se as proposição debatidas na literatura entre si e com a trajetória de inação frente aos contínuos impactos causados pela atividade econômica sobre o meio ambiente.

## 2 Metodologia

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foi construído um modelo dinâmico de crescimento, o qual foi simulado com a linguagem R e baseado em duas metodologias: (i) a Consistência entre Fluxos e Estoques; e (ii) o modelo de crescimento do tipo Supermultiplicado Sraffiano. Neste capítulo, portanto, apresentaremos a estrutura do modelo e suas características. Para tal, a seção 2.1 apresentará a metodologia da Consistência entre Fluxos e Estoques e as matrizes contábeis que dão suporte ao modelo. Nas seções 2.2 e 2.3 serão apresentadas, respectivamente, as equações econômicas e ambientais que determinam o comportamento das variáveis ao longo do tempo. Ademais, na seção 2.2 também serão brevemente apresentadas as características de modelos de Supermultiplicador Sraffiano e o porquê de sua utilização no presente trabalho.

### 2.1 Consistência entre Fluxos e Estoques (SFC)

A metodologia de Consistência entre Fluxo e Estoques (SFC, no inglês), tal qual proposta por Godley e Lavoie (2006), é composta por duas matrizes que contabilizam todos os fluxos econômicos entre os diversos setores da economia e os estoques de ativos e passivos dos respectivos setores. Ao conectar os fluxos e os estoques, as matrizes garantem consistência contábil ao modelo. Isso se dá por dois motivos: (i) a matriz de fluxos utiliza o princípio de partidas dobradas, no qual os débitos de um determinado setor são necessariamente contabilizados como créditos em um outro setor. Dessa forma, a metodologia SFC garante que todos os fluxos que saem de um setor sejam contabilizados como entrada em outro; (ii) a matriz de estoques garante que todos os ativos financeiros tenham contrapartida em passivos carregados por outro agente.

Os modelos SFC funcionam através de sucessivas iterações entre os fluxos e os estoques. Em cada período, os agentes econômicos são dotados de estoques iniciais e realizam transações entre si de acordo com equações comportamentais que gerem esses fluxos. Ao final de cada período, os saldos restantes atualizam os estoques de acordo com os fluxos líquidos recebidos por cada setor. Dessa forma, torna-se impossível a geração de valor sem uma origem econômica e permite-se acompanhar os impactos das transações econômicas sobre os estoques ao longo do tempo.

Isso posto, passemos para a apresentação das matrizes e das características básicas do modelo. É sempre importante frisar, contudo, que o modelo aqui proposto busca representar uma economia bastante simplificada, abstraindo importantes relações

econômicas a fim de focar nas interações estritamente essenciais para analisar a problemática das mudanças climáticas no âmbito econômico. Assim, a economia simplificada aqui proposta é subdividida entre quatro setores, a saber: (i) famílias, (ii) firmas, (iii) bancos e (iv) governo. A matriz de estoque apresentada na tabela 2.1 contém os estoques carregados por cada um dos setores econômicos:

Tabela 2.1 – Matriz de Estoques

	Famílias	Firmas	Bancos	Governo	$\Sigma$
Estoque de Capital		+K			+K
Riqueza das Famílias	+D		-D		0
Dívida das Firmas		-E	+E		0
Dívida Pública			+B	-B	0
Patrimônio Líquido	$-V_H$	$-V_F$	0	$-V_G$	+K

As famílias guardam sua riqueza em depósitos líquidos (D) no setor bancário, os quais rendem juros todo período. As firmas, por sua vez, possuem todo o estoque de capital da economia (K) e carregam um estoque de dívida (E) contratada junto aos bancos. Essa dívida também incorre em juros a serem pagos todo período ao setor bancário, enquanto o estoque de capital determina a capacidade produtiva máxima da economia. O governo não possui ativos, apenas dívida na forma de títulos da dívida pública (B) que financiam eventuais déficits públicos ao longo do tempo. Assim como a dívida privada, a dívida pública também incorre em pagamento de juros ao setor bancário. Este, por fim, atua apenas como distribuidor dos fundos necessários a cada setor, recebendo os juros das dívidas privadas e pública e pagando os juros referentes aos depósitos das famílias.

Como se observa na tabela 2.1, todos os ativos financeiros (D, E e B) são contrabalanceados por passivos de mesmo valor, por outro lado, o estoque de capital (K) é o único ativo real, não apresentando contrapartida em outros setores. Todos os estoques entram como valores iniciais do modelo em cada período, induzindo o comportamento da atividade econômica.

Passemos agora para a matriz de fluxos entre os setores:

Tabela 2.2 – Matriz de Fluxos

	Famílias	Firmas		Bancos		Governo	$\Sigma$	
		Corrente	Capital	Corrente	Capital			
Consumo	-C	+C					0	
Investimento		+I +M	-I -M				0	
Gasto Público [Produto]		+G [Y]				-G	0	
Salário	+W	-W					0	
Juros Depósitos	$+J_D$			$-J_D$			0	
Juros Dív. Priv.		$-J_F$		$+J_F$			0	
Juros Dív. Públ.				$+J_G$		$-J_G$	0	
Depreciação		-Dep	+Dep				0	
Impostos		-T				+T	0	
[Lucros]		$[\pi_F]$		$[\pi_B]$				
Lucros Ret.		$-\pi^R$	$+\pi^R$				0	
Lucros Distr.	$+\pi_B + \pi^D$	$-\pi^D$		$-\pi_B$			0	
	$+\Delta D$					$-\Delta D$	0	
Sub-total (Poupança)			$-\Delta E$			$+\Delta E$	0	
						$+\Delta B$	$-\Delta B$	0

Os quatro setores apresentados estão dispostos nas colunas, sendo que tanto as firmas como os bancos apresentam subdivisões internas entre suas respectivas contas correntes e de capital. Essa separação se faz necessária para a inclusão dos investimentos e da depreciação do estoque de capital, por exemplo, que são fluxos internos ao setor produtivo, mas que precisam ser tratados abertamente por sua importância macroeconômica. Ainda, tal separação permite diferenciar dentre os fluxos financeiros aqueles que representam apenas pagamento de juros, daqueles que amortizam ou ampliam os passivos dos setores econômicos.

Nas linhas temos os fluxos financeiros entre os respectivos setores, os quais aparecem com sinal positivo no setor que recebe os fluxos e com sinal negativo no setor que realiza o pagamento. Dessa forma, a somatória de todas as linhas deve ser nula, garantindo que todos os fluxos pagos por algum dos setores foram efetivamente recebidos por outro dentre os demais. Não obstante, o resultado das colunas descrito na última linha (“sub-total”) denota a poupança líquida de cada setor<sup>1</sup>. A metodologia de SFC impõe que todos os superávits devem ser convertidos em estoques de algum tipo de ativo e que todos os déficits devem ser financiados pela ampliação de algum estoque de passivo. Com isso, quaisquer que sejam os comportamentos dos fluxos econômicos entre os setores, a metodologia aqui empregada garante que os estoques incorporem os saldos líquidos e, dessa forma, que os resultados de um período sejam carregados para os períodos futuros.

<sup>1</sup> Dado que E e B representam estoques de dívidas, estes entram com sinal negativo (poupança negativa) nos setores das firmas e do governo.

Ao final de cada período, a matriz de estoques é reavaliada de acordo com as variações nos estoques apresentadas na matriz de fluxos. É importante destacar o comportamento do capital físico (K), o qual acumula-se em montante igual ao investimento líquido de cada período (I - Dep). Assim, a tabela 2.3 mostra o valor final dos estoques no período:

Tabela 2.3 – Matriz de Estoques

	Famílias	Firmas	Bancos	Governo	$\Sigma$
Estoque de Capital		+K +I -Dep			+K +I -Dep
Riqueza das Famílias	+D + $\Delta$ D		-D - $\Delta$ D		0
Dívida das Firmas		-E - $\Delta$ E	+E + $\Delta$ E		0
Dívida Pública			+B + $\Delta$ B	-B - $\Delta$ B	0
Patrimônio Líquido	- $V_H$	- $V_F$	0	- $V_G$	+K +I -Dep

Uma vez apresentada a estrutura SFC do modelo, passemos agora para a apresentação das variáveis econômicas e as equações que determinam seu comportamento.

## 2.2 Equações Econômicas do Modelo

Primeiramente, trate-se aqui de um modelo simplificado baseado na economia brasileira cujo produto é determinado pela demanda agregada em uma economia fechada. A escolha por uma economia fechada busca evitar complicações ligadas à taxa de câmbio e ao comportamento da demanda internacional. A equação (2.1) apresenta a determinação do PIB e seus componentes:

$$Y_t = C_t + I_t + M_t + G_t \quad (2.1)$$

Y denomina o produto total, enquanto C, I e G, são seus componentes consumo agregado, investimento e gasto público, respectivamente. M determina os gastos com o enfrentamento do aquecimento global e pode ser entendido como um tipo de investimento não gerador de capacidade produtiva.

O consumo depende de propensões marginais ao consumo da renda disponível (RD) e do estoque de riqueza das famílias (D). Este último componente é utilizado por Godley e Lavoie (2006) e visa incorporar os efeitos da riqueza sobre o consumo. Assim, conforme as famílias acumulam riqueza, a propensão média ao consumo aumenta<sup>2</sup>.

$$C_t = c_1 * RD_t + c_2 * D_{t-1} \quad (2.2)$$

<sup>2</sup> Sendo a propensão média ao consumo C/Y, um maior estoque de riqueza induz um consumo superior frente a um mesmo nível de produto.

A renda disponível soma todas os fluxos de renda recebidos pelas famílias no período anterior: salários ( $W$ ), lucros distribuídos das firmas ( $\pi^D$ ), lucro dos bancos ( $\pi_B$ ) e juros dos depósitos das famílias ( $J_D$ ).

$$RD_t = W_{t-1} + \pi_{t-1}^D + \pi_{B,t-1} + J_{D,t-1} \quad (2.3)$$

Explicado o funcionamento do consumo agregado, passemos agora para a função investimento. Esta segue a forma tradicional dos modelos de Supermultiplicador Sraffiano (SERRANO, 1995; FREITAS, 2014; SERRANO *et al.*, 2017) nos quais o investimento é determinado através de uma propensão marginal a investir ( $h$ ) em relação ao PIB. A equação 2.5 originalmente desenvolvida em tempo contínuo (FREITAS, 2014) foi adaptada para o tempo discreto de forma semelhante à formulação de (BROCHIER; SILVA, 2016).

$$I_t = (1 - \eta) * h_t * Y_{t-1} \quad (2.4)$$

$$h_t = h_{t-1} * [1 + \gamma * (u_{t-1} - \mu)] \quad (2.5)$$

Nessa formulação,  $\mu$  é a taxa normal (ou desejada) de utilização de capacidade, de forma que  $h$  se ajusta de acordo com desvios entre as taxas observadas ( $u$ ) e a taxa desejada. Sendo o parâmetro  $\gamma < 1$ , o modelo assume o formato de ajustamento flexível ou parcial, no qual as empresas recompõe paulatinamente os desvios no nível de utilização. Essa formulação se baseia na ideia de que o investimento só responderia a descolamentos persistentes entre as taxas de utilização observadas e desejadas. Ainda, a adoção de um modelo de ajuste parcial evita as complicações dinâmicas de um modelo de ajuste rígido, o qual costuma produzir flutuações explosivas que impedem a convergência para a taxa desejada. Através do ajustamento flexível, a taxa de utilização tende à taxa normal no longo prazo e o modelo se mostra muito mais estável. Por fim, o parâmetro  $\eta$  define a parcela do investimento total redirecionado para os gastos com mitigação das mudanças climáticas.

A taxa de utilização observada, por sua vez, é dada pela relação entre o produto corrente e a capacidade produtiva máxima do sistema ( $YK$ ), a qual é determinada pelo estoque de capital no início do período e por sua produtividade ( $\sigma$ ).

$$u_t = \frac{Y_t}{YK_t} \quad (2.6)$$

$$YK_t = (1 - \text{dam}f_t) * \sigma * K_{t-1} \quad (2.7)$$

Não obstante, a capacidade produtiva é penalizada por uma função de dano (damf) relativa ao aquecimento global, a qual supõe que aumentos nas temperaturas globais tenderiam a diminuir a produtividade dos fatores ou mesmo destruir capital existente (DAFERMOS *et al.*, 2017, p. 195–196).

Na maioria dos modelos *supply-side*, a função de dano é aplicada diretamente sobre o produto total da economia, uma vez que este é determinado pelas condições de oferta com plena utilização dos fatores (NORDHAUS; SZTORC, 2013; DIETZ; STERN, 2015; REZAI *et al.*, 2016). No nosso caso, como o produto é determinado pela demanda agregada, os danos afetariam apenas a capacidade produtiva máxima. Nesse caso, ao invés de diminuir diretamente a produção, os danos climáticos tenderiam a gerar situação de sobreaquecimento e desabastecimentos, na medida em que o setor produtivo não fosse capaz de fazer frente à demanda agregada corrente em determinado período.

Nesse sentido, caso a demanda corrente seja superior à capacidade produtiva total da economia, isto é,  $Y_t > YK_t$ , temos um cenário de restrição de oferta ao produto. Para não gerar maiores distorções, consideramos que os componentes da demanda agregada são penalizados proporcionalmente à sua participação no PIB da seguinte forma:

$$Y_t > YK_t \begin{cases} C_t = \frac{C_t}{Y_t} * YK_t \\ I_t = \frac{I_t}{Y_t} * YK_t \\ M_t = \frac{M_t}{Y_t} * YK_t \\ G_t = \frac{G_t}{Y_t} * YK_t \end{cases} \quad (2.8)$$

De volta à função de dano (equação 2.9), esta segue a formulação de Weitzman (2012) também defendida por Dietz e Stern (2015). A formulação original foi desenvolvida por Nordhaus através de calibragem para os danos estimados para aumentos de 3°C nas temperaturas globais e continha apenas o termo quadrático. Contudo, como apontam Weitzman (2012) e Dietz e Stern (2015), essa formulação não dava conta das estimativas de danos para temperaturas maiores, por isso, o segundo termo foi incluído para que a função produzisse danos mais severos para aumentos entre 4°C e 6°C<sup>3</sup>.

$$damf_t = 1 - \frac{1}{1 + d_1 * T_{AT_t}^2 + d_2 * T_{AT_t}^{6.754}} \quad (2.9)$$

Frente a esses impactos sobre o produto, introduzimos aqui gastos direcionados a mitigar seus efeitos, os quais denominamos M. Para fins de simulações de políticas

<sup>3</sup> Para uma discussão mais aprofundada sobre os diferentes formatos da função de dano e sobre a aplicação desta apenas sobre a produtividade do capital, ver o Anexo B deste trabalho.

alternativas, formulamos o montante destinado ao enfrentamento das questões climáticas como uma parcela  $\eta$  do investimento total. Assim,  $M$  é dado por:

$$M_t = \eta * h_t * Y_{t-1} \quad (2.10)$$

Por fim, o último componente da demanda agregada, o gasto público, cresce a uma taxa exógena ( $g_0$ ), mas se ajusta a variações nas arrecadações dos períodos anteriores ( $T_{t-1}$  e  $T_{t-2}$ ). O objetivo deste segundo termo é tornar o gasto público relativamente pró-cíclico de forma que o governo busque reduzir seus gastos em momentos nos quais a arrecadação se reduz e permita ampliá-los acima da taxa exógena em momentos nos quais a arrecadação cresce. Nesse sentido, o parâmetro  $g_1 < 1$  amortece as variações na arrecadação, de forma a suavizar seus impactos sobre o crescimento do gasto.

No âmbito dos modelos de Supermultiplicador, o gasto público funciona aqui como o componente de gasto autônomo que cresce de forma independente à renda, portanto, ao endogeneizar a determinação do investimento, é a taxa de crescimento do gasto público que determinará a taxa de crescimento do produto e das demais variáveis no longo prazo.

$$G_t = (1 + g_0) * G_{t-1} + g_1 * (T_{t-1} - T_{t-2}) \quad (2.11)$$

A arrecadação tributária, por sua vez, é assumida de forma simplificada como uma fração fixa do produto. Essa formulação busca evitar as excessivas complicações do sistema tributário brasileiro ao mesmo tempo em que reproduz o fato estilizado de que a relação arrecadação/PIB tende a não flutuar muito ao longo do tempo.

$$T_t = tax * Y_t \quad (2.12)$$

Uma vez apresentados os componentes da demanda agregada, passemos agora para a análise dos fluxos de renda.

As firmas recebem o produto total da economia como receita e remuneram os fatores de produção. Assim, o lucro total das firmas ( $\pi_F$ ) depende da massa salarial ( $W$ ), dos juros pagos sobre o estoque de dívida das firmas ( $J_F$ ), dos impostos pagos ( $T$ ) e dos fundos retidos para recomposição da depreciação do capital ( $Dep$ ). Os impostos são pagos exclusivamente pelas firmas por simplificação, contudo, entende-se que essa formulação de certa forma contabiliza tanto o imposto de renda sobre os salários (os quais são retidos na fonte) quanto os impostos indiretos (também recolhidos pelas firmas). Assim, ainda que estejamos desconsiderando outros impostos como os impostos sobre lucros ou sobre

ativos, a imposição do peso dos impostos apenas sobre as firmas abarca a maior parte das fontes tributárias do governo brasileiro, a saber, o IRPF e os impostos indiretos.

$$\pi_{F_t} = Y_t - W_t - J_{F_t} - T_t - Dep_t \quad (2.13)$$

A massa salarial ( $W$ ) depende do número de pessoas empregadas ( $L$ ) e do salário individual ( $w$ ) tal qual a equação (2.14).

$$W_t = w_t * L_t \quad (2.14)$$

O salário individual, por sua vez, depende do salário do período inicial e da acumulação total de capital até o período (2.15). Seguindo uma abordagem Kaldoriana, a produtividade do trabalho estaria diretamente relacionada ao acúmulo de capital, uma vez que melhores máquinas aumentariam o coeficiente tecnológico movimentado pela mão de obra, amplificando o produto por trabalhador (TAYLOR, 2010, p. 173; 179).

Nesse sentido,  $K_{t-1}/K_1$  é o índice de acumulação de capital no período  $t$ , sendo  $K_1$  o estoque de capital no período inicial.  $K_{t-1}/K_1$  também pode, portanto, ser entendido como o índice de aumento de produtividade do trabalho em relação a seu nível inicial. Como o foco deste estudo são os movimentos reais da economia e seus impactos ambientais, adotamos por simplificação que no longo prazo todo o ganho de produtividade é repassado aos salários, de forma que o salário inicial cresce junto com a produtividade. Tal pressuposto buscar evitar complicações relacionadas ao conflito distributivo entre trabalho e capital que fogem ao escopo deste trabalho, ainda que reconheçamos estarmos suprimindo importantes dinâmicas salariais em prol de um sistema mais simples e estável.

$$w_t = w_1 * \frac{K_{t-1}}{K_1} \quad (2.15)$$

Para detalhar a relação entre o salário individual e a acumulação de capital, a equação (2.15) pode ser reescrita também como (2.15b). Ou seja, o aumento dos salários em cada período é igual ao acúmulo de capital no período anterior.

$$w_t = w_{t-1} * \frac{K_{t-1}}{K_{t-2}} \quad (2.15a)$$

$$\Delta w_t = \Delta K_{t-1} \quad (2.15b)$$

Quanto à determinação do emprego, entende-se que para um dado nível de produtividade, a quantidade de pessoas empregadas será diretamente proporcional ao

tamanho do produto e inversamente proporcional à acumulação de capital (equação 2.16).

$$L_t = \frac{L_1}{Y_1} * \frac{K_1}{K_{t-1}} * Y_t = \Omega * \frac{Y_t}{K_{t-1}} \quad (2.16)$$

Sendo  $L_1/Y_1$  o inverso da produtividade inicial do trabalho e  $K_1/K_{t-1}$  o inverso do índice de acumulação de capital no período t. Como explicitado acima, a acumulação de capital induz aumentos diretamente proporcionais à produtividade do trabalho, de maneira que  $(L_1/Y_1) * (K_1/K_{t-1})$  pode ser entendido como o inverso da produtividade corrente do trabalho. Assim, ao multiplicar este termo pelo produto corrente temos a necessidade corrente de mão de obra para atender a demanda agregada no período t. Para facilitar a leitura, utilizamos  $\Omega = (L_1 * K_1)/Y_1$  para aglutinar todos os termos referentes ao período inicial e, portanto, constantes.

Ao juntar as equações (2.14 - 2.16) vemos que mesmo frente a variações no nível de emprego, a relação entre a massa salarial e o produto permanecerá fixa e determinada pelas condições do período inicial (2.16c). Isso se dá porque os ganhos de produtividade, ao mesmo tempo em que aumentam os salários, também diminuem a demanda por mão de obra, estabilizando a proporção entre a massa salarial W e o produto. Em outras palavras, se os ganhos de produtividade são inteiramente repassados aos salários, então a proporção da massa salarial em relação ao PIB se torna constante.

$$W_t = w_t * L_t = (w_1 * \frac{K_{t-1}}{K_1}) * (\frac{L_1}{Y_1} * \frac{K_1}{K_{t-1}} * Y_t) \quad (2.16a)$$

$$W_t = w_1 * \frac{L_1}{Y_1} * Y_t \quad (2.16b)$$

$$\frac{W_t}{Y_t} = w_1 * \frac{L_1}{Y_1} \quad (2.16c)$$

Os juros pagos pelas firmas aos bancos são proporcionais ao estoque de dívida (E) no início do período e à taxa de juros real exógena ( $i_F$ ). A depreciação, de maneira análoga, depende do estoque de capital (K) no início do período e da taxa de depreciação ( $\delta$ ). Diferentemente dos juros, no entanto, o valor da depreciação é retido pelas firmas para financiar a reposição do capital.

$$J_{F_t} = i_F * E_{t-1} \quad (2.17)$$

$$Dep_t = \delta * K_{t-1} \quad (2.18)$$

Após o pagamentos de todos os seus custos, as firmas auferem o que Godley e Lavoie (2006) chamaram de lucros do empreendedor, os quais são parte retidos para

financiar o investimento ( $\pi^R$ ) e o restante distribuídos às famílias ( $\pi^D$ ). O parâmetro  $\alpha$  determina a divisão entre cada um.

$$\pi_t^R = \alpha * \pi_{F_t} \quad (2.19)$$

$$\pi_t^D = (1 - \alpha) * \pi_{F_t} \quad (2.20)$$

Pelo lado dos bancos, estes intermedeiam os estoques de dívida de todos os setores e os juros referentes. Com isso, recebem os juros das dívidas das firmas e do governo ( $J_F$  e  $J_G$ ), enquanto pagam às famílias os juros dos depósitos ( $J_D$ ). O saldo dessas operações é auferido como lucro do setor bancário ( $\pi_B$ ). Por simplicidade, assumimos que os bancos redistribuem a totalidade de seus lucros às famílias, de maneira que não acumulam estoques próprios de qualquer natureza.

$$\pi_{B_t} = J_{F_t} + J_{G_t} - J_{D_t} \quad (2.21)$$

Os juros da dívida pública e dos depósitos das famílias são calculados da mesma forma que os juros da dívida das firmas:  $r$  e  $i_H$  são as respectivas taxas de juros reais e  $B$  e  $D$  os estoques.

$$J_{G_t} = r * B_{t-1} \quad (2.22)$$

$$J_{D_t} = i_H * D_{t-1} \quad (2.23)$$

Assim, as equações (2.24 - 2.26) representam os fechamentos contábeis, com as variações nos estoques dos ativos financeiros resultando do saldo líquido de cada setor no período.

$$\Delta E_t = I_t - Dep_t - \pi_t^R \quad (2.24)$$

$$\Delta B_t = G_t + J_{G_t} - T_t \quad (2.25)$$

$$\Delta D_t = RD_t - C_t \quad (2.26)$$

A junção da equação (2.26) com a equação (2.2) também permite notar que implicitamente consideramos que a dinâmica da acumulação das famílias é induzida por

uma relação desejada entre os depósitos líquidos (D) e a renda disponível (RD). Substituindo (2.2) em (2.26) temos:

$$\Delta D_t = (1 - c_1) * RD_t - c_2 * D_{t-1} \quad (2.26a)$$

$$\frac{\Delta D_t}{c_2} = c_3 * RD_t - D_{t-1} \quad (2.26b)$$

Sendo  $c_3 = (1 - c_1)/c_2$ . Vê-se, portanto, que a variação nos depósitos líquidos será nula quando  $D_{t-1}/RD_t = c_3$ . Assim, podemos entender  $c_3$  como a relação desejada entre os depósitos líquidos das famílias e a renda disponível, o que mostra que a acumulação de riqueza pelas famílias se dá em função dos descolamentos entre essa razão desejada  $c_3$  e a relação efetivamente observada no período. O parâmetro  $c_2$ , por sua vez, funciona como um fator de ajuste parcial, de forma que os desvios entre  $c_3$  e a relação  $D_{t-1}/RD_t$  se dão gradativamente ao longo do tempo, evitando maiores volatilidades no acúmulo de riqueza das famílias.

Por fim, a equação (2.27) apresenta o processo de acumulação de capital de acordo com o investimento líquido de depreciação.

$$\Delta K_t = I_t - Dep_t \quad (2.27)$$

Além do bloco de equações econômicas (2.1 - 2.27), o modelo inclui também um bloco de equações ambientais de mudanças climáticas que conecta a atividade econômica, a acumulação de gases de efeito estufa (GEE) e o aumento da temperatura global. Essas equações serão apresentadas na seção seguinte.

## 2.3 Equações Ambientais do Modelo

O principal elo que liga os dois sistemas são as emissões ligadas ao consumo de energia ( $Emis_E$ ), tal qual a maior parte dos artigos da literatura sobre o tema. Nesse sentido,  $\epsilon_3$  é a taxa de emissão de GEE por unidade de PIB.

$$Emis_{E_t} = \epsilon_3 * Y_t \quad (2.28)$$

Como discutido na seção 1.4, as emissões brasileiras apresentam um padrão bastante distinto da maioria dos demais países. Por isso, incluímos aqui também as emissões referentes à agropecuária ( $Emis_P$ ) e ao desmatamento ( $Emis_D$ ). O primeiro depende principalmente do tamanho dos rebanhos bovinos, uma vez que o processo digestivo e o manejo dos dejetos representam em média 70% das emissões de todo o setor agropecuário

(CLIMA, 2016). Ademais, a proporção entre as emissões bovinas e o total do setor agropecuário se mostra bastante constante ao longo dos anos, de forma que as últimas podem ser estimadas através das primeiras.

$$Emis_{P_t} = \epsilon_1 * Reb_t \quad (2.29)$$

A variável “Reb” representa o tamanho dos rebanhos bovinos, os quais provém tanto o mercado interno quanto externo de carne, enquanto  $\epsilon_1$  é a taxa de emissões por cabeça de gado. Historicamente, o tamanho dos rebanhos tende a acompanhar muito fielmente o tamanho da população brasileira, com um descolamento a partir de meados dos anos 2000 com o aumento da importância do setor externo na demanda de carne (CLIMA, 2016). Por isso, a taxa de crescimento dos rebanhos será determinada pela taxa de crescimento da população ( $gp_t$ ) e por uma taxa exógena para mimetizar a demanda do setor externo ( $\beta_1$ ).

$$Reb_t = (\beta_1 + gp_t) * Reb_{t-1} \quad (2.30)$$

A taxa de crescimento populacional segue as projeções do IBGE (IBGE, 2013), enquanto a taxa exógena  $\beta_1$  segue as estimativas de aumento da demanda mundial por carne da FAO (ALEXANDRATOS *et al.*, 2012).

$$gp_t = \begin{cases} gp_{t-1} - 0,025\%, & t < 40 \\ gp_{t-1}, & t \geq 40 \end{cases} \quad (2.31)$$

Em seguida, passamos para as emissões derivadas do desmatamento. O parâmetro  $\epsilon_2$  converte a área desmatada medida em hectares (DESM) em GEE emitidos. Para determinar a dinâmica do desmatamento no país, nos apoiamos em diversos estudos que indicam que a expansão da fronteira agrícola é o principal vetor de desmatamento no país (ARIMA; VERÍSSIMO, 2002, p. 6) (MERTENS *et al.*, 2002, p. 271) (MARGULIS, 2003, p. 6) (DINIZ *et al.*, 2009) (CARVALHO; DOMINGUES, 2016, p. 589) (BARBOSA *et al.*, 2015, p. 27). Isso se dá em boa parte porque a produção agropecuária de grãos e de bovinos de corte se concentra nos biomas do cerrado e da Amazônia, os quais são os principais afetados pelo desmatamento. Assim, a área desmatada será modelada como uma função direta do aumento dos rebanhos, de forma que o parâmetro  $\beta_2$  converta o crescimento da pecuária em hectares de desmatamento.

$$Emis_{D_t} = \epsilon_2 * DESM_t \quad (2.32)$$

$$DESM_t = \begin{cases} \beta_2 * \Delta Reb_t, & \Delta Reb_t \geq 0 \\ 0, & \Delta Reb_t < 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

$$Emis_{TOT_t} = Emis_{P_t} + Emis_{D_t} + Emis_{E_t} \quad (2.34)$$

As emissões totais do país em cada período ( $Emis_{TOT}$ ) são a somatória das emissões referentes às três fontes apresentadas. Contudo, como apresentado, introduzimos também um gasto com mitigação dessas emissões, de forma que uma parcela das emissões totais é abatida de acordo com a equação (2.35):

$$Emis_{M_t} = \frac{M_t}{\rho} \quad (2.35)$$

Dado o gasto  $M$  (em Reais), o parâmetro  $\rho$  representa o custo (R\$/GtCO<sub>2</sub>) que converte o gasto monetário em GtCO<sub>2</sub> abatidos das emissões totais. É importante ressaltar que uma trava foi estabelecida no código do modelo para que o volume mitigado nunca ultrapasse as emissões totais do período.

As emissões líquidas ( $Emis_{TOT_t} - Emis_{M_t}$ ) se acumulam na atmosfera de acordo com o ciclo do carbono simplificado proposto por Nordhaus e Sztorc (2013). Nele, as emissões entram diretamente na atmosfera de acordo com a equação (2.36), contudo, os GEE presentes na atmosfera são absorvidos lentamente pela camada superficial dos oceanos ( $CO2_{UP}$ ). Não obstante, essa camada superficial também troca GEE com camadas oceânicas mais profundas (equações 2.37 e 2.38).

Os parâmetros  $\phi$  determinam a velocidade pela qual fluem os GEE entre os diferentes reservatórios adjacentes. Por sua vez, o parâmetro “escala” multiplica as emissões totais pela proporção das emissões brasileiras em relação às emissões mundiais. Esse artifício se faz necessário uma vez que as consequências do acúmulo de GEE na atmosfera se dão em escala global e não nacional. Assim, ao escalonar as emissões brasileiras, emulamos um cenário no qual o país sofre diretamente as consequências de seu padrão de emissões sem que seja necessário modelar o comportamento das demais nações.

$$CO2_{AT_t} = escala * (Emis_{TOT_t} - Emis_{M_t}) + \phi_{11} * CO2_{AT_{t-1}} + \phi_{21} * CO2_{UP_{t-1}} \quad (2.36)$$

$$CO2_{UP_t} = \phi_{11} * CO2_{AT_{t-1}} + \phi_{22} * CO2_{UP_{t-1}} + \phi_{23} * CO2_{LO_{t-1}} \quad (2.37)$$

$$CO2_{LO_t} = \phi_{23} * CO2_{UP_{t-1}} + \phi_{33} * CO2_{LO_{t-1}} \quad (2.38)$$

A partir da determinação do estoque total de GEE presentes na atmosfera em cada período, é possível estimar o aumento das forças radiativas e seus impactos decorrentes na temperatura global. A equação (2.39) apresenta o valor da força radiativa com base na duplicação do estoque de GEE atmosférico em relação a seu nível pré-industrial ( $CO2_{AT-PRE}$ ) e em um fator exógeno ( $F_{EX}$ ) que incorpora outros impactos antropogênicos. Por sua vez, a equação (2.40) apresenta o crescimento das força radiativas exógenas  $F_{EX}$  à taxa “fex”.

$$FORC_t = F2CO2 * \log_2\left(\frac{CO2_{AT_t}}{CO2_{AT-PRE}}\right) + FEX_t \quad (2.39)$$

$$FEX_t = FEX_{t-1} + fex \quad (2.40)$$

Finalmente, as temperaturas atmosféricas globais e dos oceanos profundos são determinadas pelas equações (2.41 - 2.42), respectivamente. A primeira depende das forças radiativas e da troca de calor com os oceanos profundos determinada pelo termo  $T2_2 * (T_{AT_{t-1}} - T_{LO_{t-1}})$ . A segunda, por sua vez, depende apenas da troca de calor com a atmosfera, não sendo impactada pelo aumento das forças radiativas.

$$T_{AT_t} = T_{AT_{t-1}} + Te_1 * (FORC_t - \frac{F2CO2}{S} * T_{AT_{t-1}} - Te_2 * (T_{AT_{t-1}} - T_{LO_{t-1}})) \quad (2.41)$$

$$T_{LO_t} = T_{LO_{t-1}} + Te_3 * (T_{AT_{t-1}} - T_{LO_{t-1}}) \quad (2.42)$$

Uma vez apresentadas as equações e a estrutura geral do modelo, breves considerações finais encerram este capítulo antes de passarmos para os resultados das simulações testadas.

## 2.4 Considerações Finais

Como apresentado neste capítulo, procuramos desenvolver um modelo de crescimento puxado pela demanda que se conecta com um ciclo simplificado do carbono através das emissões energéticas de GEE. Procuramos também incluir emissões derivadas da agropecuária e do desmatamento de forma a abarcar o padrão específico de emissões brasileiras, além de investimentos em mitigação das mudanças climáticas não geradores de capacidade produtiva.

Assim, no próximo capítulo, serão apresentados o funcionamento básico do modelo, suas características principais e, então, as simulações de políticas e seus impactos.

Como dito anteriormente, confrontamos não só a trajetória sem qualquer política de enfrentamento, como também uma simulação de “limites ao crescimento” e outra de políticas de mitigação das emissões. Dessa forma, poderemos comparar as diferentes estratégias, seus custos e benefícios.

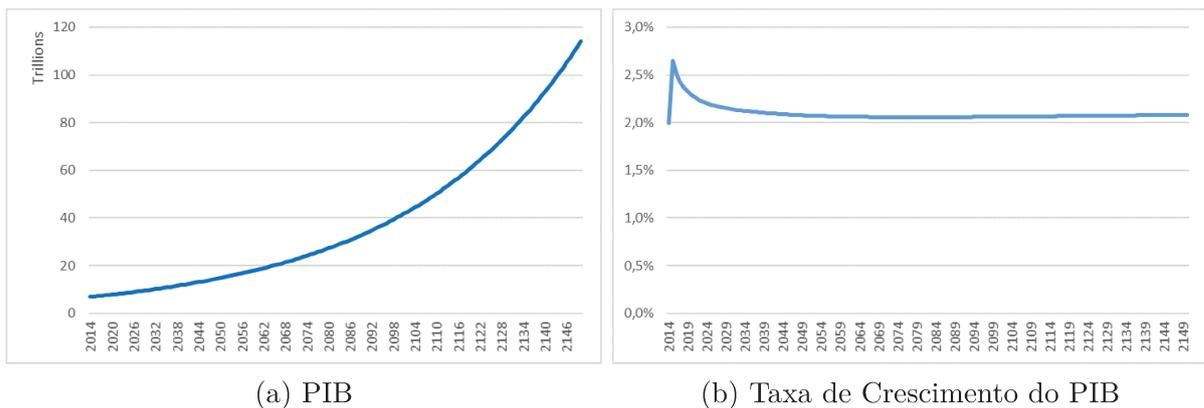
## 3 Resultados

### 3.1 Funcionamento do Modelo sem Políticas de Enfrentamento das Mudanças Climáticas

Para entender melhor os impactos das políticas testadas, apresentaremos inicialmente o comportamento ”*business as usual*” dessa economia, o que permite entender um pouco melhor seu funcionamento e suas principais características. O modelo foi calibrado para dados de 2014 e simulado até o ano de 2150<sup>1</sup>, com alguns poucos parâmetros ajustados manualmente para garantir o comportamento macro desejado<sup>2</sup>. As primeiras simulações foram feitas sem uma função de dano ambiental para mostrar o comportamento “normal” do sistema econômico. Em seguida, mostraremos as mudanças induzidas pela introdução do dano ambiental.

Primeiramente, o modelo parece conseguir produzir uma economia em crescimento relativamente estável (figura 3.1a), cuja taxa de crescimento (figura 3.1b) se estabiliza em torno de 2% ao ano no longo prazo. O choque brusco inicial na taxa de crescimento representa apenas o modelo convergindo para o equilíbrio e, portanto, não implica em qualquer intuição econômica relevante.

Figura 3.1 – Crescimento do Produto



Fonte: Elaboração própria.

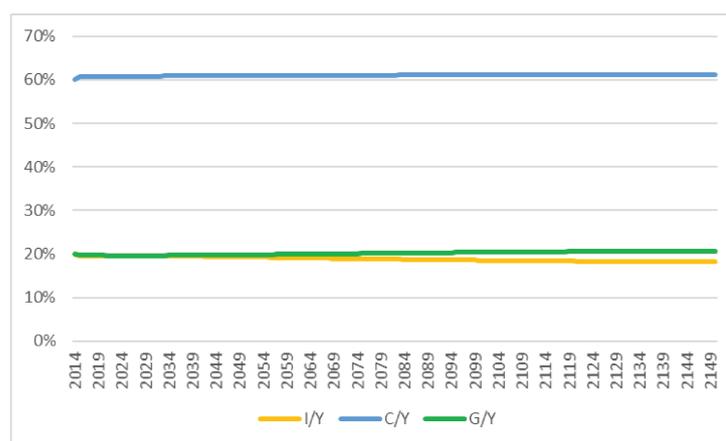
Todos os componentes da demanda agregada crescem a taxas próximas ao produto, de forma que a composição do PIB se mantém relativamente estável ao longo da

<sup>1</sup> Usualmente, os modelos climáticos trabalham com horizontes de 100 anos, contudo, aqui foi necessário estender um pouco o número de períodos uma vez que os impactos ambientais sobre o sistema econômico só são perceptíveis após a virada do século, mesmo que suas causas remontem a várias décadas antes.

<sup>2</sup> Os valores dos parâmetros e das condições iniciais das variáveis podem ser conferidos no anexo A.

simulação. A única mudança mais pronunciada se dá no investimento (I), o qual decresce de seu valor inicial (20% do PIB) em direção a aproximadamente 18% do PIB (linha amarela). Isso se dá pelo fato de que uma taxa de investimento de 20% é excessivamente alta para uma economia que cresce a 2% a.a., com uma relação capital produto desejada de 2,5 e uma taxa de depreciação é 5%. O aumento de qualquer uma dessas variáveis induz uma taxa de investimento de equilíbrio superior a 18%.

Figura 3.2 – Componentes da Demanda Agregada

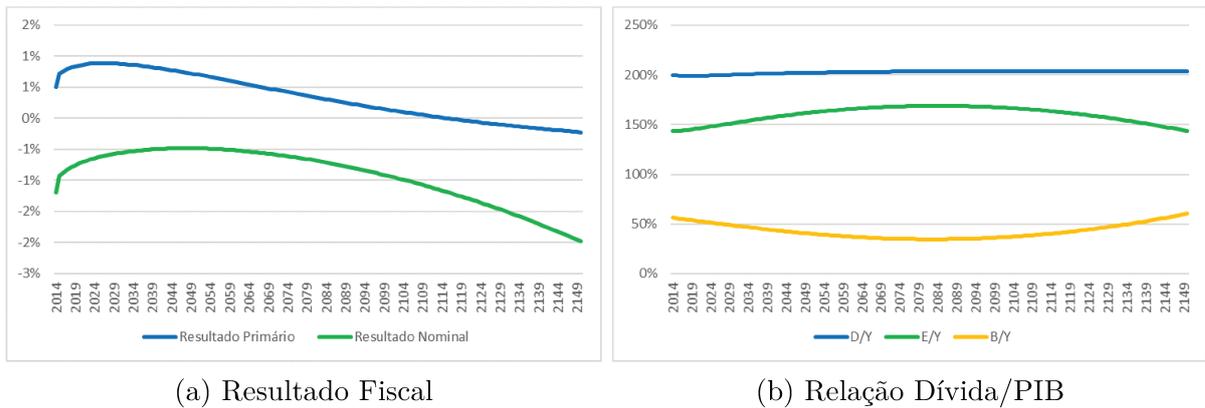


Fonte: Elaboração própria.

A queda da taxa de investimento tem um impacto direto sobre as contas públicas, na medida em que, ao reduzir sua participação no produto total, acaba por elevar a participação do consumo agregado e do gasto do governo. Dado que a arrecadação do governo é constante em 20% do PIB, quando a participação do gasto público no produto sobe dos 20% iniciais para qualquer valor acima disso, reverte-se o superávit primário inicial e transforma-o em um leve déficit (linha azul, figura 3.3a).

Dessa forma, a relação dívida pública/PIB, que vinha se reduzindo lentamente, passa a subir, aumentando a carga de juros e retroalimentando o processo inicial de crescimento (linha amarela, figura 3.3b). Ainda que tímido, o processo de aumento da relação dívida pública/PIB continua nos próximos períodos em simulações mais longas. Finalmente, dadas as restrições contábeis da metodologia SFC, o aumento do endividamento público sempre será acompanhado por desendividamento privado, o que explica a queda da relação dívida privada/PIB (linha verde, 3.3b).

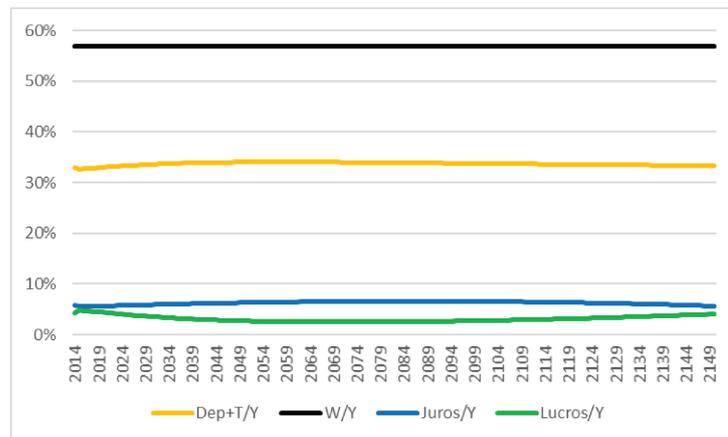
Figura 3.3 – Resultado do Governo



Fonte: Elaboração própria.

A distribuição das rendas também parece relativamente estável, salvo por uma pequena queda da participação dos lucros (verde) em favor da depreciação e dos impostos (amarelo) - à medida em que aumenta a relação capital-produto da economia - e dos juros (azul), conforme aumenta a relação dívida privada/PIB.

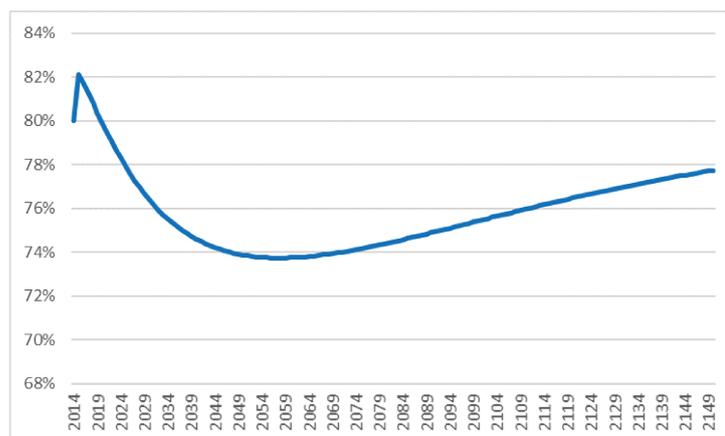
Figura 3.4 – Distribuição Funcional da Renda



Fonte: Elaboração própria.

O uso de um modelo de Supermultiplicador Sraffiano induz a utilização da capacidade em direção à capacidade desejada de 80%. Ainda que a flutuação registrada não seja de grande magnitude (pouco mais de 6 p.p. em seu período mais baixo), não foi possível acelerar o processo de convergência, o qual não se completou mesmo em simulações de 200 períodos. Isso se deve ao fato de que os gastos com investimento consomem mais capacidade produtiva do que geram, de forma que acelerar o processo de convergência implica em aumentar a volatilidade do investimento. Uma taxa de investimento mais volátil leva a instabilidades dinâmicas na medida em que pode induzir processos explosivos de: capacidade utilizada acima do normal levando a aumento do investimento. Este ocupa ainda mais a capacidade instalada, induzindo novo aumento do investimento e assim sucessivamente.

Figura 3.5 – Utilização da Capacidade Instalada

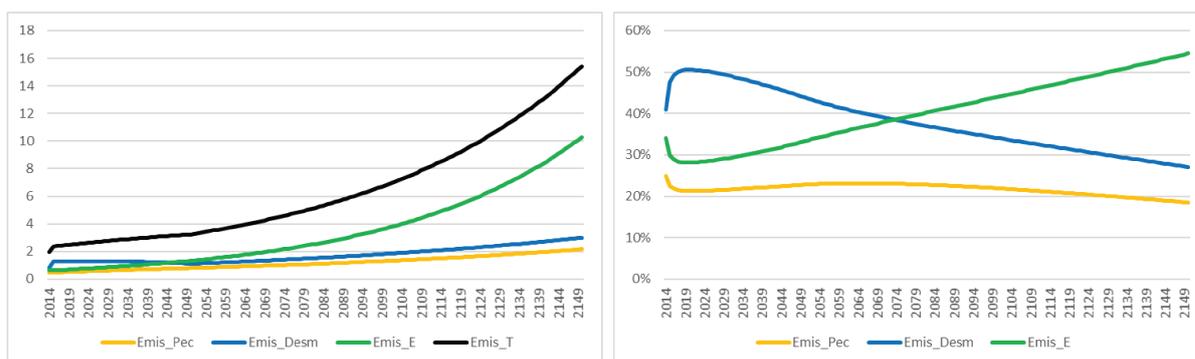


Fonte: Elaboração própria.

Pelo lado ambiental, as emissões referentes à produção energética (verde, figura 3.6a) acompanham a trajetória explosiva do PIB, enquanto as emissões da agropecuária (amarelo, figura 3.6a) e do desmatamento (azul, figura 3.6a) crescem a uma taxa mais baixa. Vê-se também que a geração de energia se torna rapidamente o principal vetor das emissões totais (preto, figura 3.6a).

A figura (3.6b) mostra a participação de cada vetor nas emissões acumuladas no período. Após 136 anos, a agropecuária e o desmatamento teriam sido responsáveis por cerca de 45,5% das emissões acumuladas no período.

Figura 3.6 – Emissões de GEE



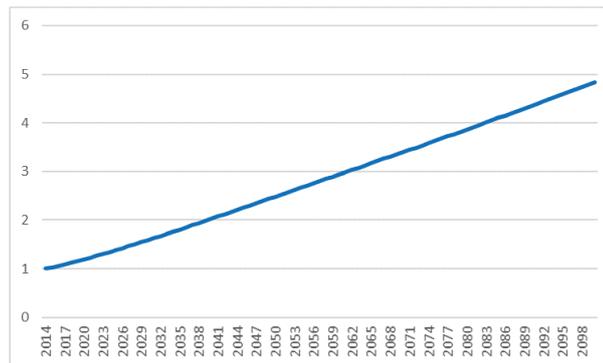
(a) Emissões ao Ano (GtCO<sub>2</sub>e)

(b) Emissões Acumuladas

Fonte: Elaboração própria.

As emissões brasileiras foram escaladas para que as políticas adotadas pelo país tenham impactos globais e danos ao sistema econômico. Com isso, o bloco ambiental do modelo busca simular a trajetória das temperaturas globais como se as emissões mundiais seguissem o mesmo padrão das emissões brasileiras. Nesse sentido, o aumento das temperaturas médias globais atinge por volta de 4,8°C ao final do século XXI, em linha com as projeções "baseline" do último relatório do IPCC.

Figura 3.7 – Aumento da Temperatura Média Global acima do Nível Pré-industrial

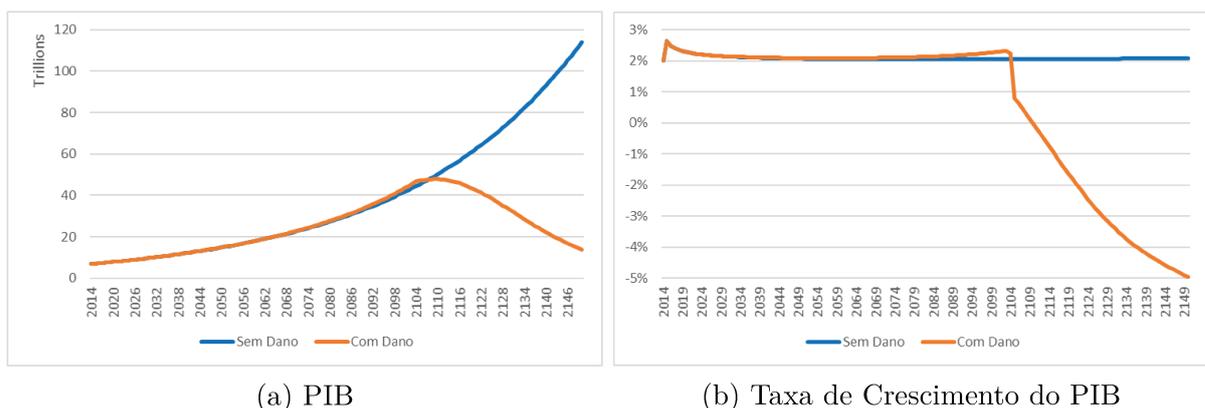


Fonte: Elaboração própria.

Até aqui, a ideia foi mostrar como o modelo desenvolvido reproduz uma economia em crescimento estável e equilibrado, além de mimetizar as projeções climáticas desenvolvidas pelo IPCC. Uma vez apresentada essa versão “normal” do modelo, veremos os impactos da introdução do aquecimento global e seus danos sobre as principais variáveis.

Pela figura (3.8a), é possível ver claramente que a versão com danos ambientais (laranja) leva o produto em direção ao colapso pouco depois da virada do século. É interessante também apontar o fato de que a taxa de crescimento do PIB no novo modelo se eleva em um primeiro momento antes de colapsar (laranja, figura 3.8b).

Figura 3.8 – Crescimento do Produto com Danos Ambientais



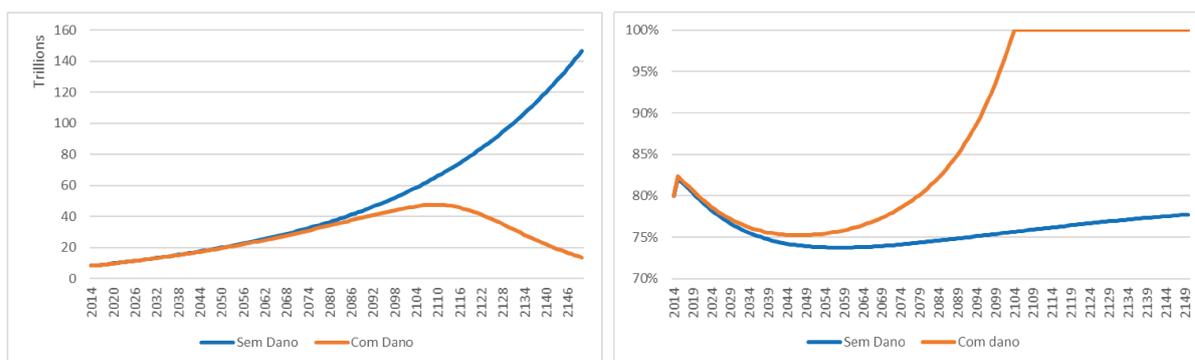
Fonte: Elaboração própria.

Isso se dá através da capacidade produtiva máxima, a qual é reduzida pelos danos ambientais (laranja, figura 3.9a). A taxa de utilização da capacidade sobe muito mais rapidamente e ultrapassa o valor desejado de 80% (laranja, figura 3.9b). Um maior grau de utilização acelera a taxa de investimento, puxando o resto do produto consigo. Em termos de modelos de Supermultiplicador Sraffiano, o dano ambiental aumenta a diferença entre a capacidade produtiva gerada pelo investimento e a capacidade ocupada pelo mesmo. Dessa forma, ao ultrapassar a taxa de utilização desejada, o sistema tem

grande dificuldade em convergi-la de volta aos 80%.

Também é importante demonstrar o mecanismo pelo qual o produto inicia sua trajetória de declínio. A figura (3.9a) permite perceber que, a partir do ano 2105, a economia atinge plena utilização de capacidade. Em modelos cujo produto é determinado pelo lado da oferta, os danos ambientais penalizam diretamente o volume produzido a cada ano. Aqui, a demanda agregada é que puxa o produto e as mudanças climáticas atingem o sistema produtivo através de restrições de oferta. Ao atingir a capacidade máxima, todos os componentes da demanda agregada são penalizados proporcionalmente à sua participação no total (equação 2.8), de forma que o investimento se torna progressivamente incapaz de gerar capacidade acima da demanda. Com isso, o sistema entra em uma espiral recessiva até o colapso total.

Figura 3.9 – Capacidade Produtiva e Taxa de Utilização com Danos Ambientais



(a) Capacidade Produtiva Máxima

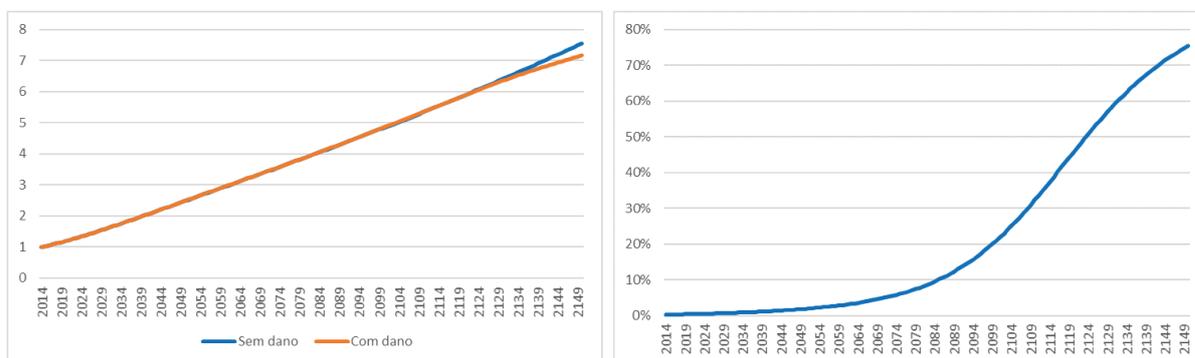
(b) Taxa de Utilização da Capacidade

Fonte: Elaboração própria.

Antes de prosseguir, vale ressaltar que seria razoável supor que mecanismos de coordenação fossem colocados em prática em uma economia real para garantir o direcionamento dos recursos em direção a investimentos que destravassem o gargalo produtivo. Contudo, dada a complexidade teórica e prática de tal coordenação, optamos por aplicar um sistema simplificado de distribuição dos recursos de forma a mostrar apenas as dificuldades que seriam geradas por tal situação de agravamento das condições climáticas.

Do ponto de vista ambiental, esse mesmo processo pode ser observado no aumento da temperatura média global (figura 3.10a) e na porcentagem de dano sobre a produtividade do capital (figura 3.10b). A primeira se expande um pouco menos do que no modelo sem função de dano, refletindo o impacto do colapso econômico nos últimos períodos. Já o segundo mostra como a produtividade do capital chega a ser penalizado em mais de 70% ao final da simulação, tornando inviável a sustentabilidade do sistema.

Figura 3.10 – Aumento da Temperatura Média Global e Reduções sobre a Produtividade do Capital



(a) Aumento da Temperatura Média Global      (b) Reduções na Produtividade do Capital

Fonte: Elaboração própria.

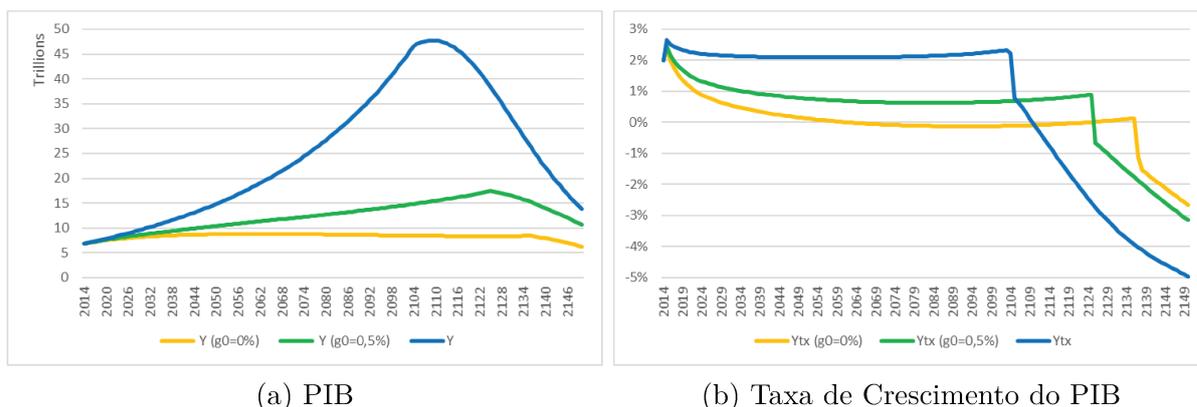
Demonstrados os impactos severos que as mudanças climáticas poderiam ter sobre o sistema econômico, nas seções seguintes aplicaremos duas políticas de enfrentamento das mudanças climáticas, uma ligada à teoria dos limites ao crescimento e outra ligada à hipótese do descolamento, com investimentos em mitigação das emissões de GEE.

## 3.2 Políticas de Enfrentamento - Limites ao Crescimento

Em primeiro lugar, testaremos a hipótese de que reduzir o crescimento econômico (ou mesmo extingui-lo) poderia conter as emissões de GEE. Para isso, reduzimos a taxa exógena de crescimento do gasto público ( $g_0$ ), isso porque, em um modelo de Supermultiplicador, é a taxa de crescimento do gasto autônomo (neste caso, o gasto público) que dita o crescimento do produto. Para comparar os resultados, simulamos três cenários: (i)  $g_0 = 1,5\%$  (*business as usual*); (ii)  $g_0 = 0,5\%$  (baixo crescimento); e (iii)  $g_0 = 0\%$  (sem crescimento).

As alterações em  $g_0$  de fato impactam diretamente a trajetória do PIB, como pode ser visto na figura (3.11a). Contudo, não impedem o colapso do sistema, mesmo retardando o processo.

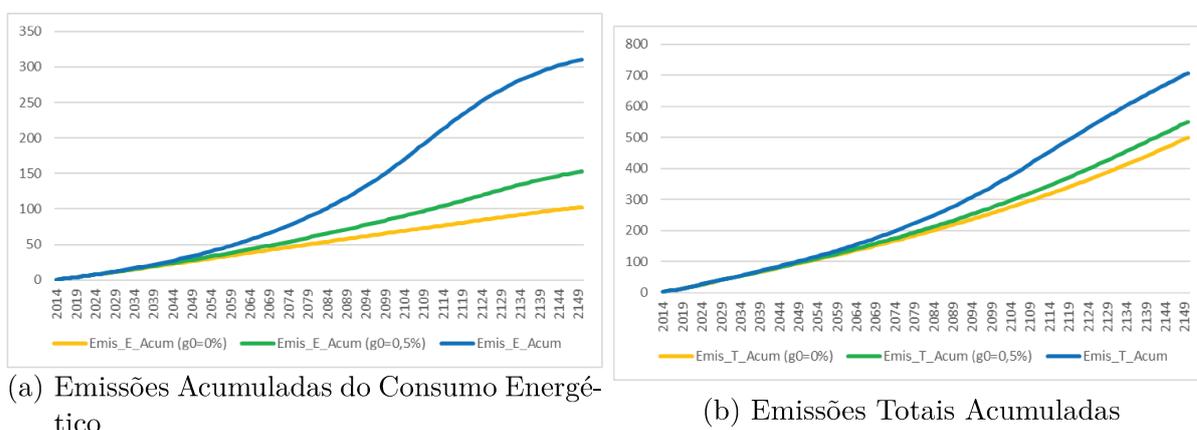
Figura 3.11 – Crescimento do Produto sob Limites ao Crescimento



Fonte: Elaboração própria.

A baixa eficácia da política testada pode ser entendida pelas figuras abaixo: apesar da redução importante nas emissões de GEE derivadas do consumo de energia (figura 3.12a), a política esteve longe de conter o crescimento do total das emissões (figura 3.12b). Esse resultado se deve à composição diferenciada das emissões brasileiras já apontada na seção 1.4. A proposta de limites ao crescimento visa reduzir o consumo energético derivado da atividade econômica, contudo, pouco influi sobre as emissões derivadas da agropecuária e do desmatamento.

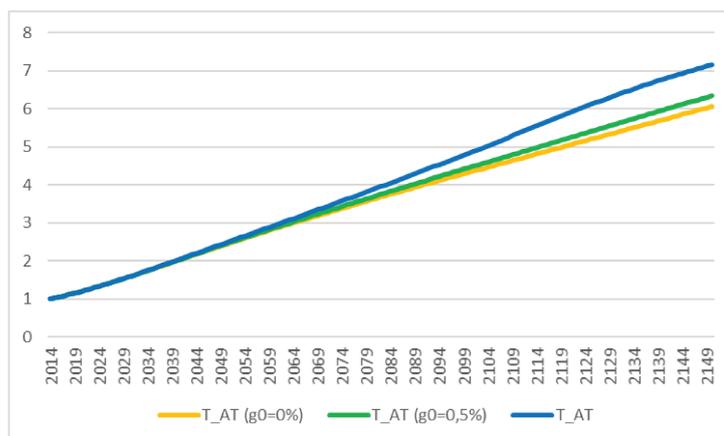
Figura 3.12 – Emissões de GEE sob Limites ao Crescimento



Fonte: Elaboração própria.

Igualmente, a elevação da temperatura média atmosférica (figura 3.13) seguiu sua trajetória ascendente e encerrou o século XXI acima de 4°C mesmo no cenário sem crescimento.

Figura 3.13 – Aumento da Temperatura Média Global sob Limites ao Crescimento

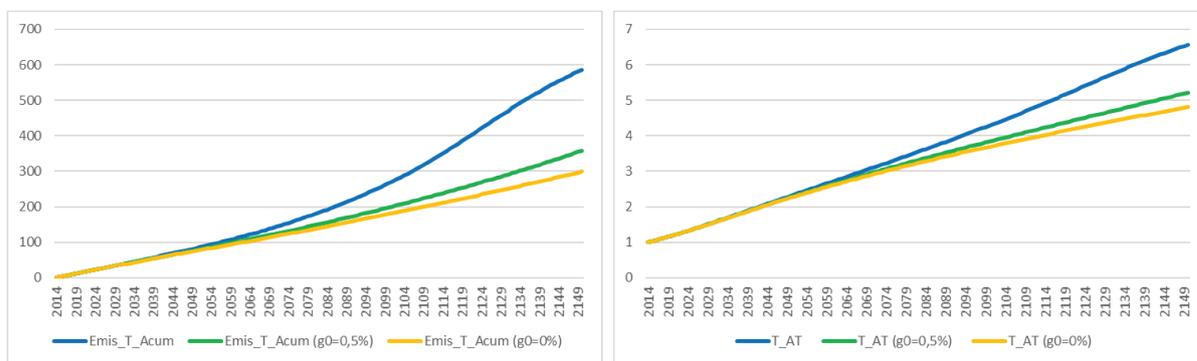


Fonte: Elaboração própria.

Fica claro que uma política de enfrentamento para o caso brasileiro precisa de um mix maior de estratégias que ataque ao mesmo em parte as emissões não-energéticas. Por isso, introduzimos um cenário extra no qual os limites ao crescimento são novamente testados, mas agora com a demanda por carne bovina - e, indiretamente, a pressão por desmatamento - sendo também reduzida. Para isso, alteramos a demanda externa por carne bovina brasileira: no cenário original, consideramos uma taxa de crescimento de 1% nessa demanda, enquanto no cenário proposto reduzimos essa taxa pela metade.

A figura (3.14a) demonstra uma redução de quase 50% nas emissões totais acumuladas do período entre o cenário *business as usual* e o novo cenário de crescimento zero. Contudo, apesar do descolamento maior entre os cenários, a temperatura atmosférica ainda se eleva em pouco menos de 4°C ao final do século (figura 3.14b).

Figura 3.14 – Emissões de GEE sob Limites ao Crescimento - Formulação Alternativa



(a) Emissões Totais Acumuladas

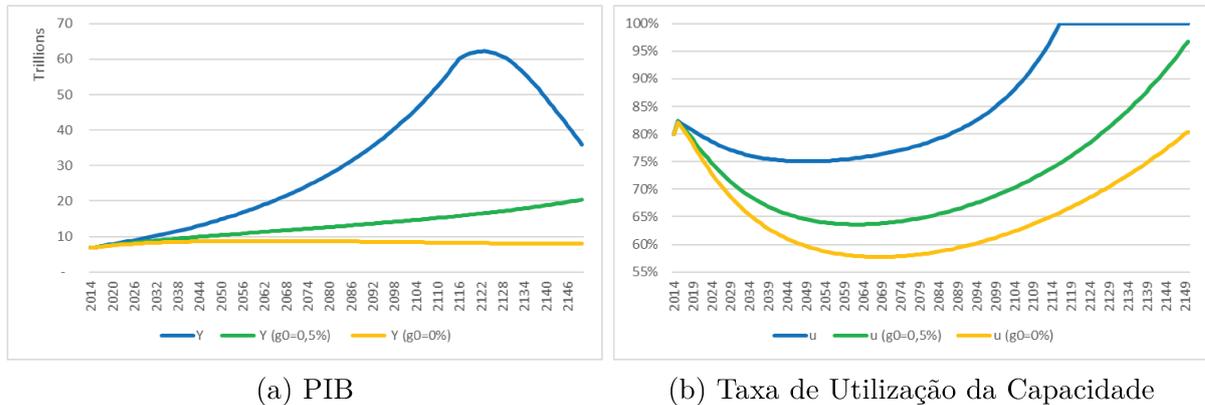
(b) Aumento da Temperatura Média Global

Fonte: Elaboração própria.

Quando observamos a trajetória do PIB (figura 3.15a), percebemos que o novo cenário testado foi enfim capaz de prevenir o colapso econômico no período simulado. Contudo, quando olhamos para a taxa de utilização da capacidade produtiva (figura 3.15b), vemos que esta continua a tender para a restrição de oferta. Soma-se isso à resiliência do

crescimento das temperaturas médias globais e é possível concluir que os limites ao crescimento (mesmo sob a formulação alternativa) apenas retardaram o processo de colapso, sem de fato preveni-lo.

Figura 3.15 – PIB e Taxa de Utilização sob Limites ao Crescimento - Formulação Alternativa



Fonte: Elaboração própria.

A dificuldade em conter o aquecimento global se dá pelo fato de que as taxas atuais de emissões de GEE já são insustentáveis no longo prazo. Em ambos os cenários de limites ao crescimento, controlou-se o aumento das emissões por período, porém sem nunca reduzi-las. O que os resultados até aqui mostram é que um real enfrentamento das questões climáticas carece de uma redução nos volumes emitidos em termos absolutos, de forma a estabilizar as emissões em uma taxa que seja compatível com a capacidade de absorção do meio ambiente. Tendo isso em mente, passamos agora para as simulações ligadas à hipótese do descolamento.

### 3.3 Políticas de Enfrentamento - Investimentos em Mitigação

A ideia básica aqui é introduzir estratégias de mitigação para os três vetores de emissões de GEE (energia, agropecuária e desmatamento). No primeiro caso, a estratégia mais comum tratada na literatura é migrar a estrutura de geração de energia em direção a fontes renováveis e não poluentes, como usinas eólicas ou solares. No caso da agropecuária, a estratégia de maior impacto parece ser a de mudanças na dieta do gado de corte, as quais tem potenciais para reduzir as emissões derivadas da digestão bovina (CERRI *et al.*, 2010, p. 107) (GERBER *et al.*, 2013, p. 45) (SMITH *et al.*, 2014, p. 831). Por fim, a estratégia para o desmatamento pode passar tanto por uma maior intensificação da pecuária, reduzindo a pressão por novas terras para pastagens, quanto por projetos de reflorestamento, os quais capturam diretamente GEE da atmosfera.

De qualquer forma, para o presente trabalho, importam menos quais estratégias de fato seriam introduzidas, dado que elas tendem a mudar ao longo do tempo e de acordo com novos desenvolvimentos científicos e tecnológicos. Mais importante, em verdade, são os impactos da adoção dessas medidas tanto sobre as mudanças climáticas quanto sobre o sistema macroeconômico. Por isso, introduzimos um gasto genérico em mitigação das emissões de GEE ( $M$ ) que é deduzido do investimento corrente.

Esse desenho segue a proposta de Foley (2007) e parte da ideia de que existe um trade-off intertemporal entre investimento tradicional e investimento em mitigação. O primeiro amplia a capacidade produtiva e o consumo futuro, contudo, não previne as mudanças climáticas e os danos à produtividade futura do capital. Já o segundo desvia recursos da geração de capacidade no período corrente, porém previne parte dos danos à produtividade do capital no futuro.

Devido à generalidade das estratégias de mitigação propostas, a determinação do custo unitário em R\$/tCO<sub>2</sub> se mostra um empecilho técnico. A maior parte dos modelos tratados na literatura assume o custo marginal do abatimento de uma unidade de CO<sub>2</sub> nas emissões do período como sendo o preço atual do mercado de carbono. Em todos eles, esse preço cresce ao longo do tempo, seja em função do crescimento do PIB, da porcentagem do produto destinada aos gastos com mitigação ou mesmo por uma taxa exógena.

Como a determinação desse preço e de sua dinâmica é pouco precisa e, em verdade, varia substancialmente entre os trabalhos já citados, decidimos aqui realizar simulações de Montecarlo de forma a cobrir um intervalo amplo de valores possíveis para o custo unitário. Por outro lado, preferimos manter constante seu valor ao longo do tempo, a fim de evitar formulações excessivamente arbitrárias sobre sua dinâmica no longo prazo.

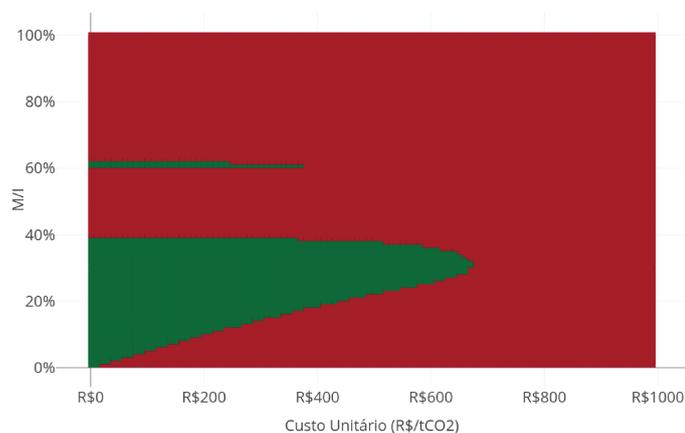
O conjunto de valores vai de R\$1/tCO<sub>2</sub> até R\$1.000/tCO<sub>2</sub>. Com isso, abarcamos tantos os valores mais baixos de US\$1/tCO<sub>2</sub>, utilizados por Bovari *et al.* (2018), quanto os valores mais altos de US\$344/tCO<sub>2</sub>, utilizados por Nordhaus e Sztorc (2013) para denotar o custo máximo de trocar toda a matriz energética para uma de geração limpa.

Ademais, simulamos diferentes taxas de mitigação (parcela redirecionada do investimento para os gastos com abatimento das emissões -  $\eta$ ), as quais vão desde 0% (*business as usual*), até 100% do investimento. O objetivo é observar não só os impactos sobre a contenção do aumento da temperatura média global, mas também sobre o próprio sistema econômico.

A figura 3.16 mostra a distribuição dos cenários em que o PIB não entra em declínio até o ano 2150. No eixo vertical observa-se a porcentagem desviada do investimento para os gastos com mitigação, enquanto o eixo horizontal mostra o preço de retirada de

uma tonelada de CO<sub>2</sub>. Em verde, as combinações nas quais a economia não entra em restrição produtiva e depois colapso.

Figura 3.16 – Cenários em que o Colapso Econômico é Evitado



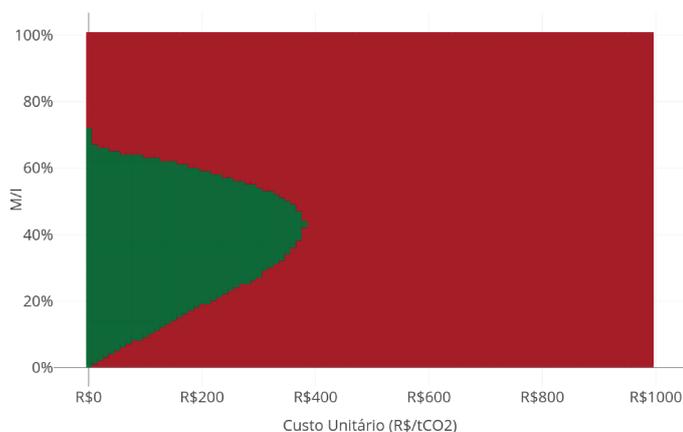
Fonte: Elaboração própria.

O formato assimétrico da figura formada resultada da existência de duas fontes de interrupção do sistema econômico. A primeira, amplamente debatida até aqui, são os danos das mudanças climáticas sobre a capacidade produtiva, a qual representa a área vermelha mais para baixo. Já a segunda resulta do excesso de recursos destinados à mitigação do aquecimento global, o que reduz drasticamente a capacidade de investimento e também acaba por sufocar o crescimento econômico após algum tempo. Esse é o processo que se observa na área vermelha mais acima.

As simulações tornam evidente que, frente a um custo baixo de retirada de GEE da atmosfera, bastariam poucos recursos desviados do investimento agregado. Contudo, para valores acima de R\$700/tCO<sub>2</sub>, o investimento passa a ser insuficiente para contornar o problema. Outro fator importante parece ser o patamar de 40% do investimento, o qual, se ultrapassado, acaba inviabilizando uma acumulação sustentável do capital, também induzindo o colapso econômico, dessa vez, contudo, apenas por questões econômicas.

Como já discutido no capítulo 1, a ultrapassagem da marca de 2°C incorre em diversos riscos de processos climáticos disruptivos e irreversíveis, mesmo que algumas vezes esses efeitos só sejam perceptíveis em horizontes mais longos de simulação. Por isso, é prudente considerar apenas os cenários nos quais o sistema é capaz de manter-se abaixo desse patamar. A figura (3.17) mostra esses cenários.

Figura 3.17 – Cenários em que o Acordo de Paris é Atingido



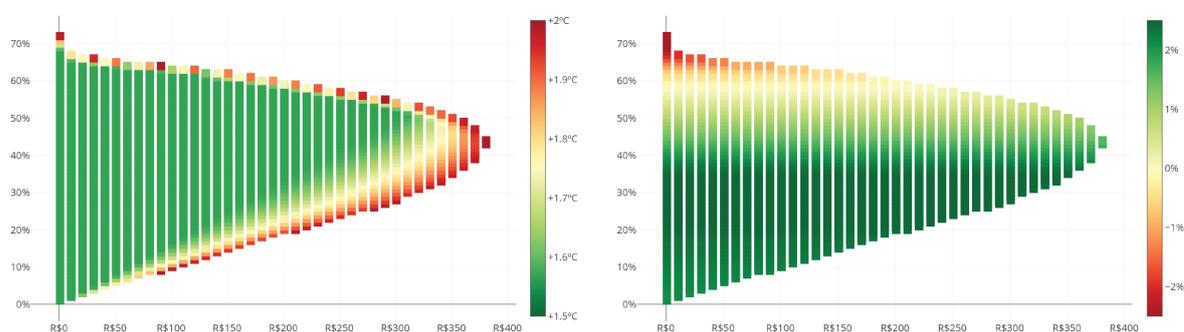
Fonte: Elaboração própria.

A figura mostra como o custo de R\$400/tCO<sub>2</sub> parece ser um limiar acima do qual o atingimento das metas do Acordo de Paris parecem inviáveis. Ao mesmo tempo, gastos com mitigação em patamares superiores a 40% do investimento se mostram factíveis, ainda que a figura (3.16) tenha demonstrado que o sistema colapsa nesses cenários.

Para entender melhor a dinâmica das medidas propostas, a figura (3.18) mostra os impactos da conformidade com o Acordo de Paris sobre a taxa média de crescimento anual e sobre a taxa de utilização da capacidade, além do aumento da temperatura global. Na figura (3.18b), o crescimento médio se mantém próximo de 2% a.a. quando a mitigação não excede 40% do investimento. De outra forma, a figura (3.18c) mostra que o grau de utilização da capacidade se torna perigosamente alto também próximo desse limiar.

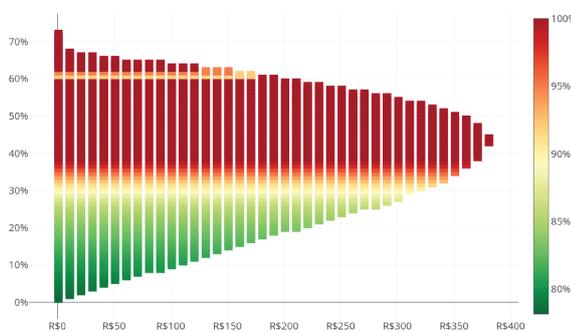
Essas duas informações combinadas indicam que o crescimento equilibrado da economia acontece apenas em patamares mais baixos de gastos com mitigação. Quando estes excedem cerca de 30% do investimento total, o risco de colapso por insuficiência de oferta se torna bastante elevado. A figura (3.18a) indica que a temperatura média global se mantém em geral mais próxima de 1,5% do que de 2% na maior parte dos cenários.

Figura 3.18 – Impactos da Política de Mitigação



(a) Temperatura Média Global

(b) Crescimento Médio Anual



(c) Taxa de Utilização da Capacidade

Fonte: Elaboração própria.

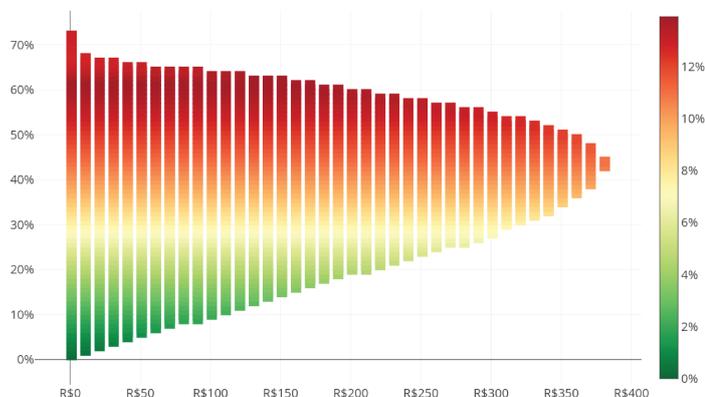
Nessa linha, os diversos trabalhos de Taylor, Rezai e Foley (TAYLOR; FOLEY, 2014; TAYLOR *et al.*, 2016; REZAI *et al.*, 2016; REZAI *et al.*, 2018), por exemplo, utilizam um custo de US\$44/tCO<sub>2</sub> (R\$90/tCO<sub>2</sub> a R\$150/tCO<sub>2</sub>, a depender da taxa de câmbio da época<sup>3</sup>) e gastos de 1% a 3% do PIB em mitigação como política de enfrentamento. Seus resultados não conflitam com as simulações aqui apresentadas, as quais indicam que para valores relativamente baixos como estes, investimentos de cerca de 2% a 3% do PIB são capazes de atingir as metas do Acordo de Paris.

Nordhaus e Sztorc (2013), por outro lado, usam um valor de US\$344/tCO<sub>2</sub> (R\$688/tCO<sub>2</sub>) como sendo o custo máximo de uma tecnologia capaz de mudar por completo a matriz energética. Ainda que esse valor se reduza lentamente ao longo do tempo no modelo dos autores, um custo tão excessivo seria amplamente inviável no nosso modelo. Nos casos em que a economia não colapsa antes de 2150, as temperaturas atmosféricas atingem valores próximos de 4°C, patamar que torna irreversível o processo de estrangulamento.

<sup>3</sup> Tendo em vista a alta volatilidade do câmbio brasileiro, convertemos os valores originais em dólares pela taxa de câmbio do ano utilizado nos respectivos trabalhos. Por exemplo: Nordhaus e Sztorc (2013) utilizam dados de 2005 para suas simulações, de forma que utilizamos a taxa de câmbio de 2005 para converter os valores em reais.

lamento.

Figura 3.19 – Gasto em Mitigação (% PIB)



Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, as simulações ligadas à política de mitigação parecem trazer resultados mais satisfatórios do que as ligadas aos limites ao crescimento, além de corroborarem parte dos resultados encontrados na literatura. Breves considerações finais encerram este capítulo antes de passarmos às conclusões do trabalho.

### 3.4 Considerações Finais

Como adiantado, as políticas que introduziram investimentos em abatimento das emissões de GEE se mostraram mais efetivas que as políticas de limitar o crescimento econômico e que a estratégia de inação. Não só os aumentos das temperaturas médias globais foram contidos, como o crescimento econômico pode ser mantido a taxas satisfatórias e sem sinais de grandes instabilidades no sistema econômico.

Ainda assim, ressalva-se que a eficácia da política é intrinsecamente dependente do custo unitário da retirada de CO<sub>2</sub>, o qual, se muito elevado, torna esta também uma alternativa ineficaz. Finalmente, não foram testadas aqui combinações entre uma estratégia de crescimento menos acelerado e de investimentos em mitigação, a qual, possivelmente, poderia ampliar a efetividade de ambas.

Passamos agora às conclusões, nas quais compararemos nossos resultados com a literatura e os demais trabalhos sobre o tema, além de propormos futuras agendas de pesquisa a serem desbravadas.

# Conclusão

Em meio às diversas abordagens teóricas e práticas sobre o problema do aquecimento global e das mudanças climáticas, buscamos aqui dar nossa contribuição ao ponderar algumas das divergências da literatura, ao mesmo tempo em que tentamos adaptar o debate - majoritariamente estrangeiro - à realidade brasileira.

Primeiramente, mostramos como o padrão diferenciado das emissões de GEE no Brasil requer um olhar mais complexo sobre o problema, dado que as soluções propostas com vistas aos países desenvolvidos se mostraram menos efetivas do que o propagado. Verdade seja dita, boa parte dos economistas ligados à corrente da economia ecológica reconhece que propostas como a dos limites ao crescimento são muito mais condizentes com a realidade dos países centrais do que com a de países em desenvolvimento. Ainda assim, países como Brasil, China, Índia, Indonésia, Rússia, Irã, México, Arábia Saudita, África do Sul e Nigéria somam juntos metade das emissões globais (CAIT, 2017), o que requer que políticas sejam pensadas também para a periferia do mundo.

Em segundo lugar, tentamos mostrar como a estratégia de limites ao crescimento não parece ser suficiente para atingir as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris. A questão fundamental é que, se não forem acompanhadas de políticas de mitigação, essas políticas são incapazes de reduzir o patamar atual de emissões, fator este essencial se quisermos limitar o aumento das temperaturas globais a 2°C. Interessantemente, acabamos chegando a resultados semelhantes aos encontrados, por exemplo, por Naqvi (2015) e Dafermos *et al.* (2017), nos quais a redução do ritmo de crescimento de fato reduz de forma importante as emissões de GEE, contudo sem impactos mais significativos sobre o aumento das temperaturas médias globais.

Por fim, as simulações de Montecarlo utilizadas nas políticas de mitigação nos desenharam o universo dentro do qual essa estratégia parece surtir efeito. Em relação à literatura, nossos resultados corroboram aqueles apresentados por Taylor, Rezai e Foley (TAYLOR; FOLEY, 2014; TAYLOR *et al.*, 2016; REZAI *et al.*, 2016; REZAI *et al.*, 2018), contudo, divergem sensivelmente dos encontrados por Nordhaus e Sztorc (2013), em virtude do custo demasiado alto utilizado pelos autores.

O que encontramos, em resumo, é que investimentos no abatimento das emissões de GEE parecem ser essenciais para evitar impactos climáticos severos. No entanto, a efetividade dessa proposta depende muito do custo unitário do abatimento, o qual, quando muito elevado, acaba por estrangular o sistema econômico. Nesse sentido, os resultados apresentados aqui devem ser considerados com uma boa dose de cautela, na medida em

que não são calcados em políticas específicas e em seus respectivos custos.

Ainda, há também propriedades interessantes do modelo econômico que valem a pena serem melhor estudadas. Em primeiro lugar, o papel das restrições de oferta em modelos *demand-led* é pouco explorado na literatura da macroeconomia ecológica, talvez porque usualmente os modelos apresentem estabilizadores internos que previnem esses estados extremos. Deleidi *et al.* (2018) e Dafermos *et al.* (2017) até apresentam a determinação do PIB potencial, porém não explicitam os efeitos de restrições de ofertas sobre o produto. Em um contexto de impactos ambientais que podem se tornar significativos, essa relação é importante na medida em que determina os canais de transmissão dos danos ambientais sobre o produto, processo que é muito mais simples e direto nos modelos *supply-side*.

A segunda propriedade é o comportamento de modelos de Supermultiplicador Sraffiano sob condições de maior volatilidade do produto. Se, de um lado, a endogenização do investimento gera um sistema mais estável no longo prazo e com convergência da taxa de utilização da capacidade para seu nível desejado, esse tipo de modelo se mostrou mais vulnerável à volatilidade introduzida pelas mudanças climáticas. Conforme o investimento se tornava progressivamente menos eficiente em gerar capacidade produtiva, menor era o poder do sistema de se auto-regular de volta à taxa desejada. Tendo isso em mente, seria importante estudar a introdução de mecanismos contra-cíclicos que permitissem a convergência mesmo em casos de baixa produtividade do investimento.

Outro fator relevante que não abordamos aqui é o papel da produtividade. É possível que um crescimento relevante da eficiência energética e uma diminuição da taxa de emissão dos demais fatores pudesse amparar uma política de limites ao crescimento. Dada a complexidade dos determinantes das inovações e dos ganhos de produtividade e eficiência, optamos por não tratar esses fatores. Contudo, reconhecemos que podem ser de suma importância para o sucesso das políticas testadas aqui. Nesse sentido, o trabalho de Deleidi *et al.* (2018) é um avanço na medida em que define as políticas públicas de inovação como os determinantes dos ganhos de produtividade. A incorporação da literatura neoschumpeteriana provavelmente é um bom caminho a ser seguido para essa questão.

Finalmente, consideramos também importante a continuidade da agenda de pesquisa voltada não só para as mudanças climáticas, mas para a relação entre o sistema econômico e o meio ambiente de um modo geral. As evidências científicas sobre o tema avançam a todo momento, os mecanismos complexos pelos quais o planeta se auto-regula vão se tornando lenta, mas, progressivamente, mais claros, porém permanecem vitais a cautela e a parcimônia, para que não nos enveredemos por caminhos irreversíveis e catastróficos no futuro.

## Referências

- ACKERMAN, F. The new climate economics: The stern review versus its critics. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. *et al.* *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. [S.l.], 2012. Citado na página 35.
- ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A. Brasil em ação: ameaças e oportunidades econômicas na fronteira amazônica. *Série Amazônia*, Imazon Belém, n. 19, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- AZEVEDO, T. R. d. *Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris*. <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf>, 2016. v. 4, 04–17 p. Citado na página 22.
- BARBOSA, F. A.; FILHO, B. S. S.; MERRY, F. D.; AZEVEDO, H. d. O.; COSTA, W. L. S.; COE, M. T.; BATISTA, E. d. S.; MACIEL, T.; SHEEPERS, L.; OLIVEIRA, A. d. *et al.* Cenários para a pecuária de corte amazônica. *IGC/UFMG*, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 22, 35 e 62.
- BERG, M.; HARTLEY, B.; RICHTERS, O. A stock-flow consistent input–output model with applications to energy price shocks, interest rates, and heat emissions. *New journal of physics*, IOP Publishing, v. 17, n. 1, p. 015011, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- BLANCO, G.; GERLAGH, R.; SUH, S.; BARRETT, J.; CONINCK, H. de; MOREJON, C. D.; MATHUR, R.; NAKICENOVIC, N.; AHENKORAH, A. O.; PAN, J. *et al.* *Drivers, trends and mitigation*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 17.
- BOVARI, E.; GIRAUD, G.; ISAAC, F. M. Coping with collapse: A stock-flow consistent monetary macrodynamics of global warming. *Ecological Economics*, Elsevier, v. 147, p. 383–398, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 49.
- BROCHIER, L.; SILVA, A. Macedo e. A supermultiplier stock-flow consistent model: the “return” of the paradoxes of thrift and costs in the long run? In: *XXth FMM Conference: Towards Pluralism in Macroeconomics*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 62.
- CAIT. *Climate Data Explorer*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://cait.wri.org>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 21 e 54.
- CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia legal brasileira entre 2006 e 2030. *Nova Economia*, v. 26, n. 2, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; JUNIOR, C. C.; FEIGL, B. J.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. d. C.; GALDOS, M. V.; MOREIRA,

- C. S. *et al.* Greenhouse gas mitigation options in brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Scientia Agricola*, SciELO Brasil, v. 67, n. 1, p. 102–116, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 48.
- CLIMA, O. do. *Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa*, v. 4.0. 2016. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/tabela-geral-de-emissoes/>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 62 e 63.
- COSTANZA, R. What is ecological economics? *Ecological economics*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 1–7, 1989. Citado na página 15.
- DAFERMOS, Y.; NIKOLAIDI, M.; GALANIS, G. A stock-flow-fund ecological macroeconomic model. *Ecological Economics*, Elsevier, v. 131, p. 191–207, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 18, 19, 20, 21, 29, 54 e 55.
- DALY, H. E.; FARLEY, J. *Ecological economics: principles and applications*. [S.l.]: Island press, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- DASGUPTA, P. The stern review's economics of climate change. *National institute economic review*, Sage Publications London, v. 199, n. 1, p. 4–7, 2007. Citado na página 14.
- DELEIDI, M.; PARIBONI, R.; PASSARELLA, M. V. Supermultiplier, innovation and the ecosystem: A stock-flow dynamic model. 2018. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 55.
- DIETZ, S.; STERN, N. Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: how nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. *The Economic Journal*, Wiley Online Library, v. 125, n. 583, p. 574–620, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 13, 18, 19, 20, 29 e 64.
- DINIZ, M. B.; JUNIOR, J. N. d. O.; NETO, N. T.; DINIZ, M. J. T. Causas do desmatamento da amazônia: uma aplicação do teste de causalidade de granger acerca das principais fontes de desmatamento nos municípios da amazônia legal brasileira. *Nova Economia*, SciELO Brasil, v. 19, n. 1, p. 121–151, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- EASTERLIN, R. A.; ANGELESCU, L. Happiness and growth the world over: Time series evidence on the happiness-income paradox. 2009. Citado na página 16.
- EASTERLIN, R. A.; MCVEY, L. A.; SWITEK, M.; SAWANGFA, O.; ZWEIG, J. S. The happiness–income paradox revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 107, n. 52, p. 22463–22468, 2010. Citado na página 16.
- FOLEY, D. K. The economic fundamentals of global warming. *October (New York, Department of Economics, New School for Social Research)*, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 18, 20, 21 e 49.
- FONTANA, G.; SAWYER, M. The macroeconomics and financial system requirements for a sustainable future. In: ARESTIS, P.; SAWYER, M. (Ed.). *Finance and the Macroeconomics of Environmental Policies*. [S.l.]: Springer, 2015. cap. 3, p. 74–110. Citado na página 20.

- FONTANA, G.; SAWYER, M. Towards post-keynesian ecological macroeconomics. *Ecological Economics*, Elsevier, v. 121, p. 186–195, 2016. Citado na página 19.
- FREITAS, L. F. d. S. Consumption pattern and environmental pressure in brazil. *Revista de Economia Contemporânea*, SciELO Brasil, v. 18, n. 1, p. 100–124, 2014. Citado na página 28.
- GERBER, P. J.; STEINFELD, H.; HENDERSON, B.; MOTTET, A.; OPIO, C.; DIJKMAN, J.; FALCUCCI, A.; TEMPIO, G. *et al. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. [S.l.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. Citado 3 vezes nas páginas 23, 48 e 62.
- GODIN, A. Guaranteed green jobs: Sustainable full employment. 2012. Citado na página 19.
- GODLEY, W.; LAVOIE, M. *Monetary economics: an integrated approach to credit, money, income, production and wealth*. [S.l.]: Springer, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 32.
- HARRIS, J. M. Ecological macroeconomics: consumption, investment, and climate change. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- HOPE, C. The marginal impact of co2 from page2002: An integrated assessment model incorporating the ipcc's five reasons for concern. *The Integrated Assessment Journal*, v. 6, n. 1, 2006. Citado na página 14.
- IBGE. Projeção da população do brasil por sexo e idade 2000-2060, revisão 2013. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 63.
- JACKSON, T. *Prosperidade sem crescimento*. [S.l.]: Abril, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- JACKSON, T.; VICTOR, P.; NAQVI, A. Falstaff part 1 – credit creation and the ‘growth imperative’? In: JACKSON, T.; VICTOR, P.; NAQVI, A. (Ed.). *Towards a stock-flow consistent ecological macroeconomics*. [S.l.]: Guildford: University of Surrey, 2016. cap. 5, p. 20–28. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- JACKSON, T.; VICTOR, P.; NAQVI, A. Falstaff part 2: Green investment and portfolio allocation. In: JACKSON, T.; VICTOR, P.; NAQVI, A. (Ed.). *Towards a stock-flow consistent ecological macroeconomics*. [S.l.]: Guildford: University of Surrey, 2016. cap. 6, p. 29–39. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- LATOUCHE, S. O decrescimento: Por que e como. In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. Pinheiro do (Ed.). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. [S.l.]: Garamond, 2012. p. 45–54. Citado na página 16.
- MARGULIS, S. Causas do desmatamento da amazônia brasileira, 1ª edição. *Banco Mundial, 100p. Brasília*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- MERTENS, B.; POCCARD-CHAPUIS, R.; PIKETTY, M.-G.; LACQUES, A.-E.; VENTURIERI, A. Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the brazilian amazon: the case of sao felix do xingu in south para. *Agricultural economics*, Wiley Online Library, v. 27, n. 3, p. 269–294, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.

- MORANDI, L. Novas estimativas do estoque de capital fixo brasileiro–1950–2014. 2015. Disponível em: <[http://series-historicas.ibre.fgv.br/sites/series-historicas.ibre.fgv.br/files/novas\\_estimativas\\_do\\_estoque\\_de\\_capital\\_fixo\\_brasileiro\\_dezembro\\_2015.pdf](http://series-historicas.ibre.fgv.br/sites/series-historicas.ibre.fgv.br/files/novas_estimativas_do_estoque_de_capital_fixo_brasileiro_dezembro_2015.pdf)>. Citado na página 63.
- NAQVI, S. A. A. Modeling growth, distribution, and the environment in a stock-flow consistent framework. WU Vienna University of Economics and Business, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 54.
- NEWBOLD, S. Summary of the dice model. *Improving the Assessment and Valuation of Climate Change Impacts for Policy and Regulatory Analysis*, 2010. Citado na página 14.
- NORDHAUS, W.; SZTORC, P. Dice 2013r: Introduction and user's manual. *retrieved November*, 2013. Citado 11 vezes nas páginas 13, 18, 19, 20, 29, 36, 49, 52, 54, 62 e 63.
- NORDHAUS, W. D. To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect. *The economic journal*, JSTOR, v. 101, n. 407, p. 920–937, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- NORDHAUS, W. D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON-*, JSTOR, v. 258, p. 1315–1315, 1992. Citado na página 13.
- NORDHAUS, W. D. *The 'dice' model: Background and structure of a dynamic integrated climate-economy model of the economics of global warming*. [S.l.], 1992. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- OLIVEIRA, S. M. B. d. Aquecimento global. In: VEIGA, J. E. d. (Ed.). *O imbroglgio do clima: a fundamentação científica básica*. [S.l.]: Editora Senac Sao Paulo, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 11.
- PACHAURI, R. K.; ALLEN, M. R.; BARROS, V. R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R.; CHURCH, J. A.; CLARKE, L.; DAHE, Q.; DASGUPTA, P. *et al. 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*. [S.l.]: IPCC, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 11 e 17.
- REZAI, A.; FOLEY, D. K.; TAYLOR, L. Global warming and economic externalities. In: *The Economics of the Global Environment*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 447–470. Citado 6 vezes nas páginas 18, 20, 21, 29, 52 e 54.
- REZAI, A.; TAYLOR, L.; FOLEY, D. Economic growth, income distribution, and climate change. *Ecological Economics*, Elsevier, v. 146, p. 164–172, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 52 e 54.
- ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J. *et al. A safe operating space for humanity. nature*, Nature Publishing Group, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 12.
- SERRANO, F. Long period effective demand and the sraffian supermultiplier. *Contributions to Political Economy*, Oxford University Press, v. 14, n. 1, p. 67–90, 1995. Citado na página 28.

- SERRANO, F.; FREITAS, F.; BHERING, G. *The Trouble with Harrod: the fundamental instability of the warranted rate in the light of the Sraffian Supermultiplier*. Tese (Doutorado) — Grupo de Economia Política do Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 28.
- SMITH, P.; CLARK, H.; DONG, H.; ELSIDDIG, E.; HABERL, H.; HARPER, R.; HOUSE, J.; JAFARI, M.; MASERA, O.; MBOW, C. *et al.* Agriculture, forestry and other land use (afolu). Cambridge University Press, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 48.
- SPASH, C. L. The development of environmental thinking in economics. *Environmental Values*, JSTOR, p. 413–435, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- STERN, N. H. *The economics of climate change: the Stern review*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.
- TAYLOR, L. *Maynard's Revenge*. [S.l.]: Harvard University Press, 2010. Citado na página 31.
- TAYLOR, L.; FOLEY, D. *Greenhouse gas and cyclical growth*. [S.l.], 2014. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 21, 52 e 54.
- TAYLOR, L.; REZAI, A.; FOLEY, D. K. An integrated approach to climate change, income distribution, employment, and economic growth. *Ecological Economics*, Elsevier, v. 121, p. 196–205, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 21, 52 e 54.
- TOL, R. S. J. The economic effects of climate change. *The Journal of Economic Perspectives*, American Economic Association, v. 23, n. 2, p. 29–51, 2009. ISSN 08953309. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/27740523>>. Citado na página 18.
- UN. *Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties*. [S.l.], 2015. Citado na página 12.
- UN. *World Population Prospects: The 2017 Revision*. [S.l.], 2017. Citado na página 11.
- VEIGA, J. E. d.; ISSBERNER, L.-R. Decrescer crescendo. In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. Pinheiro do (Ed.). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. [S.l.]: Garamond, 2012. p. 107–134. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- VICTOR, P. A. *Managing without growth: slower by design, not disaster*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing, 2008. Citado na página 16.
- WEITZMAN, M. L. Ghg targets as insurance against catastrophic climate damages. *Journal of Public Economic Theory*, Wiley Online Library, v. 14, n. 2, p. 221–244, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 29, 62, 64 e 65.

# Anexos

# ANEXO A – Parâmetros e Valores Iniciais

Tabela A.1 – Parâmetros

Parâmetro	Valor	Fonte
$\mu$	0.8	Banco Central
$\delta$	0.05	Calibragem
$\gamma$	0.014	Brochier e Silva (2016)
$\sigma$	0.5	Contábil
$\eta$	0.01 até 1	Baseado na literatura
$\rho$	$10^9$ até $10^{12}$	Baseado na literatura
$tax$	0.205	Calibragem
$c_1$	0.8	Calibragem
$c_2$	0.05	Calibragem
$g_0$	0.015	Calibragem
$g_1$	0.3	Calibragem
$\alpha$	0.75	Bloomberg
$r$	0.03	Calibragem
$i_H$	0.02	Calibragem
$i_F$	0.04	Calibragem
$\omega$	375000000	Contábil
$d_1$	0.00284	Weitzman (2012)
$d_2$	0.00000507	Weitzman (2012)
$CO2_{AT-PRE}$	2156.196	Nordhaus e Sztorc (2013)
$S$	3	Nordhaus e Sztorc (2013)
$flex$	0.005	Nordhaus e Sztorc (2013)
$F2CO2$	3.8	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{11}$	0.9817456	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{12}$	0.01825439	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{21}$	0.007950801	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{22}$	0.9915487	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{23}$	0.0005005008	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{32}$	0.0000675676	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\phi_{33}$	0.9999324	Nordhaus e Sztorc (2013)
$\beta_1$	0.01	Adaptado de Gerber <i>et al.</i> (2013)
$\beta_2$	0.64	Barbosa <i>et al.</i> (2015)
$\epsilon_1$	0.00000000225	Clima (2016)
$\epsilon_2$	0.000000492	Clima (2016)
$\epsilon_3$	0.00000000000009	Clima (2016)
$escala$	25	Calibragem
$Te_1$	0.02675137	Nordhaus e Sztorc (2013)
$Te_2$	0.01825439	Nordhaus e Sztorc (2013)
$Te_3$	0.005050763	Nordhaus e Sztorc (2013)

Tabela A.2 – Condições Iniciais

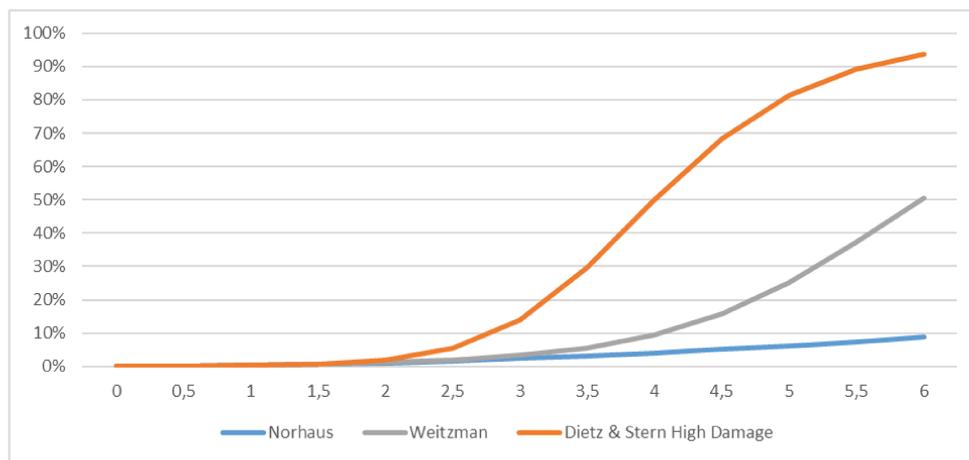
Variável <sup>1</sup>	Valor	Fonte
$Y$	6800000000000	Banco Central
$E$	9771600000000	Calibragem
$B$	3828400000000	Banco Central
$D$	13600000000000	Contábil
$K$	17000000000000	Morandi (2015)
$G$	13600000000000	IBGE
$T$	13940000000000	Calibrado
$h$	0.2	IBGE
$u$	0.8	Contábil
$L$	150000000	Calibragem
$W$	38700000000000	Contábil
$w$	25800	IBGE
$J_D$	2720000000000	Contábil
$\pi^D$	737840000000	Contábil
$\pi^B$	233716000000	Contábil
$gp$	1.009	IBGE (2013)
$N$	202800000	IBGE (2013)
$Reb$	212366132	Clima (2016)
$CO2_{AT}$	3120	Nordhaus e Sztorc (2013)
$CO2_{UP}$	5628.845	Nordhaus e Sztorc (2013)
$CO2_{LO}$	36706.67	Nordhaus e Sztorc (2013)
$FEX$	0.27	Nordhaus e Sztorc (2013)
$T_{AT}$	1	Nordhaus e Sztorc (2013)
$T_{LO}$	0.0068	Nordhaus e Sztorc (2013)

<sup>1</sup> Incluímos apenas as variáveis cujos valores iniciais são utilizados nas simulações, as demais variáveis são determinadas apenas a partir das equações.

## ANEXO B – Funções de Dano

A escolha da função de dano de Weitzman (2012) segue a proposição do próprio autor e de Dietz e Stern (2015) de que a formulação tradicional de Nordhaus produz danos excessivamente baixos para aumentos de temperatura superiores a 3°C. Para ilustrar melhor essas diferenças, a figura (B.1) mostra a porcentagem de dano induzida por cada uma das formulações para determinados aumentos de temperatura. Além das formulações de Nordhaus e Weitzman, foi incluído também a proposta por Dietz e Stern.

Figura B.1 – Diferentes Formulações para a Função de Dano

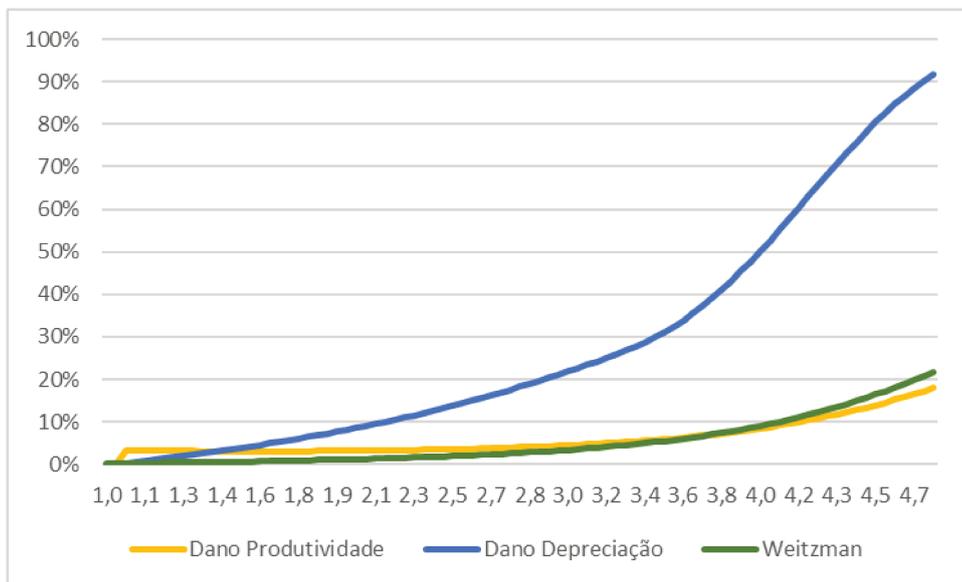


Vê-se que a equação de Weitzman segue o formato da de Nordhaus até temperaturas próximas a 3°C, divergindo desta para temperaturas maiores. Esse cenário é muito mais condizente com as previsões científicas de que aumentos acima de 5°C poderiam induzir danos severos sobre o sistema econômico. Por outro lado, a formulação de Dietz e Stern parece gerar danos excessivamente altos, como um colapso quase completo do sistema econômico para temperaturas próximas de 6°C. Os próprios autores reconhecem a severidade desses impactos, porém justificam essa formulação ao argumentar que muitos limiares ecológicos podem ser ultrapassados acima de 4°C, levando a processos cumulativos, em cadeia e amplamente imprevisíveis (DIETZ; STERN, 2015, p. 582).

Além do formato das funções de dano, muitos autores divergem sobre a forma como tal dano deve ser aplicado ao sistema econômico. Alguns modelos *demand-led* incluem danos não apenas sobre a produtividade do capital, mas também sobre sua taxa de depreciação. Contudo, essa segunda formulação gera perdas dinâmicas na medida em que reduz a taxa de acumulação de capital. A figura (B.2) mostra as reduções na capacidade produtiva máxima da economia para determinados aumentos da temperatura média global. A linha amarela denota as perdas quando o dano é aplicado à produtividade,

enquanto a linha azul apresenta as perdas em cada período quando o dano é aplicado à taxa de depreciação. Em ambos os casos, a função de dano utilizada foi a formulada por Weitzman (2012).

Figura B.2 – Aplicação da Função de Dano



Vê-se, com isso, que aplicar a função de dano à depreciação gera perdas muito superiores às postuladas por Weitzman e, em verdade, muito mais próximas da formulação de Dietz e Stern. Por outro lado, a aplicação sobre a produtividade gera resultados muito mais próximos dos previstos pelo autor. Não obstante, as equações foram originalmente propostas dentro de um arcabouço *supply-side* no qual as mudanças climáticas penalizam um produto em pleno emprego de fatores. Por isso, neste trabalho, escolhemos incidir o dano apenas sobre a produtividade (ou, em outras palavras, sobre a capacidade produtiva máxima -  $YK$ ) para sermos mais fiéis às previsões científicas correntes e à formulação original das funções de dano.