



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Instituto de Economia

ECONOMIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MODELOS

Petterson Molina Vale

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Economia da UNICAMP para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Econômico – área de concentração: Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente, sob a orientação da Prof. Dr. Ademar Ribeiro Romeiro.

*Este exemplar corresponde ao original da dissertação defendido por **Petterson Molina Vale** em 02/07/2010 e orientado pela Prof. Dr. Ademar Ribeiro Romeiro.*

CPG, 02/07/2010

Campinas, 2010

**Ficha catalográfica elaborada pela biblioteca
do Instituto de Economia/UNICAMP**

V234e	Vale, Petterson Molina. Economia das mudanças climáticas: uma avaliação dos principais modelos / Petterson Molina Vale. – Campinas, SP: [s.n.], 2010. Orientador : Ademar Ribeiro Romeiro. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia. 1. Mudanças climáticas. 2. Aquecimento global. 3. Desenvolvimento susten- tável. 4. Economia ambiental. 5. Economia ecológica. I. Romeiro, Ademar Ribeiro. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia. III. Título. 10-045-BIE
-------	--

Título em Inglês: Economics of climate change: an evaluation of the main models

Keywords: Climate change ; Global warming ; Sustainable development ; Environmental economics ; Ecological economics

Area de Concentração : Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente

Títuloção: Mestre em Desenvolvimento Econômico

Banca examinadora: Prof. Dr. Ademar Ribeiro Romeiro
Prof. Dr. Bastiaan Philip Reydon
Prof. Dr. José Eli Savóia da Veiga

Data da defesa: 02-07-2010

Programa de Pós-Graduação: Desenvolvimento Econômico

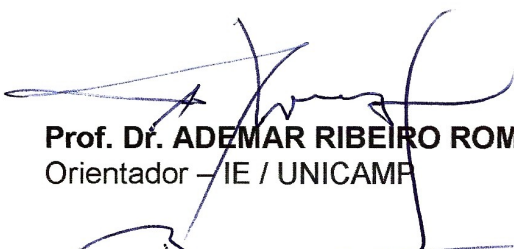
Dissertação de Mestrado

Aluno: PETTERSON MOLINA VALE

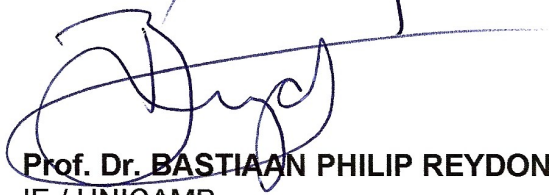
**“Economia das Mudanças Climáticas:
uma avaliação dos principais modelos”**

Defendida em 02 / 07 / 2010

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. ADEMAR RIBEIRO ROMEIRO
Orientador – IE / UNICAMP



Prof. Dr. BASTIAAN PHILIP REYDON
IE / UNICAMP



Prof. Dr. JOSÉ ELI SAVÓIA DA VEIGA
USP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que financiaram os meus estudos em 14 de 16 anos de escola e pré-escola, na graduação e na pós-graduação, inclusive com três anos de bolsas de estudos. Sem saber, talvez sem querer, e, suspeito, sem dever, são elas e eles, em primeiro lugar, os que me trouxeram até aqui.

Sem dever porque não escolheram financiar um sistema injusto que só faz garantir que a desigualdade se propague por gerações e gerações em nosso país. Teriam escolhido, se indagados, financiar a educação superior, mas de forma justa, acredito eu. Teriam optado por pagar para que aqueles que realmente precisam pudessem estar escrevendo estas linhas. Mas, infelizmente, por conta da utopia dos que sonham com uma tão inatingível quanto autoritária universalização de tudo-quanto-for-possível, aqueles, os que precisam, estão neste momento agradecendo à divindade por ter-lhes dado emprego, coragem, e faculdades privadas.

Que esta dedicatória não seja o único retorno que dou aos meus credores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Ademar Romeiro, e ao Prof. José Eli da Veiga (USP) que foram mais do que orientador e coorientador. Foram Mestres, no sentido mais nobre do termo. Ao Prof. Ricardo Abramovay (USP), pelo interesse em minha pesquisa e pela constante disponibilidade. Aos Professores Wilson Cano, Fernando Macedo, e Luiz Caseiro Lopreato (UNICAMP), pelo esforço em ministrar cursos que ficarão marcados em minha trajetória profissional. Aos Professores Bastiaan Reydon e José Maria da Silveira (UNICAMP), pelo profundo aprendizado durante a pós-graduação, e pelas ótimas conversas. Ao Prof. Marco Valente (Università dell'Aquila, Itália), cujo curso ministrado na UNICAMP e conversas ao almoço inspiraram uma parte deste trabalho. E ao Prof. Paulo Baia (PUC/SP), pelo interesse em minha pesquisa e disponibilidade para participar da banca.

Mãe, pai, Yuri e Mélanie, obrigado por tudo, sem vocês nada disto seria necessário.

A todos os demais colaboradores, estudantes e professores do Instituto de Economia, muito obrigado. Aos primeiros pela eficiência e simpatia, e aos últimos pelo interessante e democrático convívio intelectual.

Às amigas e aos amigos, poucos mas sinceros, que compartilharam comigo estes 2,5 anos: Ana Paula, Andrei, Andréia Marques, Camila mineira, Carol, Carolina, Daniel, Diego Ríos, Edivânia, Elisa, Elisafan, Érika, Jônatas, Leandra, Luciano, Luis, Marcos Vinícius, Maíra, Maria, Marcílio, Martin, Paulo Felipe, Rafael Kellerman, Régis, Roine, Sisis, tio Amauri, tia Ely, Verónica e Victor.

Ao blogueiro Thomas Kang, com quem troquei idéias importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

“Él descubrió el punto arquimédico, pero lo usó contra sí mismo; parece que le fue permitido encontrarlo sólo con esta condición.”

Franz Kafka

RESUMO

A dissertação discute a maneira como o ferramental analítico da economia é aplicado ao estudo das mudanças climáticas. A determinação de quanto, quando e onde investir em mitigação das emissões de gases-estufa, e em adaptação às mudanças inevitáveis que decorrem do aquecimento global, é o papel central dos modelos econômico-climáticos. Trata-se de uma área de pesquisa relativamente nova, mas duas correntes já se delineiam: a gradualista, liderada por William Nordhaus, que adota modelos de otimização para o cálculo de custos e benefícios dos citados investimentos, e propõe uma taxa de mitigação linearmente crescente; e a precaucionista, encabeçada por Nicholas Stern, que utiliza um leque bem mais amplo de instrumentos de decisão, inclusive métodos não quantitativos, e que sugere a aplicação imediata do princípio da precaução. Depois de estudar detidamente os dois enfoques, fazemos uma avaliação crítica com base na literatura especializada, e concluímos que as recomendações divergentes de políticas climáticas de Nordhaus e de Stern decorrem, em primeiro lugar, da maneira como avaliam os resultados dos modelos (regra de decisão), além de decisões éticas quanto ao procedimento de desconto, e das estruturas dos modelos, com destaque para o tratamento da incerteza. Um terceiro fator que pouco os distingue, mas que caracteriza uma crítica mais substancial aos modelos, é o apego ao crescimento econômico com objetivo central da economia. Duas são as novidades do trabalho: uma caracterização das implicações da incerteza irreduzível para o estudo das mudanças climáticas; e uma revisão da obra do principal autor da área, William Nordhaus.

Palavras chave: mudanças climáticas, aquecimento global, desenvolvimento sustentável, economia ecológica, economia ambiental.

ABSTRACT

The thesis discusses the way the analytical toolkit of economics is currently applied to the study of climate change. The determination of how much, when and where to invest in greenhouse gas emissions mitigation and in adaptation to the inevitable changes that derive from it is the central role of climate-economy models. It is a relatively new area, but two research streams can be identified: the gradualists, led by William Nordhaus, who adopt optimization models to calculate costs and benefits of climate investment, and propose a mitigation rate that grows linearly; and the precautionalists, led by Sir. Nicholas Stern, who use a much broader set of decision instruments, including non-quantitative methods, and call for the immediate application of the precautionary principle. After studying these two approaches in details, we go on to critically evaluate them based on the specialized literature, and conclude that the diverging policy recommendations of Nordhaus and Stern can be attributed, in the first place, to the way they evaluate the results of the models (decision rule), followed by ethical decisions related to the discounting procedure, and by the structure of the models, particularly the treatment of uncertainty. A third factor that differs very little between them, but makes for a more substantial critique to the models, is the view that economic growth is the only and most desirable goal of economics. The novel contributions of the thesis are twofold: a formalization of the implications of irreducible uncertainty for the economics of climate change; and a review of William Nordhaus' work, the single most important author in the field.

Keywords: climate change, global warming, sustainable development, ecological economics, environmental economics.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.

CO₂e – Dióxido de Carbono equivalente.

DICE – *Dynamic Integrated Climate-Economy model*.

Fdp – função densidade de probabilidades.

GCM – *General Circulation Model*, ou modelos biofísicos.

GHG – *greenhouse gas*, ou gás-estufa.

IAM – *Integrated Assessment Model*, ou modelos econômico-climáticos.

IPCC – *International Panel on Climate Change* (da Organização das Nações Unidas).

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

PAGE – *Policy Analysis of Greenhouse Effect*.

P&D – pesquisa e desenvolvimento.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

Ppm – partes por milhão.

RCK – modelo de otimização intertemporal do consumo de Ramsey-Cass-Koopmans.

RICE – *Regional Integrated Climate-Economy model*.

UNCTAD – *United Nations Conference on Trade and Development*.

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*.

WMO – *World Meteorologic Organization*.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	01
1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PERSPECTIVA	09
1.1 <u>Breve histórico</u>	09
1.2 <u>O embasamento físico</u>	14
1.3 <u>Modelos econômicos versus modelos biofísicos</u>	19
1.5 <u>A economia das mudanças climáticas</u>	20
1.6 <u>Síntese preliminar</u>	25
2. MODELOS ECONÔMICO-CLIMÁTICOS	27
2.1 <u>Objetivo do modelo</u>	29
2.1.1 Otimização de políticas públicas	30
2.1.2 Avaliação de políticas públicas	41
2.2 <u>Incerteza</u>	45
2.2.1 Modelos determinísticos	48
2.2.2 Modelos probabilísticos	48
2.3 <u>Outros fatores</u>	53
2.4 <u>Procedimento de desconto</u>	56
2.4.1 Desconto do tempo	58
2.4.2 Desconto do crescimento	60
2.5 <u>Ponderação para a igualdade (<i>equity weighting</i>)</u>	61
2.6 <u>Discussão: teoria e métodos</u>	64
3. O MODELO DE WILLIAM NORDHAUS	67
3.1 <u>O DICE-2007 (<i>Dynamic Integrated Climate-Economy model</i>)</u>	68
3.1.1 Formalização do modelo	72
3.1.2 Ponderação para a igualdade	80
3.1.3 Procedimento de desconto	81
3.1.4 Incerteza	84

3.1.5 Outros temas	89
3.1.6 Resultados e implicações	90
3.2 <u>Discussão e avaliação</u>	94
4. O RELATÓRIO STERN	97
4.1 <u>Análise de custo-eficiência</u>	101
4.2 <u>Modelo de simulação</u>	104
4.2.1 Ponderação para a igualdade	107
4.2.2 Procedimento de desconto	108
4.2.3 Danos climáticos	112
4.3 <u>Custos de mitigação: modelo <i>bottom-up</i></u>	118
4.4 <u>Crescimento econômico</u>	122
4.5 <u>Implicações e avaliação</u>	124
5. RESULTADOS: AVALIAÇÃO CRÍTICA E PROPOSTA	129
5.1 <u>Nordhaus <i>versus</i> Stern</u>	129
5.1.1 Eixo qualitativo: instrumentos econômicos	131
5.1.2 Eixo quantitativo: quanto e quando investir	133
5.1.3 Síntese	142
5.2 <u>A ciência positiva pode enfrentar o problema da incerteza irreduzível?</u>	145
6. CONCLUSÃO	151
REFERÊNCIAS	161
APÊNDICE 1 – modelo de Ramsey-Cass-Koopmans	175
APÊNDICE 2 – raízes do enfoque gradualista	179
APÊNDICE 3 – primeiros modelos econômico-climáticos	187
ANEXOS	193

INTRODUÇÃO

Há quase quarenta anos Georgescu-Roegen alertou para o inalienável processo de aumento da entropia e para a correspondente necessidade de reformulação do paradigma que pressupõe ser a economia um sistema isolado da natureza. Mas as suas idéias foram demasiado incômodas para terem sido levadas a sério, e a dura realidade do aquecimento global antrópico precisou *impor* aos economistas a análise de fenômenos cujos efeitos se darão ao longo de centenas de anos.

A resistência à incorporação de prazos maiores do que o ciclo econômico tem origem tanto na corrente dominante quanto nas revolucionárias idéias keynesianas. Para os clássicos, o longo prazo é entendido como o lapso de tempo necessário para que se aumente a capacidade produtiva por meio da instalação de novas fábricas. Já para os seguidores de Keynes, o fato de que “no longo prazo todos estaremos mortos” seria a prova cabal de que os economistas devem se preocupar com o curto prazo, e não com eventos que se imporão apenas às gerações futuras. Com isso, não se apresentou à ciência econômica, até meados dos anos 1970, a demanda por instrumentos capazes de lidar com intervalos de tempo mais parecidos com os que são relevantes para os fenômenos naturais de escala global.

Somente depois da publicação do relatório Stern, em outubro de 2006, é que os aspectos socioeconômicos das mudanças climáticas ganharam a visibilidade que têm hoje. Surgiu nessa época um fenômeno inédito: a primeira mobilização ambiental a ser *popular* e *global* ao mesmo tempo. Com a decorrente pressão das opiniões públicas mundiais sobre os principais países emissores, deslocou-se para os centros nacionais de decisão o debate técnico e político sobre quanto, como e quando se devem mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GHG – *greenhouse gases*).

Três características destacam as mudanças climáticas em relação a outros problemas de escala global. Em primeiro lugar, as suas consequências tendem a se sobrepor a outros problemas socioambientais, como a pobreza e a perda de biodiversidade, por exemplo. Em segundo lugar, ações que não sejam globalmente coordenadas são inefetivas, pois a

atmosfera é um bem-público não excluível e não rival¹. Finalmente, a temporalidade das ações não se alinha ao ciclo político dos governos, pois há grandes defasagens na relação entre as políticas públicas e a resposta do sistema climático.

Outra dificuldade é que as mudanças climáticas desafiam cientistas na fronteira entre as disciplinas, pois envolvem considerações de incerteza, geopolítica, demografia, jurisprudência, ecologia, físico-química, e prazos analíticos medidos em Séculos. Alguns têm enfrentado esse desafio pelo enfoque transdisciplinar, algo que não se encaixa na prática metodológica “normal” (no sentido de Kuhn) dominante na ciência nos últimos cem anos. Outros preferem contribuir se especializando no estudo detalhado de partes do fenômeno. Ambas as atitudes têm contribuições a dar, uma produzindo conhecimento preciso sobre determinados aspectos do problema e outra reunindo as perspectivas teóricas e instrumentos analíticos num todo consistente e útil do ponto de vista prático.

Nos campos do estudo e da política das mudanças climáticas, não só os desenvolvimentos científicos influenciam as ações, mas também, e principalmente, o processo de tomada de decisões, do qual participam governos, organizações não governamentais, órgãos multilaterais, empresas grandes e pequenas, comunidades e indivíduos. Havendo fortes e irredutíveis incertezas nas formulações científicas, devido ao caráter evolutivo do sistema climático, o julgamento dos interessados assume papel central na tomada de decisão.

Mas existe uma pluralidade de perspectivas legítimas quanto às soluções adequadas, ao mesmo tempo em que, apesar de possuir substancial competência cognitiva, o ser humano tem performance cognitiva geralmente pobre, em decorrência de problemas no ambiente em que as decisões são tomadas (STEWART, 2000).

Em outras palavras, o cálculo objetivo das possíveis trajetórias futuras das emissões de gases-estufa, da sensibilidade climática, dos danos socioeconômicos decorren-

¹ Recurso excluível é aquele cujo uso pode ser controlado (um computador, uma casa). É necessário que os direitos de propriedade sejam efetivos para que a excluibilidade seja possível. A maior parte dos serviços ecossistêmicos não é excluível, pois simplesmente não se podem proibir as pessoas de usá-los (água corrente, ar puro, etc). Recursos rivais são aqueles cuja utilização por parte de um indivíduo rivaliza com a utilização por parte de outro (um prato de arroz, um automóvel). Gera escassez quando são consumidos. Bens não rivais não geram competição pelo uso, e por isso não têm preço de mercado, o que faz com que também não sejam eficientemente alocados pelo mercado.

tes do aumento da temperatura, e das possíveis estratégias de mitigação e adaptação, é apenas uma peça no processo de tomada de decisão, que é influenciado também pela interpretação das diversas partes envolvidas dos problemas em questão, e pelo próprio ambiente onde os cálculos são feitos e os julgamentos elaborados. Assim, além da melhoria dos modelos analíticos, podem-se otimizar os julgamentos por meio da construção de ambientes menos propícios a erros de cognição.

No Brasil, o ano de 2008 presenciou o tardio início dos esforços de abordagem científica das consequências de um aumento da temperatura sobre os ecossistemas, a economia e a sociedade. Além de projetos individuais espalhados por diversas Universidades, centros de pesquisa e órgãos governamentais, quatro iniciativas de porte merecem destaque:

- Rede brasileira de pesquisas sobre mudanças climáticas globais (rede-clima). Criada no final de 2007 por uma portaria do Ministério da Ciência e Tecnologia, tem por objetivo gerar e disseminar conhecimentos e tecnologias ligados à gestão das mudanças climáticas.
- Painel brasileiro sobre mudanças climáticas globais. Reune trezentos cientistas para produzir conhecimento sobre os impactos das mudanças climáticas no Brasil, atualizar os dados sobre emissões, e projetar o país nos fóruns internacionais sobre o tema.
- CNPq e Programa FAPESP de pesquisa sobre mudanças climáticas globais. Financiam estudos sobre impactos, vulnerabilidade, adaptação e mitigação, além do desenvolvimento de um modelo numérico do sistema climático global.
- Economia do clima. Consórcio de diversas instituições de pesquisas brasileiras, reuniu a visão de economistas e outros acadêmicos brasileiros em estudo que apresenta estratégias nacionais para lidar com os riscos climáticos, e avalia as medidas que já estão sendo adotadas (MARGULIS & DUBEUX, 2010).

A operacionalização desses estudos não poderá ser feita sem que se conheçam os diversos enfoques possíveis para o tratamento das questões econômicas ligadas às mu-

danças climáticas. As perguntas que norteiam essas análises já estão bastante claras para os economistas desde 1975, quando foram formuladas pelo indiscutível pioneiro da área, William D. Nordhaus: (a) qual o nível de emissões antrópicas de CO₂ que realmente provocará sérias mudanças climáticas? (b) que nível de redução pode e deve ser almejado? (c) quanto custará o resultante programa de redução de emissões? (d) como pode ser negociado o controle de emissões entre tantas nações e com interesses tão diversos? (NORDHAUS, 1975).

As respostas devem determinar (a e b) a *escala* sustentável de exploração das emissões de GHG; (c) a *alocação* eficiente dos investimentos em mitigação (a emissão de uma unidade de CO₂, independente do local, causa o mesmo efeito, de modo que pode ser alocada de acordo com critérios de eficiência econômica); e (d) a *distribuição* justa dos direitos de emissão. A pesquisa ligada a (a) é de exclusiva competência dos cientistas naturais, de forma que será exposta nesta dissertação apenas para contextualizar a discussão central.

O item (d) está relacionado a dois conjuntos de discussões: um de caráter eminentemente técnico, sobre os melhores instrumentos para colocar em prática as estratégias de mitigação e adaptação que decorrem das respostas a (a) e (b), e outro essencialmente ético e político, sobre o grau de responsabilidade dos diferentes países e grupos sociais para com a implementação dessas ações. São temas altamente relevantes, mas que não fazem parte do escopo deste estudo, que lidará com as perguntas (b) e (c).

William Nordhaus é o autor da resposta conhecida como “rampa” de investimentos, segundo a qual a intervenção ótima do ponto de vista da maximização do bem-estar social desta e das próximas gerações se baseia em investimentos baixos ou nulos no curto prazo, quando o mercado se encarregará de baratear as tecnologias que serão essenciais para controlar, nos prazos médio e longo, as emissões de GHG. Os investimentos cresceriam linearmente e atingiriam níveis substanciais na segunda metade do Século.

Concorre com essa posição a proposta da corrente de Nicholas Stern, que defende uma intervenção baseada em forte e imediato corte de emissões, como mostra a Figura 1. Essa proposta é radicalmente distinta da até então bastante aceita “rampa” de investimentos porque implica em custos até dez vezes mais elevados. Considerando a imensa difi-

culdade que o mundo tem em alocar coordenadamente a problemas ambientais e sociais quantias muito inferiores ao 1% do PIB (algo em torno de US\$ 400 bilhões) proposto por Stern, fica claro que a implementação de uma ou outra estratégia é uma decisão crucial.

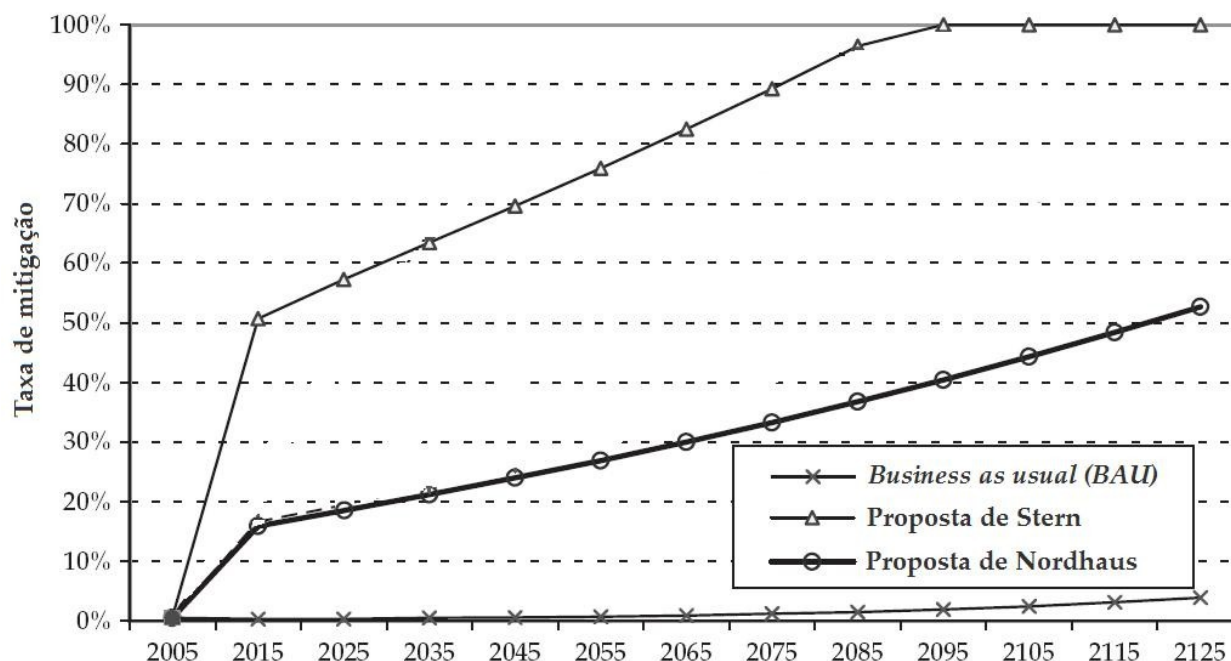


FIGURA 1 – taxas de mitigação das emissões de gases-estufa do cenário sem controle (BAU), da “rampa” de Nordhaus e do Relatório Stern.

Fonte: adaptado de Nordhaus (2008: 98).

A publicação do relatório Stern ressuscitou um interessante debate sobre a possível inadequação do ferramental convencional da economia (avaliação padrão de custo-benefício, aplicada por meio da otimização de modelos de equilíbrio geral computável para a maximização da eficiência econômica) para a análise das mudanças climáticas, fazendo com que ganhassem mais importância os esforços de construção de abordagens alternativas.

Sintomática da ascensão de novos enfoques foi a quase completa ausência, no

recente *International Scientific Congress on Climate Change*², dos economistas que advogam ser a simples adaptação da convencional economia neoclássica o melhor caminho para a construção de uma economia das mudanças climáticas. A palestra conferida pelo único representante desse grupo, William Nordhaus, foi fortemente criticada, e destoou das conclusões das sessões dedicadas à discussão dos modelos econômico-climáticos. Foram elas: (i) a urgente estabilização da concentração de GHG na atmosfera em 450 ppm (partes por milhão) deve ser o objetivo central da formulação de política, ao invés da maximização da eficiência econômica; (ii) o procedimento de desconto adotado pelos modelos convencionais deve ser revisto; e (iii) enfoques provenientes da filosofia moral, como o dos direitos humanos, da justiça social ou o da generosidade, merecem mais atenção.

O problema da pesquisa

O desenvolvimento de abordagens mais alinhadas com as conclusões do congresso de Copenhague é imperioso no atual momento, em que acontecerão importantes negociações políticas para o futuro do clima, e pode ser encampado pelas iniciativas já existentes no Brasil de construção de modelos econômico-climáticos. Mas para isso é fundamental que se entendam as possibilidades existentes no arcabouço analítico da economia, os seus limites, e as perspectivas de desenvolvimento futuro.

Teria a economia instrumentos adequados a oferecer ao estudo de problemática tão genuinamente complexa quanto as mudanças climáticas? Quais seriam essas ferramentas? Em que medida os resultados de trinta anos de desenvolvimento de modelos econômico-climáticos contribuem para a formulação de políticas públicas que garantam a sustentabilidade, a equidade, e a eficiência? Essas são perguntas relevantes que não estão postas, se não marginalmente e de forma desorganizada, no debate acadêmico de economia.

Esta dissertação contribui de duas maneiras para o esforço de esclarecer essas

² Reuniu, em março de 2009, dois mil participantes, entre os quais os principais estudiosos do clima, em Copenhague – <http://climatecongress.ku.dk/>. O objetivo era fornecer material para as negociações da COP-15, sintetizando a ciência que fora produzida sobre o tema após o quarto relatório do IPCC.

questões: (1) esmiuçando os dois principais modelos econômico-climáticos, o de Nordhaus e o de Stern, e apontando as suas diferenças, semelhanças, limitações e potencialidades; e (2) situando esses estudos no espectro de possibilidades da economia, de modo a fornecer pistas para uma discussão normativa dos caminhos que deveria tomar a economia das mudanças climáticas.

A controvérsia entre Nordhaus e Stern só poderá ser resolvida quando houver um entendimento razoável dos motivos que levam ao impasse. Por que as suas análises levam a recomendações tão distintas? É esta a pergunta que será abordada nesta dissertação, sob a hipótese de que têm peso igualmente relevante dois conjuntos de fatores técnicos, e o resultado final deriva de uma complexa interação entre eles. O primeiro é relativo à estrutura dos modelos, com destaque para o tratamento da incerteza, o nível de desagregação no tempo e espaço, e o tratamento da inovação tecnológica, e o segundo contempla o processo de desconto do futuro, em que inevitavelmente se deságua na complicada esfera da ética³.

Além do mais, discutiremos, ainda que de maneira preliminar, as possíveis implicações que tem a visão pré-analítica da economia convencional sobre os resultados dos estudos das mudanças climáticas: a premissa implícita de que a estrutura ecossistêmica⁴ não constitui limite de fato para a expansão da economia. Isso se materializa na redução do objetivo das políticas públicas à eficiência alocativa, e na exclusão do esforço analítico de considerações sobre incerteza forte.

O tema das mudanças climáticas não chegou ao debate acadêmico brasileiro de economia, de forma que este trabalho representa uma novidade de por si. Dentre as poucas exceções a essa regra a que tivemos acesso, estão as dissertações de Martin Brauch (2007) e de Edi Carlos Santos (2009), que representam pontos de partida para este estudo. De maneira geral, em relação à literatura especializada a que tivemos acesso, este trabalho traz três novidades importantes.

A primeira é uma síntese daquilo que surgiu na literatura após o relatório Stern e em decorrência dele. Como se perceberá ao longo do texto, a pesquisa neste campo se tor-

³ Estudo dos *princípios* que *devem* governar a conduta humana (COMMON & STAGL, 2005).

⁴ Conjunto dos recursos bióticos e abióticos do ambiente natural, bem como de suas funções ecossistêmicas.

na obsoleta a uma velocidade desconhecida em outras áreas da economia, de forma que aquilo que foi produzido antes do relatório Stern está em vias de ficar ultrapassado. Em segundo lugar, faremos um recorrido pelo trabalho de Nordhaus, um economista de elite da profissão que teve papel fundamental na constituição da economia ambiental, mas cuja obra ainda não dispõe de uma revisão profunda.

A terceira novidade é uma representação formal das implicações da incerteza irreduzível para o estudo das mudanças climáticas. O que se propõe é uma maneira simples e direta de se entender a relação entre urgência da ação mitigadora, intensidade da incerteza e grau de degradação ambiental.

A contribuição principal da dissertação é, em poucas palavras, a síntese, acompanhada de análise crítica, de uma literatura altamente volátil, pouco consolidada na economia, e com elevada influência sobre políticas públicas que tenderão a consumir uma ou mais unidades percentuais do PIB mundial nos próximos anos. Os procedimentos adotados para isso serão a análise minuciosa dos principais aspectos dos modelos em questão, apresentando quase sempre as discussões teóricas envolvidas – o que fará com que o texto fique um pouco longo –, e as inescapáveis formulações matemáticas, que, como se verá, encerram parte importante da essência do nosso objeto de estudo.

O texto está dividido em seis capítulos, além desta introdução. O primeiro contextualiza a discussão, fazendo um breve apanhado da história da ciência e da política das mudanças climáticas, apresentando as controvérsias da física, e introduzindo o debate econômico. O segundo capítulo apresenta a maior parte do conteúdo teórico que sustentará a análise da dissertação.

A terceira seção apresenta o modelo de Nordhaus, o DICE. A quarta parte apresenta os principais tópicos metodológicos do relatório Stern, bem como seus resultados. O quinto capítulo avalia e compara os modelos à luz da teoria exposta no Capítulo 2, e faz uma breve discussão das perspectivas da ciência positiva frente a problemas complexos e sujeitos à incerteza. A sexta seção conclui a dissertação.

CAPÍTULO 1

MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PERSPECTIVA

A preocupação com o efeito estufa, o aquecimento global e as mudanças climáticas é recente na história da sociedade industrial: trinta e cinco anos de duzentos. Mas o tempo nem sempre é uma boa medida da capacidade de avanço institucional da sociedade. O caráter de bem público global da atmosfera, associado à disseminação do acesso à comunicação via internet, e a um certo romantismo imbuído nas temáticas ambientais, levaram ao surgimento de um inédito movimento ambiental popular e transnacional.

A particularidade de um bem público global é que não existe jurisprudência capaz de controlá-lo, pois os Estados são soberanos e tomam decisões de acordo com as suas conveniências. Ter-se-ia, então, uma situação de tragédia dos comuns, em que um bem público de acesso aberto é utilizado até a exaustão, impondo custos elevados àqueles que dele dependem. A cooperação é uma possibilidade, mas a realidade mostra que sanções e dissuasão ainda são os meios mais eficazes em situações de urgência. A solução pragmática, então, é a de impor custos ao usufruto privado do bem público.

Os tópicos a seguir apresentam, ainda que resumidamente, o surgimento do movimento político de precaução contra as possíveis catástrofes decorrentes do aquecimento global, a maneira como se relaciona com a pesquisa científica nas ciências naturais, o embasamento científico do efeito estufa e das suas potenciais consequências, e a posição dos chamados “céticos”. A introdução ao debate em economia vem logo depois.

1.1 BREVE HISTÓRICO

A pesquisa científica relativa ao papel dos GHG e às consequências de um aumento da concentração de Gás Carbônico (CO₂) na atmosfera deu seus primeiros passos no

Século 19, quando Fourier, Tyndall e Arrhenius descobriram os gases-estufa (STERN, 2007: 9). O francês Joseph Fourier percebeu, na década de 1820, que a atmosfera absorve calor, já que é mais permeável à entrada de radiação solar que do à saída de radiação infravermelha. John Tyndall identificou os tipos de moléculas que apresentam a propriedade de reter o calor, apontando o CO₂ e o vapor d'água como as mais importantes. E o professor sueco Svante Arrhenius lançou, no fim do Século 19, as bases para o desenvolvimento da teoria do aquecimento global, argumentando, com cálculos feitos à mão, que se a concentração de CO₂ na atmosfera viesse a duplicar, haveria um aumento na temperatura de entre 4 e 6 graus Celsius (a melhor estimativa hoje é de 2,8 a 3,2 °C)⁵.

Esse campo de pesquisa tomou corpo ao longo do Século 20, em especial em sua segunda metade, com o aumento da temperatura verificado a partir da década de 1970 e com os desenvolvimentos posteriores que houve na ciência, culminando com o acordo estabelecido no fim de 1988, no âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e em parceria com a Associação Meteorológica Internacional (WMO, na sigla em inglês), que criou o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC).

No ano de 1990 o IPCC publicou o seu primeiro relatório (IPCC, 1990), reunindo boa parte da ciência que havia sido desenvolvida até então, e representando o consenso de uma série de estudiosos do clima recrutados para trabalhar no painel e de delegados governamentais enviados pelos mais diversos países com interesse no tema. O relatório concluía que o planeta efetivamente havia aquecido – já que durante as décadas de 1970 e 1980 a ciência meteorológica discutira se a trajetória da temperatura era realmente ascendente ou se continuava a cair, como havia acontecido desde a década de 1940 –, mas que boa parte desse aquecimento poderia ter sido causado por processos naturais (WEART, 2009: 21).

Como resultado do primeiro relatório do IPCC e do debate público e científico que surgiu nessa época em relação ao efeito estufa e à própria sustentabilidade do desenvolvimento⁶, a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou, em dezembro de 1989, a *Confe-*

⁵ IPCC (2007a: 15).

⁶ Ver Sachs (2002). A melhor definição é a de Common & Stagl (2005: 8): “*maintaining the capacity of the joint economy-environment system to continue to satisfy the needs and desires of humans for a long time in the future.*”

rência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que aconteceu em junho de 1992 no Rio de Janeiro, e ficou mais conhecida como Rio-92 ou Eco-92. Nessa conferência, mais de 150 países assinaram a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), em que se comprometiam a reduzir as emissões de CO₂ ao nível de 1990 até o ano 2000. Esse acordo, no entanto, foi evasivo e ambíguo o suficiente para permitir aos países que decidissem se realmente tomariam ações sérias para a redução da emissão de GHG (ibidem: 22).

Essa convenção e o relatório do IPCC de 1996⁷, em que se concluía que o aquecimento provavelmente não era inteiramente natural e que “*the balance of evidence suggests that there is a discernible human influence on global climate*” (IPCC, 1996), foram as bases para o desenho do posterior Protocolo de Quioto, aberto para assinaturas em 1997. Esse acordo, que entrou em vigor em fevereiro de 2005, depois da ratificação por parte da Rússia, foi feito através de uma emenda à UNFCCC, e prevê a redução das emissões de CO₂, no período que vai de 2008 a 2012, a um nível 4,3% inferior ao de 1990 por parte dos países industrializados que ratificaram o tratado, sem exigir nenhum esforço de redução de emissões por parte dos países em desenvolvimento.

Os cinco anos que se seguiram à Rio-92 foram de intensa mobilização e discussão dos temas ambientais, mesma época em que surgiram os principais estudos econômicos das mudanças climáticas, e quando se estabeleceu a UNFCCC. Mas já no fim da década outros temas ganharam o topo da agenda: crises financeiras nos países em desenvolvimento, guerra em Kosovo, e atentados terroristas em Nova Iorque. Em 2001 foi publicado o terceiro relatório do IPCC (IPCC, 2001), de forma que o tema reemergiu, apenas para cair definitivamente no marasmo quando os Estados Unidos se retiraram das negociações do tratado de Quioto. Além disso, os questionamentos do gráfico *hockey stick* (ver Anexo 1), publicado no terceiro relatório do IPCC, diminuíram a credibilidade da ciência do clima.

Devido a uma benéfica sincronização de eventos, os anos de 2006 e 2007 marcaram uma nova virada na mobilização política ligada às mudanças climáticas. Estreou o

⁷ O IPCC havia projetado a divulgação de dois relatórios por década, de forma a dar tempo, entre uma publicação e outra, ao trabalho de cientistas e de *policy makers*.

documentário *Uma verdade inconveniente*, de Al Gore (2006); foi publicado o relatório Stern (2006); lançou-se o quarto relatório do IPCC (2007, 2007a); o evento Live Earth tornou as mudanças climáticas um tema *pop* (2007); o prêmio Nobel da Paz foi atribuído ao IPCC e a Al Gore (2007); divulgaram-se dados sobre o derretimento das calotas polares acima do previsto (2007); países europeus assumiram compromissos de fortes reduções de emissões (2007); tiveram início a vigência do protocolo de Quioto (2008) e as negociações para o próximo acordo do clima; e a China ultrapassou os Estados Unidos em termos de emissões de CO₂ (2007)⁸. Tornava-se inevitável, com isso, uma nova tendência na retórica das políticas governamentais: a da construção de uma “economia verde” (VALE, 2009).

Mesmo assim, não são encorajadores os resultados de mais de dez anos de negociações no âmbito da UNFCCC. Na Tabela 1 são comparadas as metas de redução de emissões assumidas para o ano de 2012 por trinta e oito países pertencentes ao Anexo 1 desse acordo com os resultados obtidos até 2006. Identifica-se um grupo de dezoito nações que quase certamente irão cumprir ou mais do que cumprir a meta, representando 47,8% das emissões totais do grupo em 2006; cinco países responsáveis por 13,1% das emissões que não cumprirão os objetivos assumidos e emitiram, em 2006, em média, 29,4% acima da meta assumida para 2012; e quinze países, responsáveis por 39,1% das emissões, que poderão cumprir a meta, alguns com facilidade e outros com sérias dificuldades.

Curiosamente, se o protocolo de Quioto tivesse vencido em 2006, as metas teriam sido mais do que cumpridas, pois houve até esse ano uma redução de emissões de 15,4% para os trinta e oito signatários (a meta global para 2012 é de 4,3%⁹). O que só permite concluir que foram determinadas metas excessivamente tímidas, em decorrência de terem sido formuladas com distância de dezoito anos entre o período base (1990) e o início do acordo (2008), impondo um grande componente de erro à magnitude do esforço exigido; e de terem participado das negociações mais de uma centena de países que, na prática, pou-

⁸ Notar, todavia, que essa ultrapassagem é em termos de conteúdo de carbono da *produção* chinesa, e não do *consumo*. Quando calculadas pelo lado do consumo (subtraindo-se do produto as exportações e somando-se as importações), as emissões da China são, provavelmente, bastante inferiores às dos Estados Unidos (VEIGA, 2010).

⁹ Notar que esse valor, calculado a partir dos dados divulgados pela UNFCCC, difere daquele comumente noticiado na mídia, de 5% ou 5,2%.

co podiam contribuir para o objetivo, já que emitem uma quantidade irrelevante de GHG.

A primeira dificuldade será minimizada nas negociações para o período pós-Quito, pois atualmente os dados de emissões são disponibilizados com atraso bem menor. Já o segundo problema exigirá que o grupo de vinte países que concentra mais de três quartos das emissões produza um acordo sério (VEIGA & VALE, 2009).

TABELA 1 – países do Anexo 1: emissões antropogênicas totais e agregadas de CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs e SF₆ (exceto uso da terra e florestas) – meta de Quioto, variação verificada entre 1990 e 2006, emissões em 2006 relativamente à meta para 2012, e índice de participação nas emissões em 2006 (ratificantes de Quioto = 100).

Países que integram o Anexo 1*	Meta de Quioto (1990 a 2012)	Variação das emissões (1990 a 2006)	Emissões em 2006 ÷ meta para 2012	Índice de participação nas emissões em 2006 (ratificantes de Quioto = 100)
Ratificantes de Kyoto	-4,3%	-15,4%	88,5%	100,0
Países que cumprirão a meta ¹	-2,5%	-31,0%	70,7%	47,8
Países que não conseguirão cumprir a meta ²	-1,3%	27,8%	129,4%	13,1
Países que talvez cumprirão a meta ³	-8,4%	1,4%	110,7%	39,1
Não ratificantes de Quioto	x	16,6%	—	68,9
Turquia	x	95,1%	—	3,1
Estados Unidos	x	14,4%	—	65,8
TOTAL ANEXO 1	—	-4,7%	—	168,9

* Integram o Anexo 1 países que cumprem dois requisitos: responsabilidade histórica pela acumulação de gases-estufa na atmosfera e capacidade tecnológica para a mitigação das emissões. A Turquia entrou no Anexo 1 por vontade própria, em 2001, mas não ratificou o Protocolo de Quioto. Os Estados Unidos também não o ratificaram. As metas de redução de emissões dos demais países foram baseadas nos citados critérios e nas negociações políticas no âmbito da UNFCCC. A ratificação da Rússia, em 2004, permitiu que o protocolo entrasse em vigor. A Austrália o ratificou em 2007; **1** – Rússia, Reino Unido, França, Ucrânia, Polônia, Romênia, República Tcheca, Grécia, Bielorrússia, Hungria, Bulgária, Suécia, Eslováquia, Croácia, Lituânia, Estônia, Letônia e Mônaco; **2** – Canadá, Espanha, Áustria, Dinamarca e Nova Zelândia; **3** – Japão, Alemanha, Itália, Austrália, Holanda, Bélgica, Portugal, Finlândia, Irlanda, Noruega, Suíça, Eslovênia, Luxemburgo, Islândia e Liechtenstein.

Fonte: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

Mas o cenário é muito distinto quando se analisa todo o grupo do Anexo 1 da UNFCCC, ou seja, quando se incluem Turquia e Estados Unidos, que sozinhos representam mais de dois terços das emissões dos signatários do protocolo de Quioto. A Turquia praticamente dobrou a quantidade de emissões entre 1990 e 2006, enquanto nos Estados Unidos elas aumentaram 14,4%, fazendo com que a redução de emissões do grupo como um todo tenha sido de apenas 4,7% no período. Como o Anexo 1 representa 40% das emissões globais, essa diminuição representou somente 1,88% do total, e foi mais que superada pelo aumento das emissões de países como China (78% de 1990 a 2004, considerando apenas CO₂) e Índia (59,9%). O total das emissões mundiais cresceu 27% entre 1990 e 2004.

Apesar das oito reuniões e quase dez anos consumidos no processo que levou ao Protocolo de Quioto, passará longe de ser atingido o objetivo da UNFCCC de “*to achieve stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a low enough level to prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system*”. Se o acordo que prevalecer no regime pós-Quito mantiver os resultados que caracterizaram as quinze reuniões da COP (Conferência das Partes da UNFCCC) já realizadas, serão elevados os riscos de a espécie humana enfrentar nas próximas décadas custosas catástrofes socioambientais.

1.2 O EMBASAMENTO FÍSICO

O efeito estufa deriva da capacidade que têm os GHG, o vapor d'água e as nuvens de reter a maior parte da radiação infravermelha que é expelida pela terra, devido à opacidade desses gases à radiação de ondas longas, e à sua simultânea transparência à radiação emitida pelo Sol, que é caracteristicamente de ondas curtas. A diferença entre a radiação que entra e a que sai da Terra é chamada de *forçamento radiativo (radiative forcing)*, e um aumento da concentração de GHG tende a aumentar esse saldo, levando a um acréscimo na temperatura¹⁰. Com isso, o planeta se comporta de maneira semelhante a uma estufa, facilitando a entrada do calor e dificultando a sua saída. Sem o efeito estufa a temperatura

¹⁰ Esse efeito é contrabalançado pelos efeitos da convecção – transporte de calor pelas correntes de ar na atmosfera – e pela condução – transporte de calor através de cargas elétricas – (LINDZEN, 1994),

média da Terra não daria condições à vida, pois se situaria ao redor dos dezoito graus Celsius negativos, trinta a menos do que a temperatura corrente (CLINE, 1992: 16; STERN, 2006: 9).

Dentre os GHG que podem ser emitidos por processos antrópicos, os mais importantes são os chamados GHG de Quioto, seis gases cujas emissões são controladas pelo Protocolo de Quioto: Gás Carbônico (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (NH₂), Perfluorcarbonetos (PFCs), Hidrofluorcarbonetos (HFCs) e Hexafluoreto de Enxofre (SF₆).

Segundo o mais recente relatório do IPCC, em 2004 as emissões desses gases representavam 77% do total das emissões antropogênicas, sendo que houve um acréscimo da ordem de 70% entre os anos de 1970 e 2004 e de 24% entre 1990 e 2004 (IPCC, 2007a: 3). A concentração atmosférica dos três primeiros gases aumentou, respectivamente, 35,35%, 148,1% e 18,14% desde a era pré-industrial¹¹, o que causou um incremento do forçamento radiativo estimado da ordem de 2,3 W/m₂ (ibidem: 10).

Junte-se a isso o fato de que a temperatura tem aumentado a cada ano desde a década de 1970, e estão dadas as bases para a defesa do argumento de que está em curso um aquecimento global que se deve mais ao homem do que à natureza. De acordo com o IPCC: “*warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global average sea level*” (ibidem: 5).

Essa constatação é baseada em uma série de fatores, entre os quais:

- (1) no período que vai de 1995 a 2006, apenas um ano não esteve entre os mais quentes de todo o histórico de registros da temperatura global, que começou em 1850;
- (2) as pesquisas paleoclimáticas mais recentes, que utilizam *proxies* para inferir a temperatura de centenas, milhares e milhões de anos atrás, dão suporte à interpretação de que o aquecimento dos últimos cinquenta anos não tem precedentes nos últimos 1300 anos.

A pergunta que surge é: o aumento acentuado da temperatura que se tem verificado decorre das crescentes emissões antropogênicas de GHG ou de fatores naturais?

¹¹ O IPCC utiliza o ano base de 1750. Os valores para a concentração de GHG são estimados através da análise da composição química das camadas de gelo acumuladas nessa época nas regiões polares.

A resposta tem sido dada com crescente nível de certeza no sentido de confirmar que o processo produtivo da moderna sociedade industrial é o responsável pela *maior parte* do excedente de forçamento radiativo verificado nos últimos cinquenta anos. Na visão do IPCC, esse nível de certeza é superior a 90%, um avanço muito grande em relação ao anterior relatório, de 2001, em que a probabilidade era da ordem de 66% (ibidem: 10).

Essa visão não permanece, no entanto, isenta de controvérsias. Apesar de existir um grande número de cientistas que defendem o argumento do aquecimento antropogênico, não há como ignorar o grupo dos “céticos”, como são conhecidos os estudiosos que defendem argumentos contrários à visão preponderante¹². Esse grupo, bem menor e menos uniforme do que o primeiro, é formado por cientistas de diversas áreas que contestam argumentos importantes utilizados pelo IPCC para comprovar a tese do aquecimento antropogênico. Segundo Keller (2003, 2007), quatro são as teses dos cientistas céticos:

- (3) os registros da temperatura na superfície não são confiáveis, uma vez que as observações de satélite atestam um aquecimento muito menor a partir de 1945.
- (4) O aquecimento que se verificou no século 20 não é novo, pois a temperatura do planeta varia no tempo e já houve períodos igualmente ou mais quentes do que o atual.
- (5) A variação verificada na temperatura pode ser atribuída a variações na atividade solar e a outras forças naturais.
- (6) O clima é excessivamente complexo e caótico para ser modelado, e as conclusões dos GCMs não são confiáveis.

O conhecido gráfico que mostra a elevação da temperatura média global desde 1860 (Figura 2) impõe uma indagação que até agora não parece ter sido respondida de forma convincente. Nota-se facilmente um intervalo de relativo esfriamento entre 1947 e 1974, justamente o período em que o ritmo de crescimento da economia mundial bateu todos os recordes, a ponto de passar para a história como a sua “era de ouro”. Entre 1950 e 1973 foram registradas taxas médias anuais de aumento do PIB mundial total e *per capita* da ordem de 4,9% e 3,8% respectivamente. Pelo menos o dobro dos recordes de fases ante-

¹² A melhor resenha dos argumentos desses pesquisadores foi feita por Molion (2008). No mesmo livro, Oliveira (2008) apresenta um excelente contraponto às teses dos céticos.

riores ou posteriores, nas quais essas médias jamais ultrapassaram 2,5% e 2%. Trata-se, portanto, de um estupendo paradoxo, pois não há como supor que ao longo do mais glorioso quarto de Século do capitalismo industrial poderiam ter diminuído as emissões humanas de GHG, apontadas como principal indutor do aquecimento.

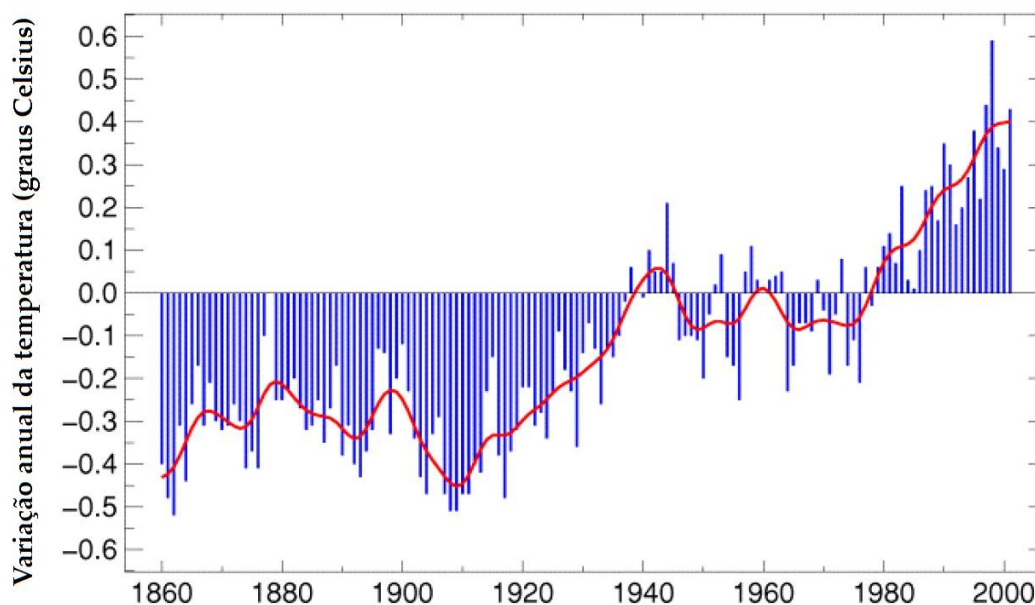


FIGURA 2 - temperatura média global na superfície¹. Variações anuais, 1860 – julho / 2001.

1 – Dados do UKMet Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Reino Unido.

Fonte: Keller (2003: 361).

“O próprio IPCC concorda que o primeiro período de aquecimento, entre 1920 e 1946, pode ter tido causas naturais, possivelmente o aumento da produção de energia solar e a redução de albedo planetário, discutidas mais abaixo. Antes do término da Segunda Guerra Mundial, as emissões decorrentes das ações antrópicas eram cerca de 6% das atuais e, portanto, torna-se difícil argumentar que os aumentos de temperatura, naquela época, tenham sido causados pela intensificação do *efeito estufa* pelas emissões antrópicas de carbono” (MOLION, 2008: 58 – 59).

Uma explicação razoável, todavia, é a de que a sensibilidade do sistema climático às emissões antrópicas passou a ser mais importante do que a variação natural do clima somente após a 2ª Guerra Mundial. Como ocorrem defasagens entre emissões de CO₂, concentração de carbono na atmosfera e temperatura, as emissões da “era do ouro” forçaram a temperatura apenas na década de 1970.

Seja como for, há três boas razões para se admitir que o aquecimento global esteja ocorrendo e seja *man-made*. Primeiro, o fato de que essa tese venha obtendo muito mais respaldo nas comunidades científicas envolvidas do que a tese oposta. É fato que a história da ciência está cheia de exemplos em que a verdade estava com a minoria, mas há cada vez menos motivos para se acreditar que a controvérsia sobre o aquecimento global será mais um caso para essa lista. A segunda razão decorre daquilo que tem sido chamado de “princípio da precaução”, por mais que possa ser polêmico. Quando há incerteza sobre o rumo que poderá tomar um fenômeno com tão sérias consequências sobre o futuro da humanidade, melhor adotar a pior hipótese. E a terceira razão resulta de puro realismo político: a retórica da sustentabilidade veio para ficar (VEIGA & VALE, 2007).

Além da complexidade envolvida na modelagem dos sistemas climáticos, Nordhaus & Ausubel (1983) argumentam que as previsões são influenciadas por fatores culturais, derivados da maneira como o pesquisador enxerga a relação entre o homem, a sociedade e a natureza. Assim, mesmo que chegasse a existir consenso sobre um determinado modelo a ser adotado, certamente haveria discordância nos valores a serem assumidos pelas variáveis. Não se trata apenas de incerteza, mas da coexistência de diferentes e contraditórias certezas, cada uma delas fundamentada numa visão bem estruturada de determinado grupo de pessoas.

A controvérsia sobre a teoria do aquecimento global deixa em aberto uma importante pergunta: quanto vai aumentar a temperatura e em quanto tempo?

A resposta depende da capacidade dos modelos biofísicos de reproduzirem a realidade física do clima, bem como da acurácia dos cenários futuros sobre a resposta do sistema climático ao aquecimento. Além do mais, estão em jogo os cenários de crescimento populacional e econômico, de avanço tecnológico, e de intensidade carbono da economia. É

deste último conjunto de relações, com forte influência sobre o clima, que trata esta dissertação.

1.3 **MODELOS ECONÔMICOS *versus* MODELOS BIOFÍSICOS**

A diferença fundamental entre os modelos econômicos¹³ e os modelos biofísicos é que estes têm um nível de desagregação e detalhamento muito maior, podendo simular com mais precisão diferentes cenários de aquecimento.

Os modelos biofísicos são capazes de simular efeitos como: acidificação dos oceanos, perda de biodiversidade, degelo no Pólo Norte, savanização da Amazônia, aumento da frequência e impacto de temporais e ciclones, menor previsibilidade e maior variabilidade do ciclo hidrológico, maior incidência de secas, desestruturação da agricultura de países pobres, aumento do nível do mar, desestabilização das monções asiáticas e do El Niño, enfraquecimento da circulação termoalina (possível colapso da corrente do Golfo), entre outros. Já os modelos econômicos não conseguem detalhar a maior parte desses danos.

As recomendações dos cientistas naturais tendem a ser bem mais conservadoras do que as dos economistas convencionais. O IPCC estima pouco mais de 4 °C de aquecimento para o patamar de concentração considerado *ótimo* por Nordhaus (2010), que recomenda um pico de emissões no ano de 2105, com a concentração de GHG ultrapassando os 710 ppm CO₂e¹⁴ na segunda metade do Século 22.

A concentração atmosférica de gases-estufa, da ordem de 430 ppm CO₂e em 2006 (380 ppm de CO₂ e 50 ppm CO₂e de outros gases), foi suficiente para aumentar a temperatura média do planeta em aproximadamente 0,7 °C desde a era pré-industrial. Caso seja mantido o crescimento da concentração que se verificou em 2007, de 2 a 3 ppm CO₂e anuais, a atmosfera deverá conter, no fim do Século 21, 700 ppm CO₂e (STERN, 2007). Esse

¹³ Santos (2009) faz uma interessante resenha em português dos procedimentos adotados pelos principais modelos econômicos do final dos anos 1990 e início dos 2000.

¹⁴ Gás Carbônico equivalente. A medida do volume de GHG é convencionalmente feita em termos de equivalência com o Gás Carbônico quanto ao potencial de efeito estufa. Por exemplo, uma tonelada de Metano gera muito mais efeito estufa do que uma tonelada de Gás Carbônico, de forma que tem um valor em CO₂e bem superior ao CO₂.

nível é consensualmente visto como muito perigoso. Mas a identificação de um patamar seguro exato é controversa, devido aos elevados graus de incerteza e de ignorância, e à dificuldade em se definir *segurança*.

Na visão mais conservadora, o nível máximo de aquecimento aceitável é de 2 °C, admitido-se, para isso, a estabilização da concentração numa faixa que vai dos 445 aos 490 ppm CO₂e (IPCC, 2007a: 15). Estimativas ainda mais pessimistas, sintetizadas no citado congresso de Copenhague, afirmam que 450 ppm CO₂e deixariam 50% de chance de se atingir a meta de 2 °C, ao passo que 500 ppm dariam apenas 15% de probabilidade de se obter esse resultado (RICHARDSON *et. al.*, 2009: 20). Além disso, lembram que a concentração de GHG na atmosfera já era de 463 ppm CO₂e em 2007, mais do que os 430 divulgados pelo relatório Stern para 2006.

Existe, em suma, uma grande divergência entre as propostas dos economistas alinhados a Nordhaus e a visão dos cientistas naturais.

1.4 A ECONOMIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

William Nordhaus é o fundador da economia das mudanças climáticas e dono da maior obra existente sobre o assunto, sendo autor de oito livros e mais de 50 publicações científicas na área. O seu pioneirismo no estudo do tema antecedeu em quinze anos a presença das mudanças climáticas na pauta das negociações internacionais no âmbito das Nações Unidas. Em 1977 ele lançava, ao mesmo tempo, as bases do primeiro modelo econômico-climático, que mais tarde viria a chamar DICE, e as perguntas que uma década depois se tornariam o centro do debate sobre a capacidade do homem de influenciar o clima – e que continuam sendo as perguntas centrais atualmente. O desafio da economia das mudanças climáticas passou a ser o de dar resposta confiável à seguinte indagação:

(7) quanto, como e quando se deve investir em mitigação e adaptação?

Antes mesmo da criação do IPCC, em 1988, Nordhaus havia adaptado modelos macroeconômicos convencionais à análise do fenômeno climático, abordagem que fundamentou a maior parte dos estudos durante os dezoito anos que se seguiram à criação daque-

le painel pela ONU. Mas foi William Cline (1992) quem conseguiu dar a primeira resposta completa à pergunta (7). O seu livro *The economics of global warming* tornou-se referência em economia das mudanças climáticas e inaugurou a corrente dos que defendem a aplicação do princípio da precaução, em oposição à visão preponderante até então, de Nordhaus.

Nordhaus argumentou que os resultados obtidos por Cline se deviam à taxa de desconto¹⁵ utilizada, de 1,5%, muito inferior às taxas reais de juros (NORDHAUS, 1993: 316). Uma menor taxa de desconto aumenta o valor presente dos danos futuros calculados, exigindo investimentos mais rápidos em mitigação. O não direcionamento desses investimentos para o setor de inovação tecnológica retarda o surgimento de uma *backstop technology*¹⁶ capaz de substituir matrizes energéticas poluidoras. Por contraste, uma alta taxa de desconto leva ao consumo rápido dos recursos energéticos no presente, gerando renda para investimentos em inovação tecnológica.

Cline se defendeu argumentando que a “taxa social de preferência temporal” deveria ser uma média entre as taxas de desconto privada e social, pois os recursos investidos em mitigação e adaptação não provêm majoritariamente do setor privado nem do público, mas do consumo (CLINE, 1992: 247).

A partir do início da década de 1990, o debate ganhou força e se instituiu definitivamente na agenda política global, devido especialmente à publicação do primeiro relatório do IPCC. Com isso, uma série de autores se dedicaram a escrever sobre o assunto a partir do enfoque econômico, além de importantes agências governamentais e supragovernamentais (*Environmental Protection Agency*, Estados Unidos; *Department of the Environment*, Inglaterra; Comunidade Européia; OCDE; UNCTAD).

A economia das mudanças climáticas se estabelecia como nascente área de pesquisa e surgiam diferentes modelos analíticos, gerando um interessante debate em torno das peculiaridades dos modelos:

¹⁵ A taxa com a qual se desconta o consumo, que em projetos privados é aproximadamente igual à taxa de remuneração do capital ou taxa de juros.

¹⁶ Reduz o custo do carbono a zero, podendo ser uma tecnologia que retire o carbono da atmosfera ou uma fonte de energia que não emita carbono (NORDHAUS, 2007: 27).

“[t]he main thrust of the Nordhaus analysis is that little action needs to be taken on greenhouse abatement unless one is pessimistic about damages. In contrast, the analysis of this study suggests that an aggressive course of abatement is warranted, at least with risk aversion” (CLINE, 1992: 307).

As razões apontadas por Cline para a diferença nos resultados de Nordhaus estavam principalmente na função de danos linear deste último¹⁷. De fato, os resultados diferiam em grande magnitude, especialmente nas conseqüências calculadas de aumentos na temperatura de ordens elevadas no longo prazo (10 °C), para os quais Cline estimava perdas de até 20% do PIB. Nordhaus, por outro lado, argumentou que as estimativas de Cline em relação aos impactos de aumentos da temperatura eram viesadas no sentido de superestimar os impactos.

Cline dedicou um inteiro capítulo de seu livro ao procedimento de desconto, dando a devida importância a um assunto que não encontra resposta definitiva pelo menos desde 1928, quando Ramsey (1928) escreveu uma das mais importantes obras sobre o assunto. Cline apresentou o debate em que se contrapõem uma taxa de desconto social e uma privada, argumentando que deve existir um meio termo entre essas duas interpretações, levando a uma taxa social de preferência temporal.

O livro de Cline, ao questionar as premissas da taxa de desconto elevada e da linearidade da função de danos adotadas por Nordhaus, entre outros fatores, deu início ao debate aberto sobre os aspectos técnicos da análise de custo-benefício das estratégias de combate ao aquecimento global. Nesse contexto, é possível dizer que, no íterim que vai da Eco-92 até a publicação do segundo relatório do IPCC, em 1996, se delinearam as duas principais correntes da economia das mudanças climáticas, aquela liderada por Nordhaus, que defende uma intervenção *gradual* baseada em mitigação e adaptação, e a então liderada por Cline, com uma posição mais *precaucionista*¹⁸.

¹⁷ Nordhaus incorporou uma função quadrática de danos logo depois das críticas de Cline, na segunda versão do DICE, em 1993 (Nordhaus, 1993a: 35), formulação que se tornou padrão nos estudos da área.

¹⁸ O termo é usado nesta dissertação para definir a corrente liderada por Nicholas Stern e William Cline. As análises precaucionistas são aquelas em que um princípio filosófico apriorístico (o da precaução) é tão

Surgiram, nessa mesma época, os *Integrated Assessment Models* (IAMs), modelos quantitativos que integram descrições da dinâmica socioeconômica (macroeconomia, instituições, emissões de GHG) a descrições da dinâmica biofísica (oceanos, atmosfera, florestas), permitindo a interação entre políticas públicas e sistema climático. Pôde-se, com isso, pela primeira vez, falar em modelos econômico-climáticos.

Até o início dos anos 1990, os modelos utilizados pelos economistas tomavam exogenamente os resultados dos modelos biofísicos, sem permitir que a dinâmica ecossistêmica fosse afetada pelas políticas públicas, e vice-versa. Supunha-se que a economia seguiria operando de acordo com um cenário pré-determinado, calculava-se o resultado em termos de mudanças climáticas, e alimentava-se com isso o modelo econômico.

No decorrer dos anos 1990 os IAMs foram sendo aperfeiçoados à medida que tinha continuidade o debate entre gradualistas e precaucionistas. A cada novo relatório do IPCC se sedimentava um novo conjunto de procedimentos e conclusões, tanto nas ciências naturais como nas ciências sociais, e a economia das mudanças climáticas evoluiu nesse processo. Mas os pilares analíticos fundamentais pouco se distanciaram das convencionais análises de custo-benefício feitas por meio da otimização de modelos de crescimento.

A primeira metade dos anos 2000 foi um momento em que a abordagem gradualista se tornava hegemônica, e que as discussões se afunilavam em detalhes técnicos de modelos agregados (parâmetro de aversão ao risco, parâmetro de desconto do tempo, exponente da função de danos). O diálogo entre economistas e não economistas era crescentemente ruidoso, em parte devido às conclusões ultra-otimistas a que chegavam os modelos daqueles, em parte devido à própria natureza tecnicista que assumia o debate interno. Havia cada vez menos lugar para análises econômicas não convencionais, quanto menos para uma perspectiva que aceitasse dialogar de maneira serena com as idéias vindas da ecologia e da física.

O relatório Stern, publicado em 2006, tornou-se notório por sua completude e pelo impacto público que causou. Sua conclusão central é a de que a sociedade deve enfrentar com força imediata o problema do aquecimento global, investindo 1% do PIB do plane-

relevante para os resultados quando a análise objetiva.

ta desde já, sob o risco de o valor presente dos custos dos danos futuros ser igual à perda de 5% a 20% do PIB mundial “agora e para sempre”. Para ele, as ações que serão tomadas nos próximos dez a vinte anos influenciarão decisivamente o clima do planeta na segunda metade deste Século e no próximo, e as conseqüências de estratégias pouco incisivas poderão ser tão graves como a da crise de 1929. A julgar por essas conclusões, estaríamos no limiar da catástrofe.

Nordhaus não compartilha dessa visão: conclui que a política ótima de enfrentamento do aquecimento global irá custar¹⁹ 0,56% do PIB mundial. Além disso, estima que o custo social para o ano de 2005 da emissão de uma tonelada de carbono no cenário BAU é de US\$ 28,00 (dólares de 2005), enquanto Stern estima US\$ 350,00 (NORDHAUS, 2007: 129, 137). São propostas radicalmente distintas para o *timing* dos investimentos, como se vê na Figura 1.

A maioria dos trabalhos publicados após o relatório Stern procurou explicar essa diferença com base em dois conjuntos de fatores: os modelos adotados e as premissas econômicas, especialmente a escolha dos parâmetros ligados à taxa de desconto. E parece que os economistas alinhados a Nordhaus tendem a enfatizar a taxa de desconto como principal determinante dos resultados, enquanto os ligados a Stern tendem a explorar os detalhes dos modelos e dar menos importância à taxa de desconto. Poucos, todavia, se aproximaram de uma visão sistêmica do problema.

A partir dessa controvérsia desenha-se o atual debate, que se polariza entre o grupo de Nordhaus, Mendelsohn e outros, defensores de um *timing* que se pareça com uma “rampa”, em que os investimentos em mitigação aumentam lentamente com o tempo, e o grupo de Cline e Stern, que propõem uma intervenção imediata para frear rapidamente as emissões. Já os argumentos daqueles que não aceitam a transposição do convencional ferra-

¹⁹ A distinção entre o que é custo e o que é investimento no debate das mudanças climáticas é intrincada, e sozinha mereceria uma dissertação de Mestrado. Para os fins restritos deste estudo, é adotado um procedimento simples e razoável. Formalmente, investimento é um ato que decorre de decisão autônoma de um agente econômico para a construção de estrutura produtiva nova. Já a categoria custo se refere às despesas de manutenção da estrutura produtiva existente. Nesse sentido, define-se investimento como todo gasto ligado ao enfrentamento das mudanças climáticas que é realizado por decisões empresariais autônomas, e custo como um gasto imposto pelas políticas climáticas.

mental mecanicista para o estudo da sustentabilidade, e particularmente do complexo fenômeno das mudanças climáticas, têm ficado marginalizados, talvez porque essa crítica não está bem sistematizada e, como sói a acontecer quando se inicia um contra-movimento, ainda não tem uma alternativa viável para oferecer.

1.5 SÍNTESE PRELIMINAR

Os trabalhos de Cline e de Stern foram bombas lançadas contra a corrente gradualista na tentativa de reformulá-la:

“[T]he bottom-up, disaggregated, less formal, risk-evaluation approach is preferable to aggregate modelling in investigating the case for action. The latter is particularly weak in relation to formal optimization” (STERN, 2008: 23).

“For this reason, I find it remarkable that some economists continue to argue that stabilization levels around 650ppm CO₂e or even higher are preferable to 550ppm, or even optimal (William Nordhaus; Mendelsohn). It is important to be clear that the 'climate policy ramp' (Nordhaus) advocated by some economists involves a real possibility of devastating climatic changes” (ibidem: 6).

Os principais ataques foram no tema do procedimento de desconto e na omissão dos gradualistas quanto à incerteza forte: enquanto os modelos convencionais excluía aquilo que não pode ser modelado com precisão, Cline e Stern preferiram buscar maneiras de incluir; enquanto os gradualistas reconheciam que a incerteza inviabiliza análises determinísticas, mas continuavam a recomendar políticas baseados nesses modelos, Cline e Stern invocaram o princípio da precaução, e argumentaram que é racional comprar um seguro contra riscos catastróficos, ainda que incertos. Além disso, a corrente precaucionista defendeu a idéia de que o diálogo em economia das mudanças climáticas deve ser feito de forma a envolver outros *stakeholders* no processo decisório.

Três conclusões podem ser ensaiadas com base nessa discussão:

- (I) apesar das controvérsias sobre o embasamento físico da teoria do aquecimento global antropogênico, boa parte dos cientistas acredita que há informações suficientes para se aplicar, em alguma medida, o *princípio da precaução*.
- (II) A intensidade com que se aplicará esse princípio depende da *escala* sustentável de exploração das emissões de GHG, que só pode ser estabelecida a partir de uma detida análise dos riscos e incertezas relacionados às mudanças climáticas. O desafio da economia é o de levar a cabo essa análise e sugerir políticas adequadas do ponto de vista da sustentabilidade, equidade e eficiência.
- (III) O debate sobre a política adequada se renovou com a publicação do relatório Stern, como se infere a partir das dezenas de revisões publicadas em importantes revistas pelos melhores economistas da área.

Ao tentar entender as diferenças centrais entre as perspectivas de Nordhaus e de Stern, esta dissertação abordará tanto o debate mais geral entre gradualistas e precaucionistas quanto indagações relativas ao papel da economia no processo de construção de consensos e de suporte à tomada de decisão nas políticas climáticas. Para isso, o próximo capítulo apresentará as diversas discussões teóricas e metodológicas relacionadas aos modelos econômico-climáticas, para que nos capítulos seguintes seja possível analisar criticamente os trabalhos de Nordhaus e de Stern.

CAPÍTULO 2

MODELOS ECONÔMICO-CLIMÁTICOS

“Cadê o seu modelo?”

É bem possível que essa pergunta seja menos comum em desfiles de moda do que em conversas de economistas. A tentativa de defender um argumento em economia sem fazer referência a um modelo quantitativo está com frequência fadada ao fracasso logo nos primeiros minutos do diálogo. Quando o tema em questão envolve interesses, riscos, e incertezas da magnitude com que lida a ciência das mudanças climáticas, não há a menor chance de se construir um argumento sem modelos formais.

Esta seção fornece a base teórica e metodológica para a compreensão e análise dos modelos que serão apresentados nos Capítulos 3 e 4 e analisados criticamente no Capítulo 5. Após uma rápida descrição dos estudos contemporâneos mais importantes, são explorados os tópicos: objetivo do modelo (item 2.1), que pode ser a prescrição ou a descrição de políticas públicas; tratamento da incerteza, em que se distinguem inicialmente os diversos tipos de incerteza existentes, descrevendo-se em seguida os modelos determinísticos (*best guess*) e os probabilísticos (item 2.2); outros fatores, incluindo o nível de desagregação espacial e setorial, e o tratamento da dinâmica tecnológica (item 2.3); procedimento de desconto (item 2.4); e procedimento de ponderação para a igualdade (item 2.5).

*

Um IAM é um modelo econômico que endogeniza uma versão resumida de um modelo biofísico. Tipicamente, trabalha com grandes quantidades de variáveis determinadas simultaneamente período após período em prazos muito longos, simulando computacionalmente a realidade e permitindo que se tracem cenários probabilísticos relativos aos valores futuros das variáveis em questão.

TABELA 2 – principais *Integrated Assessment Models* em economia das mudanças climáticas.

Nome	Autor(es)	Tipo
DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy model)	William Nordhaus	Otimização; determinístico; tecnologia exógena; <i>top-down</i> ; espacialmente agregado
E3MG (Energy-Environment-Economy Model at the Global level)	Terry Barker, Tyndal Centre for Climate Change Research (Reino Unido)	Simulação; determinístico; tecnologia endógena; <i>bottom-up</i> ; espacialmente desagregado
ENTICE-BR	David Popp	Otimização; determinístico; tecnologia endógena; <i>top-down</i> ; espacialmente agregado
FEEM-RICE	Carlo Carraro, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM, Itália)	Otimização; determinístico; tecnologia endógena; <i>top-down</i> ; espacialmente desagregado
FUND (climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution)	Richard Tol	Otimização; determinístico; tecnologia exógena; <i>top-down</i> ; espacialmente desagregado
IMACLIM-R	Olivier Sassi, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED, França)	Equilíbrio geral; determinístico; tecnologia endógena; <i>bottom-up</i> ; espacialmente desagregado
MIND (Model of Investment and technological Development)	Ottmar Edenhofer, Potsdam Institute for Climate Change Research (Alemanha)	Otimização; determinístico; tecnologia endógena; <i>top-down</i> ; espacialmente agregado
MiniCAM (Mini Climate Change Assessment Model)	Universidade de Maryland (EUA)	Equilíbrio parcial; determinístico; tecnologia endógena; <i>bottom-up</i> ; espacialmente desagregado
PAGE (Policy Analysis of Greenhouse Effect)	Chris Hope e Erica Plambeck	Simulação; probabilístico; tecnologia exógena; <i>top-down</i> ; espacialmente desagregado
RICE (Regional Integrated Climate-Economy Model)	William Nordhaus	Otimização; determinístico; tecnologia exógena; <i>top-down</i> ; espacialmente desagregado

As funções que os compõem, responsáveis por fornecer ao computador a maneira como as diversas variáveis se relacionam, se baseiam em pressupostos teóricos, tanto das ciências naturais como da economia, que podem ser mais ou menos corretos. A interação dinâmica entre essas funções, quando aplicada a valores iniciais de cada uma das variá-

veis, permite que se *rode* o modelo e que se simule um estado futuro em determinado instante do tempo. Os erros contidos nas representações funcionais também interagem horizontal (num dado período) e verticalmente (ao longo do tempo), fazendo com que a incerteza se multiplique pelo modelo.

Os IAMs surgiram em meados da década de 1980 em decorrência da necessidade de uma interface dinâmica entre ciência e políticas públicas para o tratamento de complexas questões ambientais, e tiveram seu desenvolvimento potencializado pela tecnologia computacional.

A primeira versão foi o RAINS (*Regional Acidification Information and Simulation*), que era voltado à análise dos efeitos da chuva ácida sobre a economia e de possíveis políticas de controle do problema. Logo em seguida (1986) surgiu o IMAGE (*Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect*), desenhado especificamente para a análise do efeito estufa, e largamente utilizado pelo IPCC (Anexo 2). A Tabela 2 apresenta uma lista dos principais modelos contemporâneos.

A coluna “tipo” da Tabela 2 deixa claro que há substanciais diferenças entre os IAMs. Devido à centralidades dessas peculiaridades para o nosso objeto de estudo, recorremos à descrição detalhada das principais características desses modelos, bem como de suas origens na teoria econômica, e das implicações de cada uma para o estudo das mudanças climáticas. São expostos, com a máxima imparcialidade possível, os quatro itens mencionados acima. A análise crítica é feita no Capítulo 5.

2.1 OBJETIVO DO MODELO

A primeira distinção importante é quanto ao objetivo do modelo econômico-climático, que pode ser a *descrição* ou a *prescrição*, ou, para usar o jargão, a *avaliação* ou a *otimização*. Enquanto os primeiros presumem um determinado conjunto de políticas e avaliam os seus resultados, os últimos fixam o objetivo de maximização de alguma variável (geralmente a utilidade) e derivam a política “ótima”²⁰.

²⁰ A otimalidade é sempre condicional a uma regra de decisão imposta a priori pelo julgamento do analista.

2.1.1 Otimização de políticas públicas

Os modelos de otimização são o resultado de meio Século de desenvolvimentos da economia neoclássica²¹. Derivam do encontro de seis linhas de pesquisa: a teoria do equilíbrio geral (Walras, Arrow, Debreu) e a economia do bem-estar (Pareto, Kaldor) compõem o pilar principal; a teoria das externalidades e da poluição ótima (Pigou) dá o embasamento microeconômico; a teoria do crescimento econômico (Ramsey, Cass, Koopmans, Solow) fornece a fundamentação macro; a teoria da utilidade esperada (Bernulli, Von Neumann, Morgestern) é o paradigma de tratamento da incerteza; e a análise de custo-benefício é o instrumento de decisão. Nenhum aporte substancial foi recebido das ciências naturais por esses modelos.

O responsável pela adaptação do instrumental econômico *convencional*²² ao estudo das mudanças climáticas foi William Nordhaus, que depois de aportar à teoria do crescimento econômico (final dos anos 1960), passou definitivamente para o lado aplicado da economia, desenvolvendo modelos primeiro para o estudo do setor energético, no bojo das crises do petróleo, e depois para o estudo das possíveis consequências do aquecimento global (Apêndices 1 e 2).

No caso dos modelos macroeconômicos convencionais, a regra é a maximização de uma função “objetiva” que transforma consumo em bem-estar. O procedimento adotado pressupõe a inexistência de assimetrias de informação, a internalização de todas as externalidades, a existência de mercados competitivos, a racionalidade perfeita de parte dos agentes, entre outros fatores.

²¹ Aqui entendida, seguindo Dequech (2007), como aquela que atende a três requisitos: (i) maximização de utilidade como critério de racionalidade; (ii) ênfase em equilíbrio(s); (iii) negligência de tipos severos de incerteza (incerteza forte).

²² Parte consensual do *mainstream* que mais se parece com a ortodoxia (corrente dominante no período anterior. No caso, a neoclássica), e que está consolidada nos livros-texto.

Mainstream: onde trabalha a maior parte dos economistas. Inclui a ortodoxia, pois parcela considerável da profissão continua a aplicar teorias e modelos neoclássicos, mas também contempla correntes mais recentes de grande aceitação (teoria dos jogos, economia comportamental, neuroeconomia, econo-física, economia experimental, nova economia institucional, e cliometria). As idéias do *mainstream* estão presentes nas Universidades mais prestigiosas, nas revistas mais importantes, e recebem a maior parte do financiamento. Os livros-texto incorporam algumas idéias do *mainstream* não ortodoxo, mas não todas (Colander, Holt & Rosser, 2004).

Equilíbrio geral e economia do bem-estar

A teoria do equilíbrio geral, desenvolvida inicialmente por Walras e elaborada matematicamente por Arrow & Debreu (1954), foi a base dos dois *teoremas fundamentais da economia do bem-estar*, as pedras fundamentais do pensamento neoclássico e, ainda hoje, os alicerces do instrumental econômico convencional.

O primeiro teorema afirma que, na ausência de externalidades²³, e sob uma série de outros pressupostos, todo equilíbrio competitivo de mercado é Pareto-eficiente – a alocação ótima no sentido de Pareto é aquela que melhora a situação de pelo menos um indivíduo sem piorar a situação de nenhum outro. Como o equilíbrio geral, ou perfeitamente competitivo, deriva do comportamento racional auto-interessado, esse tipo de comportamento levaria a uma situação ótima do ponto de vista da eficiência econômica. Admitindo-se que a eficiência de Pareto é o (único) objetivo da escolha pública, o teorema confirma, de maneira “objetiva”, a idéia bastante vaga de Adam Smith de que a mão invisível do mercado leva ao estado social ótimo.

O segundo teorema vai mais longe, e afirma que, na ausência de economias de escala, e sob algumas restrições adicionais, toda alocação Pareto-eficiente é um equilíbrio competitivo. Mais precisamente, o raciocínio do primeiro teorema diz que A (auto-interesse) leva a B (equilíbrio competitivo), e B leva a C (ótimo de Pareto); como C é o que se busca (premissa normativa do raciocínio neoclássico), A deve ser maximizado. Já o segundo teorema afirma que sempre que houver C haverá B, ou, o que dá no mesmo, não existe C sem B.

A partir desse modelo hipotético-dedutivo surgiram as duas facetas da visão pré-analítica da economia convencional: (i) a de que a eficiência de Pareto é o melhor estado possível, e portanto objetivo máximo da economia; e (ii) a de que o livre-mercado é mecanismo necessário e suficiente para a maximização do bem-estar da sociedade. “As propo-

²³ Consequências de uma transação econômica que não são incorporados pelo agente que realizou a ação. Por exemplo, a valorização das casas próximas a um shopping center não é incorporada pelo proprietário do shopping. Essa é uma externalidade positiva, pois envolve um benefício a terceiros. Uma externalidade negativa envolve custos a terceiros, como o aumento do tráfego de veículos na vizinhança do shopping.

sições típicas da moderna economia do bem-estar dependem de combinar comportamento auto-interessado, de um lado, e julgar a realização social segundo algum critério fundamentado na utilidade, de outro” (SEN, 2005: 46).

No entanto, a suposição da ausência de externalidades, negativas ou positivas, é absurda. As inter-relações são uma propriedade da dinâmica social, socioeconômico e socioambiental. Ao mesmo tempo, é quase impossível pensar em políticas públicas que não inflijam perdas a alguém, de modo que o critério da eficiência de Pareto é inútil.

A solução para este último problema é dada pelo critério de Kaldor-Hicks, de *compensação potencial*, segundo o qual a alocação será desejável se houver a *possibilidade* de os perdedores serem mais do que compensados financeiramente pelos ganhadores (e, nesse sentido, inexistirem perdedores uma vez feita a compensação), independente de quem são os perdedores e os ganhadores, e mesmo que a compensação não seja de fato realizada. Já a solução para o problema das externalidades foi dada pelo teorema de Coase (1960), segundo o qual todas as externalidades podem ser internalizadas no mecanismo de preços, bastando que haja direitos de propriedade privados e exclusivos bem definidos, e custos de transação muito baixos.

Teoria das externalidades e da poluição ótima

No caso da economia ambiental, entretanto, os objetos de estudo geralmente são bens não excluíveis e não rivais, que não têm alocação eficiente no mercado devido à impossibilidade de distribuição de direitos de propriedade. A tragédia dos comuns acontece quando bens são rivais mas não excluíveis (regimes de acesso aberto), de modo que há escassez relativa, portanto competição, mas nenhum direito de propriedade, o que faz com que o benefício marginal individual da utilização seja maior do que o custo marginal individual, até o ponto de depleção do recurso.

Sem *enforcement* para o não uso, vale a regra de maximização da utilidade individual. Nesses casos, o mecanismo de mercado não é capaz de regular o auto-interesse de modo a levar ao ponto ótimo de exploração. Já as mudanças climáticas resultam de um bem

público global, a atmosfera, cujos benefícios estão indivisivelmente espalhados pelo globo e tal que os benefícios usados por um indivíduo não se subtraem de outro indivíduo. Para esses casos, vale a teoria da poluição ótima de Pigou (1920).

Por exemplo, é consensual entre economistas a urgência da adoção de mecanismos de mercado para o controle das emissões de GHG, tendendo os mais convencionais a favorecer um imposto (ARROW *et. al.*, 1997), e os mais heterodoxos a preferir cotas transacionáveis (ACKERMAN *et. al.*, 2007). O fato de que os emissores, na maior parte do mundo, não pagam pelos danos que causam (o custo privado das emissões é zero) gera incentivos para o uso de tecnologias intensivas em carbono.

Os atuais estoques de GHG na atmosfera fazem com que haja um custo social marginal do carbono positivo, alto e que cresce rapidamente, o qual, no entanto, é dividido igualmente pela sociedade como um todo. Se os custos fossem imputados aos emissores, poderia acabar sendo eficiente para eles migrar para soluções de baixo consumo de carbono, a depender dos custos dessas alternativas (custos de mitigação). Mas se o custo de mitigação for mais elevado do que o custo social da emissão, os emissores preferirão emitir.

O cálculo da poluição ótima que deriva do trabalho de Pigou é aquele que iguala os custos marginais da mitigação ao custo social do carbono. Até esse ponto, seria economicamente eficiente investir em mitigação, mas não acima dele.

A precificação das externalidades não precisa recorrer ao critério da eficiência marginal, até porque, como mostraram McNeil & Williams (2007), é praticamente impossível estimar uma curva de custo marginal do carbono à la Pigou com níveis aceitáveis de confiança. A Figura 3 representa um esquema hipotético de precificação do carbono (no setor petróleo) que não depende de otimização marginal: requer apenas que o custo social do carbono seja mais elevado do que o custo privado.

Os preços atuais do petróleo não incluem custos relativos aos impactos causados pelas emissões de carbono, logo o custo privado do carbono é zero. Somando-se o custo social, obtém-se o preço do petróleo que internaliza as consequências ambientais e sociais do efeito estufa.

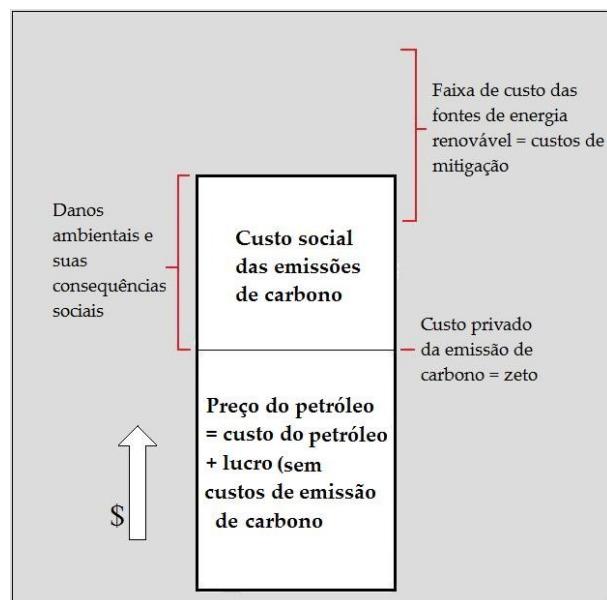


FIGURA 3 – representação hipotética dos custos privados do carbono, custo social e custo de mitigação para o setor petróleo.

Ao optar pelo uso de uma determinada fonte de energia, os consumidores irão comparar o preço final do petróleo com o da energia renovável mais barata disponível. Inicialmente alguns consumidores migrarão para outras fontes, mas muitos continuarão a usar o petróleo. À medida que mais carbono for emitido e o custo social marginal continuar crescendo, o preço do petróleo aumentará junto com o preço do carbono.

Ao mesmo tempo, as energias renováveis ganharão escala e aperfeiçoarão a tecnologia, de forma que o custo de mitigação decrescerá. Espera-se, portanto, que com a internalização da externalidade ao sistema de preços, a economia transite para fontes de energia de baixo carbono, passando a utilizar o petróleo apenas em situações muito específicas (VALE, 2008).

Assim, a visão pré-analítica da economia convencional pode continuar válida, bastando que (i) se distribuam direitos de propriedade, ou se corrijam as externalidades; e (ii) haja a possibilidade de compensação dos perdedores.

Teoria do crescimento econômico

A partir disso surgiram os modelos neoclássicos de crescimento econômico, inicialmente o mais simples modelo de Solow, e em seguida o modelo de Ramsey-Cass-Koopmans (RCK), que é um modelo de otimização intertemporal de consumo (BARRO & SALAI-MARTIN, 1999).

A aplicação do equilíbrio geral ao estudo das mudanças climáticas se dá tanto pelos modelos de RCK (que, convencionalmente, possuem uma única *commodity* e um único agente) quanto por modelos de equilíbrio geral computável (que podem incluir diversas *commodities* e diversos mercados, mas apenas um agente representativo). A linha desenvolvida por Nordhaus é a da aplicação de modelos de RCK (ver descrição detalhada do modelo original no Apêndice 1), na busca de se determinarem as trajetórias de consumo, de investimento e de poupança que maximizam o bem-estar, calculado por meio de uma função objetiva que desconta e agrega a utilidade do consumo de cada período.

Os modelos de equilíbrio geral, de ambos os tipos, têm formulações matemáticas bastante restritivas, pois devem igualar demanda a oferta em todos os mercados no fim de cada período. Com isso, ficam sujeitos a uma série de premissas altamente questionáveis para que exista uma solução de equilíbrio estável (ACKERMAN & NADAL, 2004).

A premissa fundamental é a da racionalidade substantiva ou perfeita (expectativas racionais; informação simetricamente distribuída e totalmente acessível; capacidade infinita de processamento de dados; ausência de viés cognitivo; em síntese, *Homo Economicus*). Isso significa que consumidores maximizam a sua satisfação e que empresas maximizam o lucro, adotando sempre as melhores estratégias. É como se o mercado fosse um grande leilão, em que o leiloeiro informa compradores e vendedores das ofertas possíveis, até que se chegue a uma alocação perfeita.

Os modelos prescritivos, ou de otimização, pretendem determinar a trajetória de consumo e investimento mais adequada, do ponto de vista do bem-estar, segundo um julgamento particular de o que é bom (a eficiência de Pareto) e o que é ruim.

*Análise de custo-benefício*²⁴

Utilizada na avaliação de projetos desde 1808, quando o *Gallatin report* recomendou ao Senado estadunidense que construísse uma série de canais desde Massachusetts até as Carolinas ao longo da costa Atlântica, a análise de custo-benefício é um dos métodos empregados pelos economistas para contrapor as vantagens que se esperam obter de um projeto aos sacrifícios que se deverá fazer para implementá-lo.

Por exemplo, a decisão de derrubar ou não uma porção de mata nativa dependeria da relação entre os custos estimados da iniciativa (mão-de-obra, combustível, tratores, obtenção da licença, perda de biodiversidade, alteração do microclima, etc) e os seus benefícios (receitas obtidas com a venda da madeira, aluguel da terra agriculturável, etc), ambos calculados para um período de tempo economicamente razoável para que haja o *payoff* do investimento, e trazidos a valor presente por meio do procedimento de desconto.

Os passos essenciais para se conduzir uma análise de custo-benefício são:

- (1) Definição do projeto – determinação dos limites geográficos, espaciais, econômicos e temporais.
- (2) Identificação dos impactos – enumeração das possíveis consequências, positivas e negativas, do projeto.
- (3) Que impactos são economicamente relevantes? – serão considerados na análise aqueles que deixarem pelo menos uma pessoa mais ou menos feliz, e / ou que mudarem a quantidade ou a qualidade da oferta de algum bem ou recurso com valor positivo.
- (4) Quantificação física dos impactos – determinação da quantidade de mão de obra, combustível e tratores que seriam necessários, do número de espécies que seriam afetadas pela perda da floresta, da variação esperada do microclima, da quantidade de madeira que se poderia vender, entre outros possíveis impactos. No caso da existência de incerteza, empregam-se probabilidades: há 20% de chance de uma queda de 30% da pluviosidade, 50% de chance de uma queda de 10%, e 20% de probabilidade de a pluviosidade permanecer inalterada ($(0,2 \times -0,3) + (0,5 \times -0,1) + (0,2 \times 0) = -0,11$, ou uma queda esperada de 11%).

²⁴ Tópico baseado em Hanley & Spash (1993).

(5) Valoração monetária dos impactos – as quantidades determinadas no item (4) devem ser convertidas a uma unidade comum, que nas avaliações de custo-benefício é o dinheiro. Este procedimento é às vezes visto com desconfiança, por pretender converter qualquer coisa (inclusive a vida humana) em unidades monetárias. Mas essa é uma atitude de simples conveniência, já que a escassez relativa de diferentes bens e recursos pode ser comparada por meio dos preços relativos. Assim, o cálculo feito por Costanza *et. al.* (1997) de que o valor (o preço, mais precisamente) de todos os ecossistemas terrestres era de 33 trilhões de dólares por ano, ou quase duas vezes o PIB mundial de 1997, não implica em que se alguém pagasse essa quantia poderia comprar o planeta e destruí-lo por completo, mas que os benefícios do capital natural de que dispomos são duas vezes maiores do que toda a agregação de valor (na verdade, de preço) da economia mundial.

(6) Desconto dos fluxos de custos e benefícios – uma vez que todos os custos e benefícios relevantes tenham sido expressos em termos monetários (já descontada a inflação), eles devem ser trazidos a valor presente por meio de uma taxa de desconto:

$$VP(X) = \frac{X}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Onde: VP = valor presente; X = valor futuro; t = data; r = taxa de desconto.

(7) Aplicação do teste de valor presente – projetos eficientes em termos alocativos são aqueles que têm valor presente líquido maior do que zero. Assim, a condição para a aprovação de um projeto é:

$$VPL = \left[\sum \frac{B(t)}{(1+r)^t} - \sum \frac{C(t)}{(1+r)^t} \right] > 0 \quad (2)$$

Onde: VPL = valor presente líquido; $B(t)$ = benefício total; $C(t)$ = custo total.

(8) Teste de sensibilidade – devido à incerteza das estimativas, é importante que se verifique a sensibilidade dos resultados a mudanças nas variáveis e nos parâmetros. Por exemplo, o que acontece com o valor presente líquido se mudar a taxa de desconto? E se aumentar algum dos custos de produção? Se variar a quantidade esperada de árvores a serem retiradas da mata? O objetivo é descobrir a que parâmetros ou variáveis os resultados são mais sensíveis, e em que situações o projeto se torna inviável. Com isso, é possível avaliar melhor os riscos envolvidos, e melhorar as estimativas de variáveis às quais o resultado é altamente sensível.

Como se nota, uma série de incertezas e imprecisões podem afetar as avaliações de custo-benefício, e dependendo dos horizontes temporal e espacial do projeto, é possível que elas tornem os resultados altamente improváveis.

As principais dificuldades e controvérsias estão ligadas aos seguintes temas:

- a) a valoração de bens que não têm mercado, como a biodiversidade ou o micro-clima, depende, com frequência, de técnicas pouco objetivas.
- b) A complexidade ecossistêmica faz com que as previsões de modelos como esse sejam pouco acuradas.
- c) O procedimento de desconto é controverso, e tem sérias limitações quando se trata de projetos ligados ao meio ambiente.
- d) A análise de custo-benefício pode ser vítima de captura institucional, de modo que os resultados podem acabar refletindo decisões tomadas previamente, e não métodos objetivos de decisão.
- e) Há um componente de incerteza irreduzível que não pode ser levado em conta nesse instrumento.
- f) O critério de decisão de Hicks-Kaldor desconsidera a distribuição de renda, que pode até piorar depois do projeto. Dada uma dotação inicial de recursos, qualquer alocação eficiente do ponto de vista do critério de compensação potencial é avaliada positivamente quando se usa $VPL > 0$.

Ao tentar agregar em um modelo matemático todas as partes do processo decisório, os adeptos da análise de custo-benefício procuram se isentar do julgamento de valor,

incumbindo a ferramenta de tomar a decisão. Acreditam que descrevendo fielmente o comportamento dos agentes em suas decisões alocativas (independente do irrealismo com que modelam a sua racionalidade e o seu acesso à informação), estarão fazendo uma análise “positiva”, isenta ou quase isenta de vieses partidários.

Essa economia, que Sen (2005) chamou de “logística”, não abre mão dos critérios da objetividade, elegância, precisão, e isenção valorativa. Para esse autor, a busca ortodoxa dessas características acaba restringindo a análise a um critério de decisão, o de Pareto, que além de fantasioso, é anti-ético.

A transposição de instrumentos desenhados para avaliar projetos privados de pequena escala (relativamente a políticas públicas como a de mitigação das mudanças climáticas) ao estudo da sustentabilidade é, em suma, problemática. A convencional teoria do crescimento ótimo já é reducionista quando trata do sistema econômico, quanto mais para analisar um fenômeno que envolve elevadas doses de incerteza.

Teoria da utilidade esperada

Na presença de risco, a teoria da decisão convencional enuncia que se deve optar pela estratégia que maximiza a esperança matemática da utilidade dos resultados esperados. Assim, por exemplo, o cálculo do item (4), em que se estimou uma queda de 11% da pluviosidade, foi feito por meio do método da esperança matemática, que exige o conhecimento dos cenários possíveis e de suas probabilidades, mas que desconsidera a utilidade gerada por cada um dos cenários hipotéticos.

O método da utilidade esperada calcularia primeiro a (des)utilidade de cada possível resultado (uma queda de 30% da pluviosidade poderia, por exemplo, reduzir a utilidade de uma comunidade em 60%, 70%, ou até 100%, devido à inviabilização da produção agrícola), para só então multiplicá-la por sua probabilidade. Com isso, os modelos de otimização sob incerteza (fraca) podem incorporar probabilidades.

John Von Neumann & Oskar Morgenstern (1944) foram os responsáveis pela formalização da teoria da utilidade esperada. Reunindo *insights* de teoria dos jogos (que nasce

com o trabalho deles), do marginalismo (neoclássico), e da teoria da escolha, eles colocaram o tijolo que faltava para que a construção dos modelos de otimização pudesse abrigar a escolha pública. Foi a partir dos desenvolvimentos do seu trabalho que a análise de custo-benefício, um ramo da economia que tradicionalmente é empregado mais por homens de negócios do que por acadêmicos, se fundiu com a teoria do crescimento ótimo.

Os modelos que resultam dessa fascinante construção da ciência econômica, todavia, possuem sérias deficiências para o tratamento da incerteza forte, no sentido de Knight (quando não se podem atribuir probabilidades aos fenômenos em questão). É por isso que os analistas têm se tornado crescentemente céticos em relação à validade dos exercícios de otimização. Além do mais, as conclusões desses modelos vão consistentemente contra as recomendações dos cientistas naturais, que quase consensualmente julgam aumentos de temperatura superiores a 2 °C (em relação aos níveis pré-industriais) como desproporcionalmente perigosos. Robert Mendelsohn (2009), por exemplo, que se apóia em modelos de otimização, afirma que:

“[i]n fact, the mitigation plans of many alarmists would pose a serious risk to economic growth. The marginal cost function of mitigation is very steep, especially in the short run (...) The biggest threat climate change poses to economic growth, however, is not from climate damages or efficient mitigation policies, but rather from immediate, aggressive, and inefficient mitigation policies. Immediate aggressive mitigation policies could lead to mitigation costs equal to \$28 trillion (Stern, 2007). This is 14 times higher than the mitigation costs of an optimal policy” (ibidem: 8; 14, sublinhado nosso).

Segundo Mendelsohn, o maior problema é a possibilidade de políticas excessivamente fortes, e não a dificuldade de se produzirem políticas fortes o suficiente, como avaliam o relatório Stern, uma série de outros economistas e a grande maioria dos analistas de outras áreas. A posição de William Nordhaus, como se verá, é idêntica à de Mendelsohn.

2.1.2 Avaliação de políticas públicas

O exercício de avaliação pode ser feito a partir de um modelo de otimização sem a necessidade de adaptações. Por exemplo, Nordhaus (2008) emprega o DICE tanto para prescrever a política ótima de mitigação, que é a rampa apresentada na Figura 1, quanto para descrever os resultados da implementação das políticas recomendadas por Stern. Já os modelos de simulação não estão habilitados a maximizar uma função de bem-estar. Eles apenas dizem o que acontece no decorrer do tempo se as equações colocadas nele forem aplicadas às condições iniciais da economia.

Diz-se ao modelo que a economia funciona de uma determinada maneira, que existem impostos, que existem externalidades, e, caso se queira, que os agentes econômicos aprendem de acordo com um conjunto definido de regras, e ele descreve a trajetória resultante. Não é possível que o modelo aponte as estratégias de mitigação e de adaptação mais adequadas, pois para rodá-lo é necessário introduzir uma estratégia. O que se pode fazer é rodar o modelo muitas vezes, com estratégias distintas, e comparar os resultados de acordo com alguma regra de decisão.

Os modelos especificamente de avaliação derivam da teoria dos sistemas, e têm formulações matemáticas bem mais flexíveis do que as de RCK. Chamados genericamente de *modelos de simulação*, são desenhados especificamente para exercícios descritivos.

Modelos de simulação

Talvez o modelo descritivo mais conhecido seja o *World3 model*, do livro *The limits to growth* (MEADOWS *et. al.*, 1972), que inaugurou um acirrado debate entre economistas e outros cientistas sobre a (in)adequação do uso de técnicas outras que modelos de otimização do tipo RCK para o estudo das implicações do crescimento econômico sobre o bem-estar (COMMON & STAGL, 2005; NORDHAUS, 1973a). O que interessa aqui, todavia, é a vasta literatura que surgiu na área de modelos de simulação dinâmicos, principalmente na economia evolucionária. O fator comum a eles é a premissa fundamental de que

estão lidando com sistemas não lineares, o que difere da idéia do equilíbrio geral nos modelos de otimização (BEINHOCKER, 2006).

Outra importante premissa que quase sempre está presente nos modelos de simulação é a da racionalidade procedimental, que se distingue da racionalidade substantiva porque se dá em ambiente de informação e capacidade computacional limitadas, e porque é processual, dependente do contexto. O agente segue regras práticas e simplificadas de comportamento (convenções, hábitos), adaptando-se às mudanças do ambiente de acordo com a sua capacidade cognitiva limitada. Busca soluções boas, não soluções ótimas. Trata-se, em síntese, do *Homo Sapiens*. A idéia decorre dos trabalhos de Herbert Simon, Daniel Kahneman e Amos Tversky em economia comportamental (BEINHOCKER, 2006).

No lugar de soluções matemáticas bem definidas e genéricas, deduzidas a partir de axiomas relativos ao comportamento humano, ao funcionamento do mercado e das instituições, entre outros fatores, os modelos de simulação adotam hipóteses *ad hoc* sobre as formas funcionais do modelo, que são específicas ao contexto que está sendo estudado e devem ser validadas empiricamente²⁵.

Parte delas, é claro, pode derivar de conhecimento científico preexistente, e nesse sentido, estar previamente validada. É o caso das equações físico-climáticas empregadas nos modelos econômico-climáticos, quase sempre reproduzidas dos relatórios do IPCC. Mas no caso da economia, as relações funcionais que já atingiram consenso suficiente para poderem ser chamadas de *benchmark* são tão infalíveis quanto escassas. Por isso, o exercício da modelagem de sistemas deve lidar com o inevitável *trade-off* entre a demanda por um enfoque generalista (alta simplicidade, baixa acurácia) e a acurácia descritiva requerida por fenômenos complexos (número de linhas do código de programação) (JANSSEN & OSTROM, 2006).

Além do mais, a capacidade computacional e informacional (bases de dados) de que se dispõe hoje permite que o pesquisador teste hipóteses que há cinquenta anos só teri-

²⁵ Por exemplo, Nordhaus e Yohe (1983) validaram o modelo rodando-o para trás e calculando o erro das estimativas frente aos dados reais. Daí compararam esse erro a uma média de erros de modelos estatísticos dinâmicos *benchmark*, e concluíram que o erro do seu modelo estava dentro do padrão convencional.

am chance de legitimação se passassem no teste da lógica (matemática), pois o teste empírico era de execução muito complicada. Com isso, não é mais necessário partir de teoremas do comportamento humano, social e econômico já cristalizados na ciência normal, pois essas relações funcionais podem ser testadas por meio de um modelo de simulação.

É por isso que estes modelos, apesar de estarem ainda na infância do processo de desenvolvimento científico, têm atraído a atenção de pesquisadores das mais diversas áreas²⁶. Principalmente os chamados *modelos baseados em agentes*, também chamados de simulações multiagentes²⁷.

Os resultados são a possibilidade de aprendizado individual e institucional aliada a mudanças freqüentes nos parâmetros tecnológicos e expectacionais dos agentes (não linearidades), sem produzir convergência a equilíbrio nas trajetórias, mas com a possibilidade de auto-organização. As variáveis de ordens mais elevadas (*e.g.*: preços de *commodities*, população, dinâmica populacional, etc) não são especificadas da maneira como se faz nos convencionais modelos agregados, mas *emergem* da dinâmica do modelo de simulação. A otimização acontece localmente, em vez de globalmente.

Os pontos negativos de modelos de simulação são a dificuldade de estabilizar os resultados e o problema da caixa preta. A questão da estabilização decorre da própria lógica da teoria dos sistemas, de interações não lineares. Quanto mais interações, e quanto mais complexas, maior a probabilidade de que os resultados sejam caóticos, instáveis ou não convergentes. Já o problema da caixa preta faz referência tanto à dificuldade de se entender o que se passa no modelo, devido ao fato de geralmente ser bastante grande, quanto à quase impossibilidade de se validarem todas as relações funcionais e de se obterem empiricamente os parâmetros necessários.

Duas decisões importantes precisam ser tomadas para a construção de um desses modelos: a especificação das diversas formas funcionais (aprendizado, interação, *feed-*

²⁶ Pyka & Fagiolo (2005) reportam que Kenneth Arrow, em discurso na conferência internacional sobre sistemas complexos, organizada em 2000 pelo New England Complex Systems Institute, teria dito que “until the 1980s the ‘sea of truth’ in economics laid in simplicity, whereas since then it has become recognised that ‘the sea of truth lies in complexity’”.

²⁷ Beinhocker (2006) descreve uma série de modelos desse tipo, e mostra como em muitos casos são capazes de reproduzir o comportamento da economia de maneira muito mais acurada.

backs, decisões econômicas), e grau de complexidade (ou, inversamente, de simplicidade). Em seguida, determinam-se valores para os parâmetros, geralmente a partir da literatura especializada, outras vezes por meio da coleta de evidência empírica, e em último caso, pelo chute do autor. Feito isso, prossegue-se com a verificação, para eliminar os *bugs*, a validação empírica, e testes de sensibilidade, para se ter idéia do impacto das principais variáveis sobre os resultados.

Análise de custo-eficiência

Ackerman *et. al.* (2008) argumentam que os exercícios de custo-benefício são inviáveis em problemas de escala global e de horizonte temporal infinito, e por isso defendem o uso de cálculos de custo-eficiência. A diferença entre um exercício de custo-benefício e um de custo-eficiência é que o primeiro determina a meta que minimiza custos menos benefícios, enquanto o segundo determina a estratégia que minimiza custos para uma meta preestabelecida, que é determinada exogenamente, por outros critérios.

O cálculo de custo-eficiência não se preocupa em calcular benefícios, e com isso tem um prazo muito menor, já que os custos tipicamente estão concentrados no médio prazo (50 anos, digamos). Evitam grande parte do problema de desconto, e principalmente, da valoração de danos, pois o único que se deve calcular são os custos de mitigação²⁸. Um exercício de custo-eficiência tem como principal componente a dinâmica tecnológica.

Apesar de serem uma promissora alternativa aos modelos de otimização, os modelos de simulação têm sido pouco aplicados ao estudo da economia do clima, provavelmente devido aos ganhos de escala que se tem ao trabalhar com ferramentas amplamente desenvolvidas como são os modelos convencionais. O relatório Stern é uma exceção, pois adotou o PAGE-2002, um modelo de simulação. Isso será discutido no Capítulo 3.

²⁸ “Trying to forecast costs and benefits of climate change scenarios a hundred years or so from now is more the art of inspired guesstimating by analogy than a science (imagine forecasting today's world a century ago)” (WEITZMAN, 2007: 16).

2.2 INCERTEZA

A incerteza pode se aplicar ao passado (história), presente (explicação) e futuro (previsão), e refere-se à existência de múltiplos possíveis estados de um determinado objeto. No caso das mudanças climáticas, há incerteza quanto ao ciclo do carbono (quanto será absorvido por cada sumidouro?), às reações do clima (quanto aumentará a temperatura para uma dada concentração?), aos impactos geofísicos, ecológicos e biológicos, aos impactos econômicos, ao potencial de adaptação, à dinâmica tecnológica, ao longuíssimo prazo, à desagregação espacial, ao problema da coordenação internacional, entre outros fatores.

Para discutir a maneira como os modelos tratam o tema é necessário, antes, distinguir os diferentes tipos possíveis de incerteza. Na verdade, ao usar o termo desacompanhado de um adjetivo (forte, fraca, substantiva, procedimental, fundamental) incorre-se em desnecessária confusão, pois a incerteza pode assumir variadas formas, e cada modelo ou teoria tende a se concentrar em um subgrupo delas. Disso decorre um evidente dissenso entre os economistas, que, em parte, está na raiz das recomendações de políticas dos diferentes modelos econômico-climáticos.

O clássico da economia da incerteza é Frank Knight:

“[u]ncertainty must be taken in a sense radically distinct from the familiar notion of risk, from which it has never been properly separated. The term 'risk', as loosely used in everyday speech and in economic discussion, really covers two things which, functionally at least, in their causal relations to the phenomena of functional organization, are categorically different (...) The essential fact is that 'risk' means in some cases a quantity susceptible of measurement (...) We shall accordingly restrict the term 'uncertainty' to the cases of the non-quantitative type” (KNIGHT, 1921: 19 – 20).

Knight chamou de incerteza aquela parte que não pode ser quantificada, e de risco a que pode ser. Ainda hoje é essa a classificação mais elucidativa, mas será útil, nesta

seção, discutir duas classificações mais depuradas. Seguindo Dequech (2009), aquilo que Knight chamou apenas de incerteza será denominado *incerteza forte*, e o que ele chamou de risco será incluído na categoria *incerteza fraca*. A primeira se verifica quando está ausente uma distribuição de probabilidades única (só ela é admissível, e é contínua), aditiva (totaliza 100%) e confiável (na perspectiva do tomar de decisão).

A incerteza fraca é o oposto, e pode ser do tipo risco, quando se trata de probabilidades objetivas (inferidas por meio da observação de frequências, ou do raciocínio lógico, no caso de um dado não viesado, por exemplo), ou do tipo subjetiva ou de Savage, em que a distribuição de probabilidades decorre do julgamento de um indivíduo.

Clive Spash (2002, 2007) apresenta a classificação mais adequada para o estudo das mudanças climáticas. Para ele, a incerteza forte tem dois componentes: o da *indeterminação* (também chamada de ambiguidade), em que se desconhecem as distribuições de probabilidade de um fenômeno conhecido, já que alguns sistemas socioambientais exibem comportamento imprevisível (devido à complexidade, à intencionalidade, e à contínua criação de novidade); e o da *ignorância* (também chamada de incerteza fundamental ou epistemológica), em que se desconhecem as próprias variáveis ou estados possíveis do objeto de estudo, quanto menos as suas distribuições de probabilidades.

Esses dois tipos de incerteza forte decorrem da premissa de que o mundo não é ergótico ou teleológico. Há, também, a *incerteza procedimental*, que faz referência às limitadas capacidades cognitivas e computacionais dos tomadores de decisão. Ela está frequentemente associada à ignorância, pois quando os *outcomes* são desconhecidos, geralmente também há limitação de capacidade computacional / cognitiva, e vice-versa (DEQUECH, 2009). Por fim, a incerteza irreduzível é aquela parcela da incerteza forte que não pode ser diminuída, de forma que o seu tratamento não pertence ao âmbito da ciência positiva, mas do julgamento, da política, da escolha pública. A Tabela 3 sintetiza o assunto.

A teoria da utilidade esperada tem fundamentação bayesiana, e considera subjetivas todas as probabilidades, decorrentes de *beliefs*. Não haveria, para os subjetivistas, a possibilidade de probabilidades objetivas, pois o tomador de decisão sempre seguiria as seus valores e hábitos para decidir o que é confiável e o que não é. Com isso, seria inócua a

distinção entre risco e incerteza, pois a todas poderiam ser atribuídas probabilidades subjetivas únicas, aditivas e confiáveis. Apenas a ignorância não poderia ser tratada por essa teoria, devido ao desconhecimento dos próprios objetos da incerteza.

TABELA 3 – classificações de incerteza, descrições e exemplos.

Classificação geral	Classificação específica	Descrição	Exemplo
Incerteza fraca (com distribuição de probabilidades)	Risco de Knight	Probabilidades objetivas	Número de mortes nos EUA devido ao aumento de 1 °C da temperatura média
	Probabilidade subjetiva ou de Savage	Probabilidades subjetivas	Sensibilidade climática tem função densidade de probabilidades triangular
	Incerteza procedimental	Deficiência cognitiva ou computacional	Capacidade de processamento dos computadores para rodar modelos econômico-climáticos
Incerteza forte (sem distribuição de probabilidades)	Indeterminação ou ambiguidade	Falta de informação, imprevisibilidade	Formato da função que determina o custo dos danos a partir de um dado aumento de temperatura
	Ignorância, incerteza fundamental ou epistemológica	Desconhecimento dos possíveis estados	Possíveis consequências da acidificação dos oceanos
	Incerteza irreduzível	Ignorância que não pode ser eliminada	Limites de resiliência dos ecossistemas

Na prática, todavia, a solução bayesiana, de evitar o problema, pode não contribuir para a melhoria do processo de tomada de decisão, pois o que se faz é colocar em pé de igualdade todas as probabilidades, objetivas e subjetivas, e rodar o modelo com base nelas. Se a maior parte das probabilidades atribuídas contiver erros elevados, os resultados estarão totalmente equivocados.

Dois tipos de modelos existem quanto ao tratamento da incerteza bayesiana: *estocásticos* (ou probabilísticos) e *determinísticos*. Os modelos estocásticos produzem distribuições probabilísticas dos resultados por meio de simulações de Monte Carlo, tratando ex-

plicitamente a incerteza, enquanto os determinísticos seguem o caminho do *best guess*, incluindo o máximo de informação possível (e, em alguns casos, o mínimo necessário) e adotando o resultado mais provável ou um conjunto de cenários possíveis (TOL, 2006a: 3).

2.2.1 Modelos determinísticos

As considerações sobre probabilidade em modelos determinísticos são feitas de duas maneiras. Quando se trata de parâmetros, aplica-se a esperança matemática; quando se trata de resultados, emprega-se a teoria da utilidade esperada: multiplica-se a utilidade decorrente de cada estado pela sua probabilidade (subjettiva ou objetiva), soma-se tudo e obtém-se um *best guess*.

O modelo gera sempre um único resultado para cada simulação, que seria o estado de coisas no caso em que todas as premissas, equações e parâmetros do modelo estivessem corretamente especificados. Alternativamente, é possível realizar diversas simulações determinísticas, com valores mais pessimistas e mais otimistas para um conjunto de parâmetros, e a partir dos resultados obtidos, definir os limites inferior e superior do espectro de possíveis resultados. Por exemplo, o terceiro relatório do IPCC chega a um cenário chamado de *IPCC low*, que dá um aquecimento de 3,0 °C em 2100, e a outro chamado de *IPCC high*, em que o aquecimento atinge 5,3 °C.

2.2.2 Modelos probabilísticos

O tratamento da incerteza por meio de simulações de Monte Carlo é procedimento padrão em modelos probabilísticos. A idéia é simples: havendo incerteza quanto ao valor de determinado parâmetro (α , por exemplo), roda-se o modelo k vezes adotando-se diferentes valores possíveis. Escolhem-se, para isso, com base na literatura, valores mínimo (m_1) e máximo (m_2) para α , de modo que o computador possa selecionar, dentro desse intervalo ($[m_1, m_2]$), uma amostra aleatória de tamanho k . A seleção amostral está condicionada, além disso, à determinação de uma distribuição de probabilidades (Δ) para o parâmetro α .

Feitas as k simulações, computam-se os valores calculados das variáveis objeto do modelo (T , por exemplo), e estima-se uma distribuição de probabilidades dos resultados.

Vejamos o exemplo do relatório Stern. Sendo α a sensibilidade climática (variação esperada da temperatura média do planeta para um aumento de 100% da concentração atmosféricas de GHG, relativamente aos 280 ppm CO₂e da era pré-industrial), o intervalo escolhido é de]1,5 °C; 5,0 °C[; com base no terceiro relatório do IPCC, α segue uma distribuição triangular (Figura 4); e $k = 32$ ²⁹.

Nesse caso, o algoritmo de Monte Carlo deverá selecionar, aleatoriamente, 32 valores de α dentro do intervalo 1,5 e 5,0, com base numa distribuição de probabilidades triangular³⁰. O modelo então calculará 32 resultados para a variável temperatura de equilíbrio (T), que serão utilizados para a construção da distribuição de probabilidades do aquecimento global. O resultado disso é uma estimativa central de aumento da temperatura, em 2100, com relação à era pré-industrial, de 4,1 °C, com um intervalo de 90% de confiança de 2,6 °C e 6,5 °C (HOPE, 2006: 28; STERN, 2006: 175 – 176).

Nordhaus & Yohe (1983) incorporaram 10 parâmetros incertos no modelo (com horizonte de 125 anos), e obtiveram de especialistas as funções distribuição de probabilidades (subjettivas). Com base na premissa de que os analistas tendem a subestimar a dispersão da incerteza, aumentaram a dispersão de algumas das distribuições em pouco menos do que 50%. Em seguida, as probabilidades foram discretizadas em três valores: alto, médio e baixo, de forma a que a variância e a média da distribuição contínua original (que se presumiu fosse normal) fossem mantidas. A combinação das três possibilidades para cada um dos dez parâmetros dá 59.049 possibilidades (3^{10}). Os autores então tomaram amostras de 100 ou 1000 combinações dentro desse universo para rodar os modelos.

²⁹ Na verdade, o modelo faz mil simulações de Monte Carlo variando 31 parâmetros ao mesmo tempo, ao invés de fazer conjuntos independentes de simulações para cada parâmetro. No entanto, para simplificar este exemplo, estamos dividindo 1000 por 31 e obtendo, aproximadamente, 32.

³⁰ Se m_1 for o valor mínimo, m_2 o máximo e m_3 a moda, a função densidade de probabilidade Δ de α será dada pela expressão:

$$\Delta(\alpha|m_1, m_2, m_3) = \frac{[2(\alpha - m_1)]}{[(m_2 - m_1)(m_3 - m_1)]}, \forall m_1 \leq \alpha \leq m_3; \frac{[2(m_2 - \alpha)]}{[(m_2 - m_1)(m_2 - m_3)]}, \forall m_3 \leq \alpha \leq m_2; 0, \forall m_2 < \alpha < m_1$$

A distribuição triangular é de fácil aplicação, pois exige que se tenha apenas três dados. O seu uso frequente se deve à conveniência da estimação rápida da função densidade de probabilidade.

Esse procedimento, advertiram, produz distribuições de probabilidades (das variáveis resultado) que refletem as características escolhidas para o modelo econômico, o julgamento dos especialistas que determinaram o intervalo de incerteza dos parâmetros, e o julgamento do modelista que aplicou a regra dos 50%. Ao refletir julgamentos, as distribuições não são objetivamente calculadas. Ao mesmo tempo, presume-se que os julgamentos sejam baseados no método científico, não sendo, portanto, puramente subjetivos.

O resultado final foi que a variância das variáveis resultado aumentou substancialmente com o tempo, o que é natural, visto que a incerteza se multiplica pelo modelo e pelo tempo. Por exemplo, o intervalo em 2025 para a concentração de CO₂ foi de 377 a 581 ppm, enquanto em 2100 foi de 465 a 2212 ppm.

Talvez a maior incerteza desse procedimento (que, por sua vez, é uma tentativa de dimensionar a incerteza!) seja relativa à escolha de uma função densidade de probabilidades (fdp). A função triangular, por exemplo, é por excelência de caudas curtas. Mas os fenômenos relacionados às mudanças climáticas são de caudas longas (pelo menos do lado direito da distribuição), dadas as pequenas probabilidades de ocorrência de eventos que são *outliers*, porém potencialmente muito reais (DIETZ, 2009; WEITZMAN, 2007, 2009).

Simon Dietz (2009) utiliza um software (@Risk) que acopla diferentes fdps aos dados para selecionar aquela que minimiza o erro quadrático médio. No caso da sensibilidade climática, explorado no exemplo acima, ele encontrou uma função log-logística (o logaritmo da sensibilidade climática teria uma distribuição logística), como mostra a Figura 4, em que o valor mínimo é de 1,6 °C, a esperança de 3,2 °C e o 99º percentil, 8,2 °C.

Quando esse procedimento foi aplicado tanto à sensibilidade climática quanto ao parâmetro β da função de danos³¹ (mais detalhes no Capítulo 4), a probabilidade de uma catástrofe (definida como custos calculados = 100% do consumo agregado em qualquer ponto do tempo entre os anos 2000 e 2200) aumentou de zero no relatório Stern para 5% no

³¹ São os parâmetros com mais informações disponíveis para a determinação da fdp. A literatura sobre sensibilidade climática é farta, de forma que há estimativas objetivas da distribuição; quanto a β , presumiu-se que tem esperança igual a 2, com base no procedimento padrão da literatura. Mas os outros 29 parâmetros incertos do modelo não dispõem de nenhuma informação que possa levar à inferência da fdp correta, de modo que a atribuição a eles de qualquer distribuição, seja triangular ou não, é absolutamente arbitrária (BAER & SPASH, 2008).

cenário BAU, e de zero para 0,5% no cenário de estabilização das emissões em 550 ppm CO₂e. Além disso, Dietz mostrou que mesmo com a fdp de cauda direita longa, os resultados são altamente sensíveis à taxa de desconto.

Os modelos probabilísticos são uma ferramenta útil para se lidar com o risco e com o componente de indeterminação da incerteza forte. Quando se tem pouco conhecimento em relação aos valores que pode assumir um parâmetro conhecido, adota-se um intervalo aberto com piso e teto determinados pelo melhor conhecimento disponível, e observam-se os resultados se essa for a escala correta da incerteza; pode-se, inclusive, tomar um teto inferior e um piso superior àqueles determinados pelos especialistas, como fizeram Nordhaus & Yohe. O mesmo vale para a distribuição de probabilidades: testam-se diversas estruturas, e procura-se tirar algum tipo de conclusão.

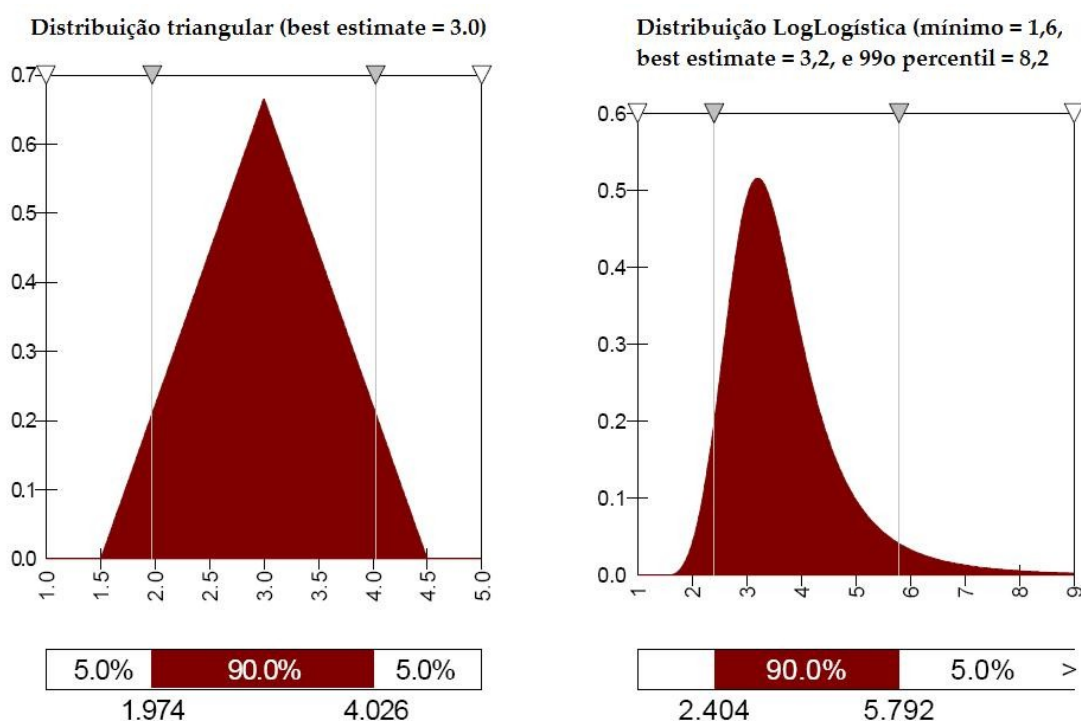


FIGURA 4 – funções densidade de probabilidade da sensibilidade climática. Esquerda: adotada pelo relatório Stern; direita: Dietz (2009). Fonte: Dietz (2009: 29).

O problema, como já dito, é a ignorância. Isso fica claro no modelo de Nordhaus e Yohe (1983), em que os parâmetros escolhidos para representar a incerteza foram basicamente ligados a variáveis econômicas e energéticas, e não às climáticas, pois à época ainda não existia o IPCC, e tanto as formas funcionais como os parâmetros eram simplesmente desconhecidos.

Martin Weitzman (2007) levanta o argumento de que o lado direito de uma função de danos é, por natureza, desprovido de uma fdp. Em modelos macroeconômicos convencionais as caudas das distribuições são bem mais curtas, o que permite que se fale em risco com mais tranquilidade. Mas quando a análise passa a envolver ecossistemas, espécies e *habitats*, o instrumental da teoria de decisão bayesiana torna-se praticamente inútil.

Quanto mais raro é um evento, mais incerta é a estimativa de sua probabilidade (não há registros passados daquilo que pode acontecer se a temperatura aumentar 6 °C). O centro da distribuição, ou aquilo que está mais próximo da esperança, pode até ser tido como uma distribuição objetiva de frequências, mas a cauda da distribuição é pura indeterminação e ignorância, de forma que atribuir-lhe probabilidades subjetivas é mero chute.

As consequências de se adotar uma ou outra distribuição, em suma, são devastadoras: a utilidade marginal do consumo pode ir a infinito quando hipóteses razoáveis sobre incerteza forte são adotadas, o que corresponde a um seguro de preço infinito contra o fenômeno que produz a incerteza (ibidem). Em outras palavras, se existir a possibilidade de um estado futuro com zero consumo, mesmo que muito, muito incerto, e se se admitir aversão ao risco positiva, a sociedade estará disposta a pagar o máximo possível para evitar o cenário catastrófico (DIETZ, 2009; WEITZMAN, 2009).

A idéia é mais facilmente compreendida quando comparada à aposta de Pascal, descrita por Blaise Pascal em 1670, no livro *Pensées*. A decisão a se tomar é levar ou não a vida como se Deus existisse (pois acreditar ou não em Deus não é objeto de escolha racional), e a incerteza está na existência ou não dele. Caso não se leve a vida como se ele existisse, mas ele exista, o custo é infinito (o inferno, presume-se, apesar de ele não ter mencionado esse termo); já se ele não existir, o ganho é positivo, mas não infinito; por outro lado, levando-se a vida como se Deus existisse, o ganho é infinito se ele existir (paraíso), e o cus-

to positivo, mas não infinito, se ele não existir.

Nesse caso, a decisão racional (ou estratégia dominante) é levar a vida como se Deus existisse, mesmo que a probabilidade de sua existência seja mínima ou mesmo desconhecida, devido ao ganho infinito. No caso das mudanças climáticas, investir em mitigação corresponderia a levar a vida como se Deus existisse, e a possibilidade de uma catástrofe seria a incerta, mas possível, existência de Deus.

“All of this is naturally unsatisfying and not what economists are used to doing, but in rare situations like climate change where the Dismal Theorem applies we may be deluding ourselves and others with misplaced concreteness if we think that we are able to deliver anything much more precise than this with even the biggest and most-detailed climate-change IAMs as currently constructed and deployed” (WEITZMAN, 2009: 18).

Em decorrência das arbitrariedades que a tentativa de incorporação da incerteza imputa às análises de custo-benefício das mudanças climáticas, Clive Spash (2002, 2007) recomenda que se abandonem esses exercícios e se concentrem esforços no modelo de ciência pós-normal proposto por Funtowicz & Ravetz (2001). Para ele, a incerteza não pode ser reduzida ou eliminada, de modo que é perda de tempo tentar produzir métodos que transformem a incerteza forte em fraca (mais sobre este assunto no item 5.2).

2.3 OUTROS FATORES

Os IAMs se diferenciam também pelo nível de desagregação espacial: modelos agregados utilizam uma única função de produção para todo o mundo, estimam uma única temperatura, e reduzem emissões do mundo todo ao mesmo tempo; modelos espacialmente desagregados apresentam uma função de produção para cada região, temperaturas regionais, danos regionalizados, etc. Os modelos desagregados exigem uma quantidade muito

maior de dados, pois o número de parâmetros se multiplica pelo número de regiões. Ao mesmo tempo, é possível representar a interação entre os diferentes países, gerando resultados cooperativos ou não cooperativos e examinando as consequências de cada um.

Por exemplo, a primeira versão do RICE (*Regional Dynamic Integrated Model of Climate Change*), de Nordhaus & Yang (1996), permite que os países adotem estratégias distintas entre si, de modo que a estratégia global pode ser nula (BAU), cooperativa, ou não cooperativa. Com isso, o modelo incorpora à análise *insights* de teoria dos jogos e de economia política. O principal ponto negativo da desagregação é que, devido ao elevado número de equações, os parâmetros do modelo devem ser calibrados para que os resultados converjam. Ao mesmo tempo, os modelos agregados precisam recorrer a representações excessivamente abstratas da realidade, o que os torna pouco acurados.

Quanto à perspectiva setorial, os IAMs podem ser do tipo *top-down* ou *bottom-up*. Os primeiros tipicamente incluem um único setor produtivo, ou então um número reduzido de setores. Já os últimos realizam a modelagem a partir da base, incluindo assim grande número de setores e obtendo os parâmetros técnicos e econômicos por meio da análise de insumo / produto. Um exemplo de estudo *bottom-up* é o recém publicado resultado do consórcio economia do clima, que utilizou modelo de equilíbrio geral computável e inclui 54 setores (e suas interações), entre os quais agricultura, indústria, comércio, e produção de energia (MARGULIS & DUBEUX, 2010). Isso exige que se desenvolva uma equação de produção para cada um dos setores, e que se estabeleçam os nexos, de modo a captar, por exemplo, a influência sobre a indústria de um deslocamento da produção agrícola em decorrência das mudanças climáticas.

O maior nível de desagregação diminui o horizonte temporal do modelo, pois aumenta a quantidade de interações e os resultados passam a não convergir. Por outro lado, os modelos *top-down* utilizam uma função de danos agregada, que calcula custos econômicos com base no aquecimento verificado, mas cuja formulação matemática tem pouquíssima fundamentação empírica.

Alguns economistas chegam a passar a idéia de que são irrelevantes as interações entre os setores da economia. Por exemplo, Mendelsohn (2009: 9) afirma que os seto-

res diretamente afetados pelas mudanças climáticas (agricultura, recursos costeiros, energia, florestas, turismo e água) representam apenas 5% do PIB mundial – percentual que, além do mais, tende a cair –, de modo que, “*even if climate change turns out to be large, there is a limit to how much damage the climate can do to the economy. Most sectors of the global economy are not climate sensitive*”.

A menos que ele possa demonstrar que a falta de água potável e de alimentos, a inundação de áreas costeiras, a falta de energia, e a diminuição do turismo não tenham efeitos devastadores sobre o bem-estar, pode-se concluir que a sua interpretação dos fatos está equivocada.

A última característica importante dos IAMs é o tratamento da tecnologia. A maior parte dos modelos incorpora estimativas exógenas do avanço tecnológico, sem explicitar a maneira como a inovação interage com outros setores da economia. Já os modelos de tecnologia endógena adotam diferentes procedimentos para explicitar o avanço técnico. Por exemplo, Acemoglu *et. al.* (2009) explicitam a dinâmica da inovação atribuindo descobertas de tecnologias mais eficientes aleatoriamente aos cientistas, que podem produzir para os setores de bens de capital limpos ou bens de capital sujos (em termos de emissões de GHG). Já Bossetti, Carraro & Galeotti (2006) incluem no modelo a possibilidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento, que tem efeito positivo sobre a eficiência dos equipamentos de capital por meio dos fatores *learning by researching*, que cresce com o investimento, e *learning by doing*, que aumenta à medida que se faz mais pesquisa.

Os resultados da inclusão de pesquisa e desenvolvimento (P&D) são ambíguos, podendo aumentar ou diminuir os custos de mitigação das mudanças climáticas. Isso se deve ao fato de que todo investimento tem um custo de oportunidade, e mesmo P&D pode não ser economicamente viável segundo o critério da eficiência marginal – mas esse critério desconsidera os ganhos de escala decorrentes de curvas de aprendizado (BARKER, MAHVASH & KÖHLER, 2006). Já a inclusão da possibilidade de *learning by doing* produz sempre custos menores (pois há ganhos de escala e efeitos multiplicadores) (EDENHOFER, BAUER & KRIEGLER, 2005).

2.4 PROCEDIMENTO DE DESCONTO

O procedimento de desconto é talvez o fator com maior influência sobre os resultados de modelos econômico-climáticos. A idéia de que valores futuros devam ser descontados a uma taxa positiva para serem contabilizados no presente tem sentido lógico quando se admite que os estoques de recursos tendem a aumentar com o tempo (reproduzir-se, renovar-se, ou regenerar-se). É o chamado *desconto dos ativos* ou *desconto do consumo*. Uma mesma quantidade de determinado ativo terá menor valor num futuro em que a sua disponibilidade total é maior, do que no presente, quando é menor a sua oferta total.

No exemplo da Tabela 4, o número de residências cresce a uma taxa de 1% ao ano, o dinheiro cresce a $i = 5,5\%$, e as florestas diminuem à taxa de 0,6%. Aplicando-se juros compostos, obtém-se diferentes disponibilidades futuras totais desses ativos. Com isso, o número de residências quase triplica depois de cem anos, e o dinheiro aumenta duzentas e onze vezes, ao passo que as florestas mantêm 55% de sua cobertura original.

No caso dos lucros que uma empresa receberá no futuro, faz sentido calcular o seu valor presente por meio do desconto da taxa de juros (i), pois o dinheiro se multiplica a essa taxa quando aplicado no mercado financeiro. Assim, 111,3 dólares daqui a dois anos corresponderão a 100 dólares hoje, se a taxa de juros for de 5,5% e o risco for negligível. O mesmo vale para salários, rendas, dividendos e todas as quantias monetárias. Vale, também, para os bens que podem ser facilmente substituídos por dinheiro. Na ausência de inflação e de custos de transação, 111,3 casas daqui a um ano corresponderão a 100 casas hoje, pois elas podem ser trocadas por dinheiro no mercado.

Se o dinheiro cresce 5,5% ao ano, e é possível transformar casas em dinheiro e dinheiro em casas, então casas devem ser descontadas à mesma taxa que dinheiro. Quando se deve calcular o valor presente líquido de um evento futuro, utiliza-se uma taxa de desconto que reflete a taxa média de reprodução do dinheiro (i), o bem de maior liquidez.

TABELA 4 – exemplo hipotético da aplicação de juros compostos sobre a oferta de ativos que crescem e decrescem no tempo.

	Residências	Dinheiro (<i>i</i>)	Florestas
Taxa de crescimento anual *	1%	5,5%	-0,6%
Quantidade inicial	100	100	100
Quantidade depois de 2 anos	102,0	111,3	98,8
Quantidade depois de 5 anos	105,1	130,7	97,0
Quantidade depois de 10 anos	110,5	170,8	94,2
Quantidade depois de 50 anos	164,5	1.454,2	74,0
Quantidade depois de 100 anos	270,5	21.146,9	54,8

* O valor de 1% atribuído ao item residências é puramente hipotético; o valor de 5,5% atribuído ao item dinheiro é igual à taxa de desconto efetivamente empregada por Nordhaus (2008); o valor de -0,6% atribuído ao item florestas foi medido por Hansen, Stehman & Potapov (2010) para o mundo todo entre os anos de 2000 e 2005.

No entanto, ao utilizar-se uma única taxa de desconto ($r = i$) para o cálculo do bem-estar agregado, pressupõe-se que todos os recursos são substituíveis entre si (sustentabilidade fraca)³², e que r é igual à média da taxa de renovação, reprodução, e regeneração de todos os recursos, inclusive os não-renováveis. Esse procedimento é questionável, pois i é muito superior à taxa de reprodução de quase todos os demais recursos, devido à artificialização do valor dos ativos no mercado financeiro.

O mecanismo de valoração de ativos preferido pelos economistas é o mercado, onde a valoração decorre da interação entre oferta e demanda. A escassez relativa é sinalizada pelo mecanismo de preços, que se adapta instantaneamente às variações de oferta e demanda. Aumentando a escassez, crescem os preços, o que significa que os agentes passaram a dar mais valor ao ativo em questão. No exemplo da Tabela 4, a escassez relativa de uma casa no ano zero é de 1% ($= 1 / 100$), bem maior do que no ano cem, quando é de 0,37% ($= 1 / 270,5$). Se o valor de um ativo é diretamente proporcional à sua escassez relativa, residências e dinheiro perdem valor no tempo, ao passo que florestas ganham valor. De maneira geral, portanto, o fato de que a disponibilidade de um ativo aumenta faz com que diminua o seu valor. E vice-versa.

³² Daly & Farley (2004), Romeiro (2001).

Mas os mercados não são perfeitos, pois há regulamentações diversas, impostos, concentração de mercado, externalidades, especulação, etc. Com isso, a precificação dos ativos fica distorcida, e as consequentes falhas do mecanismo de preços podem levar a crises dos mais diversos tipos, entre as quais as de superexploração de recursos naturais.

O procedimento de desconto baseado em preços de mercado, de por si, já está sujeito a erros. Mais problemático ainda é o desconto com taxa positiva de recursos que possuem crescimento negativa, como é o caso das florestas, por exemplo. Não faz sentido supor que o estoque de recursos naturais cresça 5,5% ao ano, pois isso significaria que 1454,2 hectares de floresta amazônica daqui a 50 anos corresponderiam a meros 100 hectares hoje. O problema é que, no agregado, os 100 hectares de floresta amazônica não se reproduzirão a ponto de se tornarem 1454,2 hectares. Muito pelo contrário, a uma taxa de depredação líquida anual de 0,6%, a tendência é que esse estoque diminua de 100 para 74.

O mais adequado seria que se descontasse cada recurso com a taxa que lhe corresponde, pois não faz sentido supor que todos os ativos cresçam à mesma taxa que a quantidade de dinheiro da economia. Nesse caso, os recursos naturais teriam taxas de desconto negativas (ACKERMAN *et. al.*, 2009; DALY & FARLEY, 2004; BARKER, 2008)³³.

2.4.1 Desconto do tempo

A aplicação do procedimento de desconto em modelos econômico-climáticos é feita por meio da relação de Ramsey, derivada da otimização de um modelo de crescimento intertemporal (ver Apêndice 1). Segundo essa formulação, a taxa de desconto dos ativos pode ser decomposta em duas partes: a taxa pura de desconto do tempo ($\rho - r\hat{o}$), e a taxa de desconto do crescimento (ηg):

$$r = \rho + \eta g \quad (3)$$

Onde: g = taxa de crescimento do consumo *per capita*; η (eta) = elasticidade da utilidade marginal do consumo.

³³ Stern (2007) também defende estas idéias, apesar de não aplicá-las em seu modelo agregado.

A taxa pura de desconto do tempo, ou preferência pelo consumo presente, representa a propensão a atribuir menos valor ao futuro, independente de ele ser mais ou menos rico, e se aplica à utilidade e ao bem-estar, mas nunca ao consumo. Por exemplo, ao comparar o bem estar de gerações que viverão daqui a cem anos (geração 2) e cinquenta anos (geração 1) com o bem-estar da geração corrente (geração 0), sendo todas igualmente ricas, a sociedade valoraria o bem-estar das gerações futuras descontando-as à taxa ρ . Quanto maior o período de tempo, maior o fator de desconto do parâmetro ρ , e mais decisivamente ele influencia o processo de agregação do bem-estar. Por exemplo, se ρ for positivo, o bem-estar da geração 2 terá menor peso do que o da geração 1, que terá menor peso do que o da geração 0.

A intuição é simples: ρ representa a impaciência da sociedade. Um indivíduo revela a sua impaciência ao consumir a maior parte da sua renda no presente, pois, presume-se, dá pouco valor ao futuro (ou porque é consciente de que não viverá para sempre). Aquele que poupa mais dá mais valor ao futuro (e se preocupa menos com a morte).

Sociedades com valores baixos de ρ dão bem mais valor a eventos futuros do que sociedades com valores altos (o Brasil, portanto, tem ρ alto, ao contrário da China). O problema está na determinação desse valor, pois a observação da impaciência de toda uma sociedade é tarefa empírica complicada, ao mesmo tempo em que, tratando-se de temas que são transversais a um grande número de gerações, é possível argumentar que a tomada de decisão deve se basear mais na ética do que em fatores conjunturais de psicologia social.

Em termos morais, quando se trata de toda uma sociedade, o desconto puro do tempo é quase injustificável, pois isso significaria desvalorizar as gerações futuras simplesmente porque estão no futuro³⁴. Uma postura prescritiva, então, levaria à adoção de um ρ nulo (ou quase nulo, devido à possibilidade de extinção da raça humana).

³⁴ O próprio Ramsey defendeu $\rho = 0$ como o único procedimento moralmente defensável. Roberto Solow, Amartya Sen, Joseph Stiglitz, Kenneth Arrow, Arthur Pigou, Roy Harrod, James Mirlees, entre outros, seguiram a mesma linha.

2.4.2 Desconto do crescimento

O desconto puro do tempo não deve ser confundido com o desconto do crescimento, que decorre do fato de que as gerações futuras provavelmente serão mais ricas do que a geração presente. As diferentes gerações possuem níveis distintos de riqueza, de forma que incrementos ou subtrações do consumo devem ser valorados levando em conta essa desigualdade. Se no futuro se será mais rico, é racional consumir quando se é mais pobre, pois a utilidade marginal do consumo é decrescente.

O parâmetro η determina a aversão da sociedade à desigualdade. Com $\eta < 0$, considera-se que o bem-estar da sociedade cresce mais quando aumenta o consumo dos mais ricos; com $\eta = 0$ o bem-estar agregado aumenta igualmente para crescimento da renda de ricos e de pobres; e $\eta > 0$ produz um maior incremento de bem-estar para o caso de aumento da renda dos mais pobres (o η brasileiro, por exemplo, tem crescido nos últimos anos). No entanto, a teoria econômica diz que η não pode ser negativo, pois isso fere o princípio da utilidade marginal do consumo decrescente.

A taxa de desconto do crescimento (ηg) será tão maior quanto mais ricas forem as gerações futuras, e quanto maior for a aversão à desigualdade. Já se as gerações futuras forem mais pobres (g negativo), a taxa de desconto do crescimento será tão mais negativa quanto maior for a aversão à desigualdade. Esta última situação poderia se verificar no caso de o crescimento econômico (medido pelo PIB) vir a ser bloqueado pelas restrições ecossistêmicas, o que decorreria diretamente do fato de que a oferta de serviços ecossistêmicos tem taxa de crescimento negativa (e.g.: capacidade de absorção de dejetos).

Quando se aceita a equação de Ramsey como conceito organizador do procedimento de desconto em um modelo econômico-climático (de simulação ou de otimização), admite-se que a taxa de desconto do consumo é endogenamente determinada pelos parâmetros normativos ρ e η , e pela variável g . No entanto, e apesar de a absoluta maioria dos modelos se ater à formulação de Ramsey, é possível, e talvez até aconselhável, que se desenvolva um conceito organizador mais adaptado ao estudo de problemas sujeitos à incerteza. Por exemplo, Weitzman (2007) deriva uma fórmula para a taxa de desconto que inclui a

possibilidade de poupança precaucionária, ou seguro contra eventos catastróficos e incertos:

$$r_f = \rho + \eta\mu - \left(\frac{1}{2}\eta^2\sigma^2\right) \quad (4)$$

Onde: r_f = taxa de desconto de ativos líquida de risco; $g \sim N(\mu, \sigma^2)$.

O termo da direita da Equação (4) representa o prêmio que a sociedade estaria disposta a pagar para evitar o risco de elevadas perdas de consumo no futuro. A taxa de desconto livre de risco seria inferior à taxa de desconto da formulação de Ramsey, o que aumentaria a estimativa dos danos futuros e com isso o investimento corrente em mitigação.

2.5 PONDERAÇÃO PARA A IGUALDADE (*EQUITY WEIGHTING*)

A idéia de ponderação para a igualdade decorre do fato de que o nível de preços é bem mais baixo em países pobres do que em países ricos, de forma que quando se atribui valor a uma perda ou ganho por meio dos preços de mercado (procedimento convencional), se está atribuindo maior valor às perdas ou ganhos de países ricos do que de países pobres.

Por exemplo, a destruição de uma casa em decorrência de evento climático extremo deveria subtrair o mesmo valor do bem-estar total da humanidade, independentemente de ter acontecido na Bolívia ou na Inglaterra. No entanto, o preço de uma casa na Bolívia é muito inferior, mesmo que convertido a Libras Esterlinas por meio da paridade do poder de compra, do que o preço de uma casa na Inglaterra. Com isso, o cálculo dos danos, quando não corrigido, acaba fazendo crer que é pior destruir uma casa na Inglaterra do que na Bolívia (STERN, 2007: 166 – 167).

O mesmo raciocínio é válido para impactos sobre ativos que não têm mercado, como os serviços ecossistêmicos. Os danos monetários sobre esses ativos são convencionalmente calculados por meio de técnicas de valoração (disposição a pagar, disposição a rece-

ber, custos evitados, custos de controle, custos de reposição, custos de oportunidade, custos de viagem, preços hedônicos, entre outros)³⁵ que estão igualmente sujeitas ao viés decorrente da desigualdade (não apenas de renda) que se relatou no parágrafo anterior.

Por exemplo, a disposição a pagar depende claramente do nível de renda do indivíduo e da sua comunidade, bem como a disposição a receber. Os custos de oportunidade dependem do nível de preços da localidade em questão, tal qual os custos de reposição. Ou seja, a valoração dos impactos decorrentes das mudanças subestimar os danos de regiões e de grupos sociais menos favorecidos, tanto para ativos de mercado quanto para ativos de fora do mercado.

O procedimento padrão para resolver esse problema é multiplicar o dano calculado (Ω_i) pela razão (elevada a um parâmetro η de aversão à desigualdade) entre o nível médio (ou mediano) de renda ($\bar{Y}$) e a renda do indivíduo ou grupo social em questão (Y_i):

$$\Omega = \Omega_i \times \left(\frac{\bar{Y}}{Y_i} \right)^\eta \quad (5)$$

Assim, sempre que $\eta > 0$, o preço da construção de uma nova casa na Bolívia (Ω_B) será multiplicado por um valor maior do que 1, já que a renda dos bolivianos é inferior à renda média mundial ($Y_B < \bar{Y}$), de forma que o dano calculado crescerá. Já se $\eta > 1$, o dano calculado crescerá mais do que proporcionalmente ao crescimento da desigualdade entre a renda da Bolívia e a renda mundial. O inverso acontecerá no caso da Inglaterra: o dano calculado (Ω_I) diminuirá.

Formalmente:

$$\left[\Omega_B \times \left(\frac{\bar{Y}}{Y_B} \right)^\eta \right] > \Omega_B; \quad \Omega_I < \left[\Omega_I \times \left(\frac{\bar{Y}}{Y_I} \right)^\eta \right] \quad (6)$$

³⁵ Ver Caixeta (2009) para uma discussão sintética.

Richard Tol (2005) produziu uma meta-análise de 103 estimativas de custos dos danos das mudanças climáticas publicadas por 18 diferentes (times de) acadêmicos em 28 estudos, e verificou que a simples presença de ponderação para a igualdade aumenta a mediana do custo marginal da tonelada de carbono de US\$ 10 para US\$ 54 (+440%) – a média, no entanto, sobe apenas 12%, de US\$ 90 para US\$ 101.

David Pearce (2003) apresenta resultados de um modelo para diferentes valores de η , mostrando que os danos totais sem ponderação para a igualdade são estimados em US\$ 322 bilhões, sendo que $\eta = 0,5$ leva a US\$ 307 bilhões (-4,6%), $\eta = 0,8$ a US\$ 343 bilhões (+6,5%), $\eta = 1$ a US\$ 390 bilhões (+21,1%), e $\eta = 1,5$ a US\$ 600 bilhões (+86,3%). O autor defende que esse parâmetro admita valores entre 0,5 e 1,2, argumentando que mais do que isso implica numa aversão excessiva à desigualdade.³⁶

Já Hourcade, Ambrosi & Dumas (2009) acreditam que as políticas de combate às mudanças climáticas não devem se sobrepor às de redução da desigualdade, de forma que o procedimento de ponderação para a igualdade não se justifica. É a mesma posição de William Nordhaus (2008), que argumenta que a economia das mudanças climáticas já é uma área suficientemente ampla, não sendo aconselhável a inclusão de ulteriores complicações, como são as considerações de progressividade ou regressividade das políticas de mitigação. Ele adota, então, o procedimento de ponderação de Negishi, que atribui pesos proporcionais à renda, em oposição aos pesos inversamente proporcionais da ponderação para a igualdade. Maddison tem posição parecida:

“[t]he argument against their use in this context is that projects to cut carbon emissions should not be justified on distributional grounds when it is possible to make direct transfers compensating those who stand to lose from implementing or failing to implement cuts in GHG emissions. Another way of saying all this is that one should at least entertain the possibility that it might at the margin be cheaper to compensate the victims of climate change than abate GHG emissions” (MADDISON, 2007: 4).

³⁶ Para uma discussão completa, ver Anthoff (2004) e Anthoff, Hepburn & Tol (2007).

Os modelos econômico-climáticos analisam trajetórias alternativas da economia decorrentes de diferentes políticas de mitigação. Tanto a trajetória BAU quanto estratégias mais severas em termos de redução de emissões têm impactos diferenciados geracionalmente e espacialmente (Mendelsohn, Dinar e Williams (2006) estimam impactos desagregados por países ricos e pobres), e tomar decisões com base em seus impactos distributivos não significa estender excessivamente o escopo da análise, mas admitir que a justiça distributiva é um critério de decisão inseparável da eficiência econômica. Ademais, não apenas os custos dos danos das mudanças climáticas devem ser ponderados para a igualdade, mas também os custos de mitigação.

Em outras palavras, não é possível pensar em decisões econômicas que sejam tomadas independentemente de considerações de justiça; constatação que não se sustenta apenas em termos éticos, mas também, e principalmente, na observação sistemática do comportamento humano feito pela economia comportamental.

2.6 DISCUSSÃO: TEORIA E MÉTODOS

Os modelos econômico-climáticos são complexas ferramentas que permitem que se estudem as consequências das mudanças climáticas de maneira consistente, com conclusões decorrendo logicamente das premissas e procedimentos adotados. Por meio deles, pode-se acompanhar de forma transparente o processo de incorporação do conhecimento novo, que surge o tempo todo na ciência, no arcabouço analítico da economia.

Ao mesmo tempo, o elevado número de interações e de formulações matemáticas torna o exercício de avaliação desses modelos necessariamente minucioso, já que vários fatores influenciam contemporaneamente os resultados. Este capítulo estudou os mais relevantes dentre esses fatores, procurando dar fundamentação à descrição que é feita dos modelos de Nordhaus e de Stern, nos Capítulos 3 e 4, e à avaliação crítica do Capítulo 5.

A Figura 5 apresenta a “árvore genealógica” de modelos econômico-climáticos.

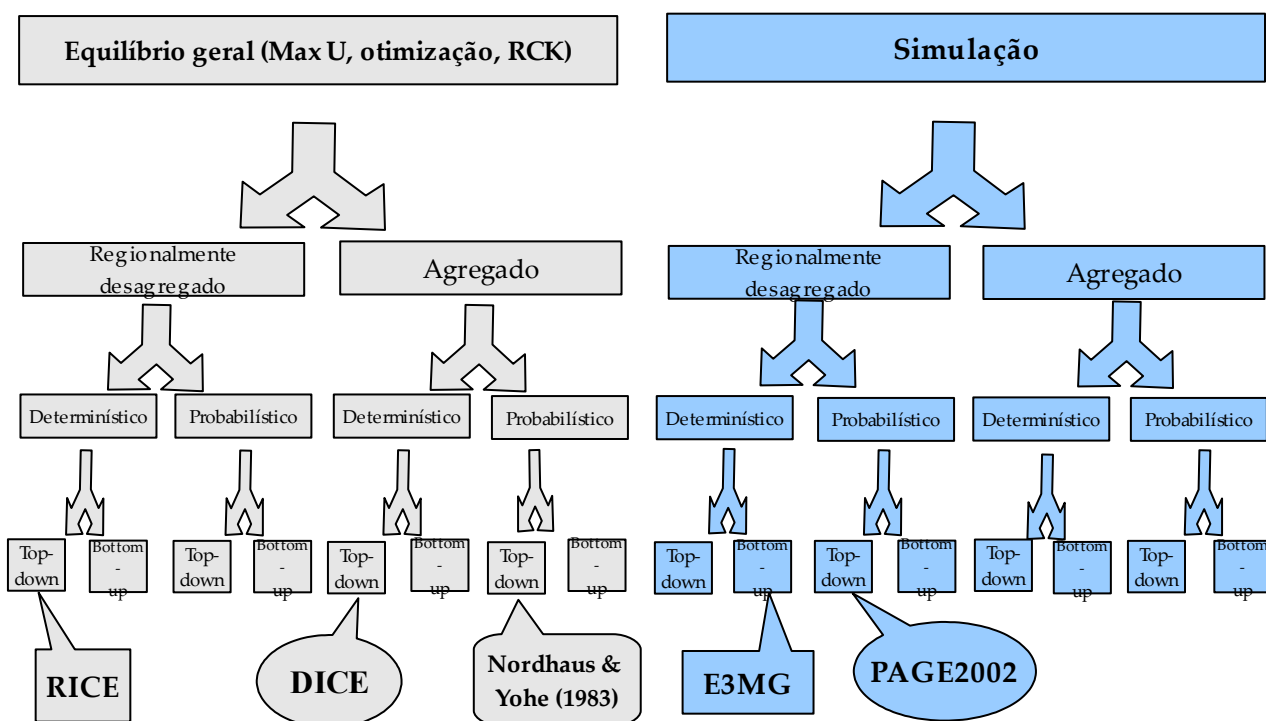


FIGURA 5 – “árvore genealógica” dos principais modelos econômico-climáticos.

Os modelos que interessam para o escopo deste trabalho são o DICE e o PAGE. O primeiro – *Dinamic Integrated Climate-Economy Model* – foi desenvolvido por Nordhaus (1990), e está atualmente em sua quinta versão. É determinístico, e adota o enfoque de otimização de políticas públicas. O segundo – *Policy Analysis of Greenhouse Effect* – foi desenvolvido para a União Européia em 1991, por uma equipe coordenada por Chris Hope, de Cambridge (HOPE, ANDERSON & VENNAM, 1993), e ganhou notoriedade por ter sido o modelo usado na elaboração do relatório Stern. É estocástico e de análise de políticas públicas. A sua atual versão é de 1995 (PLAMBECK & HOPE, 1996).

É deles que tratam os Capítulos 3 e 4, que contemplam a parte empírica desta dissertação.

CAPÍTULO 3

O MODELO DE WILLIAM NORDHAUS

“The best (though magnificently simplified) cost-benefit analysis” (THE ECONOMIST, 1990).

Este capítulo descreve a quinta e última versão dos modelos da família DICE, o DICE-2007³⁷. Como material complementar, os Apêndices 2 e 3 apresentam o trabalho de William Nordhaus de maneira ampla, excedendo aquilo que seria estritamente requerido pelo problema central desta dissertação.

O fato de inexistir uma síntese da obra do principal autor da economia das mudanças climáticas, e, como argumentaremos, um dos maiores responsáveis pela construção do arcabouço teórico e metodológico da economia ambiental, é intrigante. Não tentamos entender o porquê, mas é notório que a Nordhaus não é atribuída a mesma importância que a Martin Weitzman, por exemplo. No entanto, o papel de Nordhaus na transposição das ferramentas da economia neoclássica para o estudo aplicado de temas ambientais (como visto no item 2.1.1) foi igual ou maior do que o de Weitzman.

O material complementar faz uma primeira síntese do pensamento de Nordhaus em economia do meio ambiente, preenchendo uma importante lacuna da literatura. São apresentados, no Apêndice 2, o seu trabalho no plano mais geral, que está cronologicamente situado no final dos anos 1960 e nos anos 1970, e no Apêndice 3, as principais características das primeiras versões do DICE, o mais influente modelo econômico-climático.

Nordhaus foi pioneiro em quase tudo na economia do clima: (i) adaptação dos modelos de otimização; (ii) desagregação setorial detalhada (do setor energia); (iii) integra-

³⁷ Nordhaus (2007, 2008).

ção de modelos econômicos e climáticas; (iv) estudo do efeito da incerteza por meio de simulações de Monte Carlo; e (v) modelagem da possibilidade de eventos catastróficos.

Todos os modelos econômico-climáticas de hoje devem ao seu trabalho, e os procedimentos estabelecidos na área foram desenvolvidos por ele. Foi uma evolução gradual, que começou com representações simples e foi incluindo análises mais elaboradas, até chegar no RICE (*Regional Dynamic Integrated Climate-Economy model*), um modelo desagregado, mas que mantém um nível de agregação que permite a análise transparente dos procedimentos.

Esta dissertação se concentra no DICE-2007, e não no RICE, por três razões. A primeira é que o DICE teve e tem muito mais repercussão, por ser de manipulação mais simples. A segunda é que a última versão do RICE que está disponível em detalhes é do ano 2000, já totalmente ultrapassada³⁸. E a terceira é que ambos são calibrados para darem resultados semelhantes, de forma que se perde muito pouco ao estudar-se o DICE. Ademais, o próprio Nordhaus (1999a: 60) aconselha que “[r]esearchers or policy makers who are interested in having an intuitive understanding of the economics of global warming are well-advised to begin with the DICE model before tackling more opaque and computationally demanding models such as the RICE model or other large-scale models.”

O item 3.1 entra diretamente no debate contemporâneo, e descreve a versão mais atual do DICE (formalização do modelo, tecnologia, custos de mitigação, danos climáticos, sistema climático, ponderação para a igualdade, procedimento de desconto, incerteza, outros fatores, resultados e implicações). O item 3.2 encerra o capítulo.

3.1 O DICE-2007 (DYNAMIC INTEGRATED CLIMATE-ECONOMY MODEL)

“Although many efforts have been made to link models, the most successful IA [integrated assessment] model is the simplest and most transparent. The Nordhaus model of climate change, in merely 13 equations, combines an economic production function including

³⁸ Um artigo foi publicado recentemente com resultados preliminares do RICE-2010 (NORDHAUS, 2010), mas não tem o detalhamento que se exige para os nossos fins.

technological change, how greenhouse gas emissions stem from production, how emissions drive climate change (including how greenhouse gases are sequestered in the ocean), how climate change damages the economy, the costs of reducing greenhouse gas emissions, and a social welfare criterion to be optimized (...) This has been a highly influential model because it incorporates many of the critical components of the problem. At the same time, the model has been strongly criticized for its simplicity. Yet at least the Nordhaus model is transparent enough that its shortcomings, and their effects on its output, can be clearly identified and discussed. To their credit, Nordhaus and his collaborators have made their code readily available, and the model has been modified and used by a variety of other scholars” (NORGAARD & BAER, 2005).

O modelo de Nordhaus é a representação mais simples que há da complexíssima relação entre os sistemas econômico e climático, e essa é a sua principal vantagem. O fato de ser simples faz com que possa ser transparente, de forma que as suas premissas e resultados são facilmente visualizados. Por outro lado, o elevado grau de agregação faz com que o modelo deixe de captar uma série de efeitos que só se revelam na dinâmica interativa entre as minúsculas partes que estão escondidas atrás de cada uma das suas equações. O tema que emerge, então, é o da simplicidade versus complexidade: qual é melhor?

Nordhaus parte explicitamente de uma perspectiva positiva da ciência, segundo a qual “a simplicidade é a mais alta forma de sofisticação” (frase que se repete em seus textos, atribuída a Leonardo da Vinci). Além disso, segue a linha popperiana do gradualismo e aditivismo, valorizando a conformação da pesquisa aos padrões científicos estabelecidos pelo procedimento de *peer-review*. Disso decorrem duas características de seu trabalho: a desconfiança em relação aos modelos “caixa preta”, cuja interpretação é dificultada pelo grande número de variáveis e equações, e a desconfiança dos procedimentos analíticos que não passaram pelo crivo do *peer-review*, e que, portanto, não fazem parte da ciência “normal” (ou da economia convencional).

*

Em relação às versões passadas, o DICE-2007 incorpora uma série de atualiza-

ções derivadas dos avanços no debate sobre IAMs, como a utilização de paridade do poder de compra (PPP) no lugar de taxas de câmbio de mercado (NORDHAUS, 2007c), estimativas revisadas da função de danos (que apresenta resultados mais elevados do que nas versões anteriores), e, especialmente, a diminuição da taxa de desconto do tempo. Esta última modificação, que reduziu de 3% para 1,5% o valor da taxa de desconto do tempo, pode ser vista como resposta ao debate que ressurgiu após a publicação do relatório Stern.

O modelo completo tem 19 equações, 25 variáveis e 23 parâmetros. As variáveis exógenas são a produtividade total dos fatores (tecnologia), as emissões de uso de terra, a população, a taxa de participação dos países³⁹, e o percentual de emissões industriais não reguladas. O modelo roda em *time steps* de dez anos, e a otimização é feita em 60 *time steps*. O software usado por Nordhaus para a otimização é o GAMS, e o código completo com instruções está disponível em Nordhaus (2007d). Uma planilha de Excel do modelo permite rodar todos os cenários (exceto a otimização) (NORDHAUS, 2007e).

A ilustração em forma de imagem (Figura 6) deixa clara a característica central de um *Integrated Assessment Model*: a interação entre economia, ecossistemas e sociedade. As caixinhas coloridas da Figura 6 são abstrações da relação entre economia e clima que, para Nordhaus, são suficientes para explicar o problema das mudanças climáticas.

A caixa grande superior, de cor amarela, representa o setor de bem-estar do modelo. Nela está a função objetiva, que calcula a utilidade agregada com base na soma descontada das utilidades individuais. Dentro desse setor, a caixinha branca da esquerda representa o estoque de bem-estar, cuja magnitude depende da trajetória do consumo, que, por sua vez, depende de decisões de política pública, como a taxa de mitigação de emissões.

A caixa central, de cor lilás, representa o setor econômico do modelo. Dentro dele estão as equações que relacionam a taxa de mitigação escolhida (exogenamente ou por meio da otimização) ao investimento, este ao estoque de capital da economia, e este ao produto, que determina as possibilidades de consumo. Ao mesmo tempo, a taxa de mitigação e o produto determinam o custo marginal dos danos, que, no processo de otimização, são balanceados com o custo marginal da mitigação para determinar a taxa de mitigação.

³⁹ Nordhaus (2008: 116). A parte do modelo referente a esta variável é omitida da análise da dissertação.

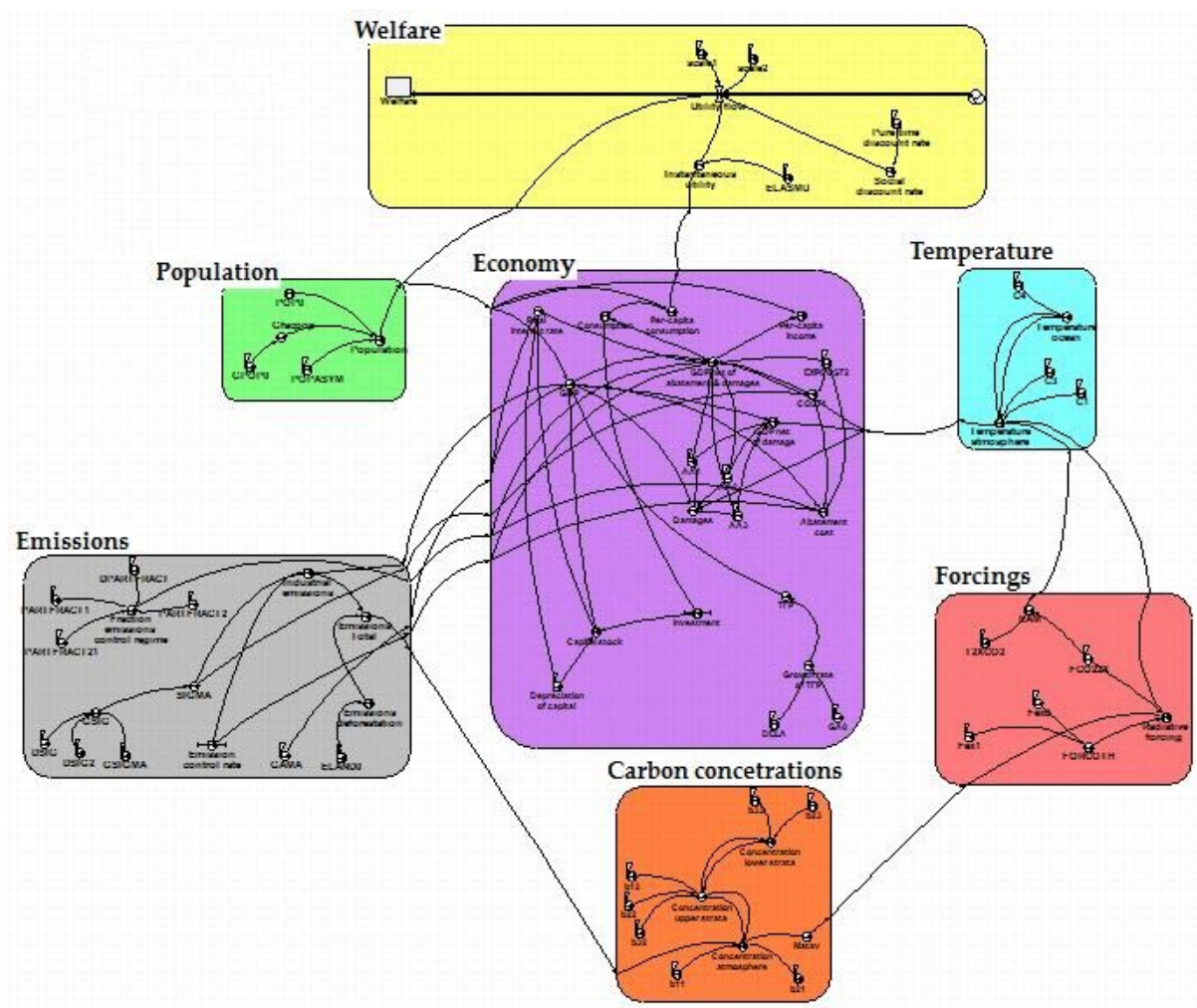


FIGURA 6 – representação esquemática* dos sete setores do DICE-2007.

* Feita no software *Simile* versão 5.3, com base nas equações de Nordhaus (2007). As caixas representam os setores do modelo, os pontos (ilegíveis devido à escala da imagem) são variáveis e parâmetros, e as setas representam relações funcionais.

O setor demográfico é totalmente exógeno. Os setores emissões, concentração de carbono, *forcings* e temperatura contêm representações muito resumidas das relações climáticas, que dão como resultado a temperatura global de cada período, que por sua vez, faz a ligação com a economia.

Com este mapa geral em mente, passaremos à descrição das equações do modelo e à análise de suas mais importantes características.

3.1.1 Formalização do modelo

O DICE é um modelo determinístico de otimização, setorial e espacialmente agregado, com tecnologia exógena. Desde a sua primeira versão ele teve estrutura muito semelhante à do modelo de Ramsey-Cass-Koopmans (Apêndice 1), sendo a principal diferença a adição de uma forma de capital natural que cresce com o aumento das emissões de gases-estufa e decresce com a mitigação. Com isso, a função de produção recebe um quarto termo, que faz decrescer o produto agregado da economia quando as emissões aumentam.

A Equação (7) é a representação modificada da função de produção neoclássica, em que capital e trabalho são modelados por meio de uma função Cobb-Douglas convencional (com retornos constantes de escala), a tecnologia é Hicks-neutra⁴⁰ e exógena, e o capital natural é tratado por meio de uma função de danos climáticos e de uma função de mitigação de emissões.

$$Q(t) = A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} - \Omega(t) - \Lambda(t) \quad (7)$$

Onde: $Q(t)$ = produto agregado (trilhões de US\$); $\Omega(t)$ = danos climáticos (como fração do produto); $\Lambda(t)$ = custos de mitigação (como fração do produto); $A(t)$ = produtividade total dos fatores; $K(t)$ = estoque de capital (trilhões de US\$); $L(t)$ = população; α = elasticidade do produto em relação ao capital.

As projeções são feitas no modelo desagregado RICE (que tem doze regiões), e agregadas no DICE, para 71 países que contemplam 97 por cento da economia e das emissões do planeta. O produto é transformado em US\$ por meio das taxas de câmbio de paridade do poder de compra (PPP) estimadas pelo Fundo Monetário Internacional (FMI).

As equações econômicas que não forem descritas aqui são idênticas às do modelo de Ramsey-Cass-Koopmans.

⁴⁰ Não pode aumentar a produtividade de um fator isoladamente.

Tecnologia

A tecnologia no DICE é exógena e igual ao resíduo da função de produção do modelo de Solow, ou resíduo de Solow – o crescimento do PIB que não é explicado pelo crescimento do capital ou do trabalho. Interpretado como a produtividade total dos fatores, o resíduo não capta o avanço técnico endógeno, pois os gastos com pesquisa e desenvolvimento estão embutidos nos fatores capital e trabalho. Assim, o que Nordhaus chama de tecnologia é, na verdade, uma medida das variáveis omitidas, e da inovação *costless*, não induzida. Ele admite que essa é uma forte limitação, mas se justifica dizendo que ainda não há procedimentos robustos para a incorporação de mudança tecnológica endógena.

Como visto no item 2.3, no entanto, há pelo menos quatro modelos que endogenizam a tecnologia: Popp (2004), usando o próprio DICE; Bossetti, Carraro & Galeotti (2006), usando o RICE; Edenhofer, Bauer & Kriegler (2005), que utilizam o modelo MIND; e Acemoglu *et. al.* (2009), que propõe uma estratégia distinta, mas tão agregada quanto o DICE. Todos e cada um deles chegam à conclusão de que a endogenização da tecnologia diminui muito os custos de mitigação estimados. Idéia que é confirmada pela meta-análise da literatura feita por Barker, Mahvash & Köhler (2006).

O resultado do tratamento dado por Nordhaus à tecnologia é a inexistência de *spillovers* decorrentes da dinâmica tecnológica, pois não há dinâmica tecnológica. Em outras palavras, procura-se responder às perguntas quanto, quando e como investir em mitigação das mudanças climáticas sob a hipótese de que não há externalidades positivas derivadas do investimento em P&D.

É de se esperar que numa economia desse tipo não haja investimentos em carbono-eficiência, ou que eles demorem muito para acontecer. Em decorrência disso, justificar-se-iam esforços ainda mais drásticos no presente para que se consigam reduzir as emissões a níveis aceitáveis, evitando consequências perigosas e desconhecidas.

Mas o resultado, no modelo de Nordhaus, é o contrário disso. A sua estimativa de custos de mitigação no cenário ótimo é de 0,56% do bem-estar agregado (comparáveis aos 1% “agora e para sempre” de Stern, que foi acusado de otimismo tecnológico por ter

estimado um custo de mitigação demasiado baixo). Isso decorre do fato de que os custos no curto prazo são mais elevados do que os benefícios em termos de danos evitados. Já no longo prazo, quando a tecnologia se torna mais barata e os benefícios são maiores (porque os danos são maiores), justificam-se gastos mais elevados (NORDHAUS, 2008: 90).

Como pode a tecnologia ficar mais barata se não há investimento em inovação?

Backstop technology⁴¹

A economia do DICE reduz em 20% os custos da eliminação total das emissões de carbono entre 2005 e 2105, mesmo na ausência de P&D. Isso se deve à hipótese da *backstop technology*. O preço dessa tecnologia em 2005 é de US\$ 320 por tonelada de CO₂ (custo de mitigação da última tonelada de emissão, ou seja, com taxa de mitigação de 100%). O DICE-2007 presume que esse valor caia de acordo com uma função logística a uma taxa inicial de 0,5% ao ano, tendendo assintoticamente a US\$ 160 / t CO₂ (50% do valor de 2005). Os valores adotados se baseiam em estimativas (discrepantes) de custos de mitigação, do IPCC e de outro grupo de pesquisadores. O dado do IPCC é de US\$ 446 / t CO₂ para o ano de 2050, para mitigação de 60% das emissões; já o outro dado é de US\$ 169 em 2100, para 100% de mitigação (idem, 2007d, 2009).

As hipóteses relativas à *backstop technology* são infundadas. O que indica que o preço assintótico é metade do preço de 2005? O que indica que cai à taxa inicial de 0,5% ao ano? O que indica que em algum momento será possível eliminar 100% das emissões de carbono? São todos procedimentos arbitrários e inexplicados (na versão anterior do DICE, o preço da *backstop technology* aumentava exponencialmente com o tempo).

Não há resposta a nenhuma dessas perguntas, mas o efeito da hipótese otimista é muito claro:

⁴¹ Ver discussão no Apêndice 2.

“Backstop technology has a large impact on welfare losses. Emission reductions imply much more severe welfare losses in a situation without backstop technology and without learning-by-doing, because the climate protection goal can only be achieved via a reduction in economic output and by enhancing energy efficiency. In the long run, improving energy efficiency is too costly to be an exclusive option” (EDENHOFER, BAUER & KRIEGLER, 2005: 290, grifo nosso).

O resultado final é a rampa: investe-se pouco no começo porque, devido à ausência de *spillovers*, os custos são maiores do que os benefícios; investe-se mais no futuro porque, por hipótese, a tecnologia se torna mais barata, e os danos ficam mais caros.

Para o caso de investimentos excessivos no curto prazo, Nordhaus (2008) desenvolveu a metáfora da caverna, segundo a qual a economia cresceria menos (pois P&D é contabilizada como custo) nesse cenário, e as pessoas viveriam em cavernas nos séculos seguintes; já seguindo a rampa, cada indivíduo viveria em quatro majestosas mansões no futuro, de forma que, mesmo que uma delas fosse destruída por catástrofes climáticas, se estaria melhor do que nas cavernas.

Custos de mitigação

A Equação (8) modela os custos de mitigação como uma função polinomial da taxa de redução de emissões – $\mu(t)$.

$$\Lambda(t) = \theta_1(t) \mu(t)^{\theta_2} \quad (8)$$

Onde: $\theta_1(t)$ = preço da *backstop technology*; $\theta_2 = 2,8$.

O parâmetro θ_2 é estimado econometricamente utilizando-se custos de mitigação obtidos da literatura para diferentes taxas de mitigação (NORDHAUS, 2007d). A função $\Lambda(t)$ é altamente convexa, de forma que os custos crescem mais do que linearmente

com o aumento da taxa de mitigação. Assim, quando $\mu(t)$ aumenta de 10% para 20%, o custo cresce sete vezes; quando $\mu(t)$ vai de 50% para 60%, o custo cresce 1,67 vezes.

É importante salientar que $\theta_1(t)$ é o custo de se mitigar a emissão da *última tonelada* de carbono, portanto o custo de redução de emissões mais alto possível em um dado momento. Pode ser interpretado como o preço da tecnologia mais cara disponível – por exemplo, para 2015, o DICE-2007 o estima em US\$ 311 / t CO₂. Assim, ao multiplicar-se esse valor pela taxa de mitigação, se está supondo que a cada período a redução de emissões requererá a tecnologia mais cara (*backstop technology*), o que não faz sentido, principalmente quando a taxa de mitigação é baixa, e tecnologias baratas podem ser empregadas.

Com isso, a Equação (8) superestima o custo agregado de mitigação. Para se ter certeza, basta inserir no DICE-2007 a trajetória de $\mu(t)$ recomendada por Stern, e perceber que, para 2015, 2025 e 2050, os custos calculados pelo DICE são, respectivamente, 259%, 140% e 120% superiores aos calculados pelo relatório Stern. O que está diretamente ligado ao tratamento endógeno que Stern dá à tecnologia.

Mesmo que função $\lambda(t)$ não superestimasse os custos de mitigação, o elevado grau de agregação tornaria o resultado muito impreciso, uma vez que a distribuição dos custos de mitigação depende também de variáveis locais. Some-se a isso o fato de que o próprio custo marginal da *backstop technology* é estimado de maneira arbitrária, e se obtém um quadro altamente questionável do cálculo dos custos de mitigação no DICE-2007.

Danos climáticos

A Equação (9) estima os danos climáticos – $\Omega(t)$ – por meio de uma função polinomial da temperatura média global.

$$\Omega(t) = \psi_2 T_{AT}(t)^\beta \quad (9)$$

Onde: $\psi_2 = 0,28388$ (parâmetro da função de danos); $T_{AT}(t)$ = aquecimento em relação ao ano 1900; $\beta = 2$.

O procedimento é o seguinte: (i) estimam-se os danos de mercado (agricultura, aumento do nível do mar e outros), de fora do mercado (saúde, recreação – uso do tempo em atividades de fora do mercado –, ecossistemas, e assentamentos humanos), e os custos potenciais de catástrofes, nas doze regiões do RICE, para diferentes níveis de aquecimento; (ii) agregam-se os danos e estima-se econometricamente o parâmetro ψ_2 ; (iii) projetam-se os danos futuros de acordo com a Equação (9).

Os métodos empregados para as estimativas desagregadas são os mais diversos, e as generalizações das valorações feitas nos Estados Unidos (ponderadas pela renda de cada país) são frequentes. O expoente quadrático da função de danos é o *benchmark* dos modelos econômico-climáticos – foi estabelecido por Nordhaus porque gera uma função de benefícios marginais linear. “*It is clear that this equation is extremely conjectural, given the thin base of empirical studies on which it rests*” (ibidem: 42).

As revisões de estimativas de valor dos danos feitas no DICE-2007 aumentaram os custos calculados em relação à versão anterior do modelo, fazendo com que mesmo um aquecimento baixo (inferior a 1 °C) produza custos líquidos (o DICE-98 calculava ganhos líquidos para aquecimentos dessa ordem). A substituição de taxas de câmbio de mercado pela Paridade do Poder de Compra também aumentou as estimativas de danos, pois atenuou as diferenças de custo de vida dos diferentes países.

O Anexo 7 mostra que a forma funcional empregada pelo DICE é mais pessimista do que a do PAGE-2002, independente do expoente adotado. Quando se calculam os custos agregados dos danos no cenário BAU, o DICE-2007 chega a 5,3% do PIB total agregado, um valor muito parecido ao número mais otimista de Stern, de 5%. Ao colocar-se no DICE a mesma taxa de desconto do tempo adotada por Stern, o resultado é um dano agregado de 9,91% do PIB, muito próximo ao valor intermediário de Stern, de 10,9%. Quando η também assume o valor adotado pelo relatório Stern, obtém-se um dano agregado de 15,1%, valor muito semelhante à estimativa mais pessimista de Stern, de 20%.

Conclui-se que a combinação de forma funcional e expoente da função de valoração de danos do DICE-2007 leva a resultados compatíveis com os do PAGE-2002.

Sistema climático

A ligação entre atividade econômica e emissões se encontra em $T_{AT}(t)$, que é função, entre outros fatores, do total das emissões antropogênicas, relação que é intermediada pelo estoque total de carbono na atmosfera, um dos determinantes das forças radiativas que regulam a temperatura. As equações abaixo descrevem a representação do sistema climático do DICE-2007.

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \left\{ F(t) - \frac{\gamma}{\alpha} T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)] \right\} \quad (10)$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)] \quad (11)$$

$$F(t) = \gamma \left(\log_2 \left[\frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} \right] + F_{EX}(t) \right) \quad (12)$$

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11} M_{AT}(t-1) + \phi_{21} M_{UP}(t-1) \quad (13)$$

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (14)$$

Onde: $\xi_1 = 0,22$; $\xi_3 = 0,3$; $\xi_4 = 0,05$; $F(t)$, $F_{EX}(t)$ = forçamento radiativo total e exógeno (W / m^2 , a partir de 1900); $\gamma = 3,8 \text{ } ^\circ C / W / m^2$ (forçamento radiativo total de equilíbrio para concentração atmosférica de CO_2 igual ao dobro da era pré-industrial); $\alpha = 3 \text{ } ^\circ C$ (sensibilidade climática – aquecimento para um forçamento radiativo igual a γ); T_{LO} = temperatura dos oceanos profundos; $M_{AT}(t)$, $M_{UP}(t)$ = concentração de carbono na atmosfera e nas camadas superiores dos oceanos (bilhões de toneladas de carbono); $M_{AT}(1750) = 596,4$; $\phi_{11} = 0,810712$; $\phi_{21} = 0,097213$; $E(t)$, $E_{Ind}(t)$, $E_{Land}(t)$ = emissões de carbono totais, industriais e de uso da terra (bilhões de toneladas de carbono).

Não é difícil entender a lógica dessa idealização das relações climáticas. As Equações (10) e (11) mostram que há uma relação de mútua determinação entre as temperaturas atmosférica e dos oceanos profundos, intermediada pelo forçamento radiativo e pela

sensibilidade climática. Um aumento do forçamento radiativo aquece a atmosfera, que aquece as camadas superiores dos oceanos, que aquecem o oceano profundo. ξ_1 , ξ_3 e ξ_4 representam as defasagens da difusão de calor decorrentes da inércia dos sistemas.

A Equação (12) diz que o forçamento radiativo depende da relação entre a concentração atmosférica de carbono corrente e a da era pré-industrial, além de um componente exógeno que depende de emissões naturais, aerossóis e outros GHG (o único gás endógeno no DICE é o CO₂ industrial). A Equação (13) indica que a concentração atmosférica de carbono depende das emissões, da concentração no período anterior, e da concentração na faixa superior dos oceanos no período anterior, e a Equação (14) representa as emissões totais como a soma das emissões industriais e de uso da terra.

Os parâmetros são calibrados para que a trajetória de temperatura acompanhe aquela estimada pelo IPCC, em seu cenário mais pessimista (A1F1 – Anexo 8), para o Século 21. O parâmetro de sensibilidade climática (α) foi aumentado de 2,9 °C na versão anterior do DICE para 3 °C, para ficar de acordo com a estimativa central do IPCC.

Se o DICE-2007 reproduz o cenário mais pessimista do IPCC, por que chega a conclusões tão otimistas?

Em primeiro lugar, o modelo combina procedimentos funcionais contraditórios, mas com tendência a favorecer recomendações gradualistas. Como se viu, superestima os custos de mitigação (principalmente nos primeiros períodos), em decorrência da exclusão da dinâmica tecnológica, ao mesmo tempo em que apresenta custos de inação compatíveis com os de Stern. Com isso, tende a recomendar a postergação dos investimentos.

Mas isso não basta para explicar as conclusões otimistas de Nordhaus. Um procedimento de ordem mais elevada, o critério de decisão, tem bem mais poder explicativo.

Quando o critério de decisão é a análise de custo benefício, o resultado do modelo é um aquecimento “ideal”, que iguala custos marginais a benefícios marginais. Já se o critério de decisão for o grau de aceitabilidade dos riscos envolvidos, como nos modelos biofísicos, o resultado passa a ser o aquecimento “tolerável”. Neste último caso, não se emprega análise marginal, mas análise de risco.

O modelo de custo-benefício exige que Nordhaus converta todos os danos em

valores monetários, para que possam ser comparados com os custos de mitigação – a unidade de $\Omega(t)$ é o preço em US\$ do aquecimento. Já os danos estimados pelos modelos biofísicos são calculados em unidades físicas (Anexos 3, 4 e 5), que podem ser avaliadas isoladamente, sem que se tenha de confrontá-las a algum valor para se tomar uma decisão.

Até a etapa da elaboração de cenários, os modelos econômicos convencionais e os modelos biofísicos fazem trabalhos semelhantes, apesar de elevado grau de agregação daqueles. A partir daí, no entanto, existe uma diferença de linguagem entre esses dois tipos de modelos. Ao utilizarem o “vocabulário” monetário e a “gramática” marginalista, os modelos econômicos convencionais recomendam as políticas gradualistas. Os modelos biofísicos, por outro lado, ao adotarem o “vocabulário” dos agregados físicos e biológicos, e a “gramática” da análise de riscos, chegam às recomendações precaucionistas.

Daí a quase completa omissão de Nordhaus (2008) do tema dominante no debate das mudanças climáticas: qual é o nível tolerável de aquecimento? Esta discussão esteve presente nos relatórios do IPCC, nos fóruns políticos globais, e nos congressos acadêmicos, com conclusão quase consensual de que 2 °C é o nível máximo tolerável. Mas o livro de Nordhaus dedica a ela uma única página, onde conclui que a ciência relativa aos limiares é “inconclusiva”. Poder-se-ia discordar do consenso, mas nada justifica a sua omissão. Até porque Nordhaus aceita de maneira irrestrita as demais conclusões do IPCC.

3.1.2 Ponderação para a igualdade

Um modelo agregado teoricamente não poderia incluir o procedimento de ponderação para a igualdade, pois, por definição, este trata da distribuição espacial e / ou pessoal dos impactos. Mas os danos do DICE-2007 resultam da agregação dos danos do RICE, de forma que poderia ter sido implementando o procedimento (na verdade, como argumentou Pearce (2003), a ponderação é feita de qualquer maneira, seja para a igualdade ou para a desigualdade). Mas não foi: “[t]he analysis does not make any case for the social desirability of the distribution of incomes over space or time of existing conditions, any more than a marine biologist makes a moral judgement on the equity of the eating habits of marine

organisms” (NORDHAUS, 2008: 40).

O paralelo não parece adequado, todavia, pois há uma diferença ética entre a maneira como se tratam seres humanos e a maneira como se tratam organismos marinhos; e o índice de Gini do consumo *per capita* dos cardumes é menor (supõe-se) do que o das sociedades humanas. É bem provável, além do mais, que os biólogos marinhos não sejam tão facilmente iludíveis pelo elegante porém regressivo critério de Kaldor-Hicks.

O uso de metáforas é uma ferramenta importante para a transmissão ao público de idéias intrincadas, mas tem efeito contrário ao desejado quando faz uso de comparações inadequadas para justificar procedimentos metodológicos eticamente questionáveis.

3.1.3 Procedimento de desconto

A Tabela 5 mostra que a taxa de desconto (r) adotada por Nordhaus praticamente caiu pela metade em três décadas. O que é natural, dado que ele procura manter essa variável consistente com as taxas de juros de longo prazo observadas no mercado (i). Por exemplo, em 1973 ele argumentou que $r = 10\%$ se aproximava da produtividade média dos investimentos em 1968, ou o retorno médio do capital, e que um valor inferior só deveria ser adotado caso se esperasse que i fosse cair no futuro (e caiu, pois as taxas de retorno da década de 1960 foram totalmente excepcionais na história do capitalismo).

O consumo rápido dos recursos energéticos no presente (decorrente de altas taxas de desconto) geraria dinheiro para investimentos em inovação que pudessem levar ao surgimento de uma *backstop technology* (NORDHAUS, 1973: 547 – 9). Não na análise de Nordhaus, no entanto, pois essa tecnologia tinha (e tem) dinâmica exógena ao modelo.

TABELA 5 – valores adotados para os parâmetros e variáveis da equação de Ramsey por alguns dos mais importantes modelos econômico-climáticos.

	ρ	η	g	r
Nordhaus (1974)	–	–	–	10,0%
Nordhaus (1980)	1,0%	2,0	3,0%	7,0%
Cline (1992)	0,0%	1,5	1,0%	1,5%
Nordhaus (1993)	3,0%	1,0	1,3%	4,3%
Stern (2007)	0,1%	1,0	1,3%	1,4%
Nordhaus (2008)	1,5%	2,0	2,0%	5,5%

Já a taxa de desconto do tempo, ρ , que Nordhaus admite ser um parâmetro normativo, começou em 1%, subiu para 3%, passou a ser declinante no longo prazo para considerar a incerteza (NORDHAUS, 1998), e agora assume o valor fixo de 1,5%. O mesmo vale para η , também normativo, que variou entre 1 e 2 nos diferentes trabalho de Nordhaus.

Arbitrariedade

Nota-se uma certa arbitrariedade na determinação dos parâmetros normativos, que é acompanhada da alta sensibilidade da taxa de desconto de ativos – reconhecida por Nordhaus como a variável de maior importância em modelos econômico-climáticos – à conjuntura do mercado financeiro.

Nordhaus se deparou com a necessidade de adotar uma taxa de desconto ainda na época em que trabalhava com economia da energia, em 1973, quando defendeu que a distinção entre as taxas de desconto pública e privada se devia a dois fatores: risco e impostos sobre a renda⁴². Neste caso, todavia, justificar-se-ia uma taxa de desconto social, ao contrário do que ele sempre advogou. Já em relação ao desconto do tempo, ele ponderou que “[g]enerally, except for the possibility that later generations may not be here to enjoy consumption, it is hard to defend a social rate of time preference above zero” (NORDHAUS,

⁴² Na ausência de um mercado de seguros suficientemente eficiente, os riscos fazem com que a rentabilidade do negócio caia – no contexto da análise de mercados energéticos –, e os empresários tenham de repassar as perdas para o consumidor, de modo que a taxa de retorno privada (i) se mantém mais alta do que a social. O imposto sobre a renda gera efeito semelhante (NORDHAUS, 1973: 535).

1980: 14). Curiosamente, no entanto, acabou adotando o valor de 1%.

Quando se vê que a indefinição não é apenas concreta, no âmbito dos números efetivamente empregados, mas também na concepção teórica do procedimento de desconto (mostra-se favorável a uma taxa de desconto social distinta da taxa privada, mas segue outro caminho; admite que é injustificável taxa de desconto do tempo positiva, e assume exatamente a postura injustificável), fica muito dúbia a legitimidade dos cálculos, que poderiam facilmente ter sido construídos de forma a sustentar um resultado pré-definido.

Exemplo artificial

Nordhaus (2008) utiliza exemplo semelhante ao empregado na Tabela 4 para justificar o procedimento de desconto. Presume que árvores cresçam 5% ao ano, e que, nesse caso, 105 árvores em t_1 corresponderiam a 100 árvores em t_0 . Mas omite o fato (empírico)⁴³ de que as florestas não crescem a 5%, mas diminuem a 0,6%, o que faz com que 100 árvores hoje correspondam a 99,4 árvores amanhã.

A adoção de uma taxa de desconto social igual às taxas de retorno privadas ($r = i$) é, pois, justificada por um raciocínio indutivo que parte de uma observação artificial da realidade. Dada a observação verdadeira, é possível concluir que Nordhaus (1973) tinha mais razão do que Nordhaus (2008).

Critério organizador

A relação de Ramsey é, para Nordhaus (2008), o principal critério organizador de decisões de investimento intertemporal. Retomando a Equação (3), tem-se uma variável endógena r que é determinada pela interação entre a variável g (que é dada, $g = g^*$) e os parâmetros normativos ρ e η . Ao mesmo tempo, Nordhaus (2008) argumenta que r deve necessariamente acompanhar i , o que, na prática, a torna exógena, pois i também é dada (ou seja, $r \approx i^*$). O princípio organizador de Nordhaus fica, então:

⁴³ Hansen, Stehman & Potapov (2010).

$$\rho + \eta g^* \approx i^* \quad (15)$$

O que equivale a:

$$\rho \approx i^* - \eta g^* ; \eta \approx (i^* - \rho) / g^* \quad (16)$$

Assim, o que pode ser determinado livremente (normativamente) não são os valores de ρ e η , como afirma Nordhaus, mas o valor de um desses parâmetros condicionado ao valor que foi livremente escolhido para o outro. Nesse caso, seria possível utilizar $\rho = 0,1\%$, como fez Stern, mas η seria forçosamente igual a 2,7, para $g^* = 2\%$ e $i^* = 5,5\%$.

O que isso significa?

Na prática, o parâmetro ρ não pode ser muito diferente de zero, pelas razões expostas no item 2.4.1 e aceitas, inclusive, por Nordhaus (1980). Nesse caso, o parâmetro η (que engloba três funções: aversão à desigualdade intertemporal e intratemporal, e aversão ao risco) torna-se endógeno, o que faz com que perca a sua função. Ou seja, a interpretação de Nordhaus da relação de Ramsey exclui a possibilidade de determinação (empírica ou normativa) de um dos parâmetros éticos fundamentais do modelo.

Como se nota, a equação de Ramsey funciona como uma camisa de força a impedir que sejam adotados procedimentos de desconto condizentes com a realidade. Um modelo mais adequado utilizaria múltiplas taxas de desconto, adotando valores negativos para os agregados com taxas de crescimento negativas, como é o caso da maior parte das funções ecossistêmicas e dos componentes da estrutura ecossistêmica. Mas isso exigiria a superação do critério organizar de Ramsey.

3.1.4 Incerteza

William Nordhaus (1980) esteve entre os primeiros a aplicar cálculos do tipo *best guess* a modelos econômico-climáticos. Argumentou que mesmo na presença de incerteza, o procedimento adequado era realizar o cálculo determinístico e proceder como se fos-

se um mundo de certezas, pois esse seria o método universalmente aceito. Tal procedimento só não se aplicaria se (i) os efeitos das ações fossem altamente não lineares (pois, nesse caso, a trajetória adequada poderia ser bem diferente do *best guess*) e/ou (ii) as incertezas pudessem ser resolvidas com o tempo.

Não haveria, até então, evidência de altas não linearidades, exceto para o caso de eventos climáticos extremos; já em relação a (ii), ele afirmou que as incertezas poderiam, sim, ser resolvidas com o tempo, o que implicaria na inadequação do exercício *best guess*. Talvez por isso ele tenha recomendado, pelo menos por dez anos, não investir em mitigação e investir tudo em aumento do conhecimento sobre o assunto (foi exatamente o que se fez nos anos 1980).

Três anos depois, no entanto, Nordhaus & Yohe (1983) criaram um modelo probabilístico completo, que lançaria as bases para os desenvolvimentos futuros do método. O que fez com que Nordhaus mudasse de opinião em relação ao artigo de 1980, e afirmasse que a estratégia determinística não era conveniente para o caso das mudanças climáticas, uma vez que as funções densidade de probabilidades eram assimétricas e os danos não lineares: “[t]he threat of an unforeseen calamity argues for a more aggressive action than a plain-vanilla cost-benefit analysis would suggest (...)” (NORDHAUS, 1990b: 207).

Ambiguidade

Mesmo assim, o trabalho de 1983 foi o único em que ele incorporou técnicas probabilísticas como parte central do modelo. Por outro lado, não deixou de admitir que “*it appears that uncertainty about the size and impacts of future climate change would add a significant risk premium to, perhaps even doubling, the 'best guess' policies analyzed here*” (NORDHAUS, 1993a: 38). Opinião que mudou, todavia, mais recentemente.

O tratamento da incerteza no DICE-2007 tem dois componentes. O primeiro é a execução do modelo através do convencional procedimento de cálculo da utilidade esperada, que utiliza as estimativas centrais de todos os parâmetros e opera como se não existisse incerteza. Em seguida, Nordhaus realiza simulações de Monte Carlo, procurando calcular o

prêmio de risco que a explicitação da incerteza adiciona aos resultados determinísticos.

Oito parâmetros são escolhidos para as simulações de Monte Carlo: (i) a taxa de crescimento da produtividade total dos fatores ($A'(t)$), que varia entre 0,0052 ao ano e 0,0132; (ii) a taxa de mitigação ($\mu(t)$), que varia entre 5% e 9%; a população assintótica ($L(600)$), que varia entre 6,7 e 10,5 bilhões; o custo da *backstop technology* ($\theta_1(t)$), que varia entre US\$ 191 / t CO₂ e US\$ 447; o coeficiente da função de danos (ψ_2); a sensibilidade climática (α), que varia entre 1,89 °C e 4,11 °C; a disponibilidade total de combustíveis fósseis; e a taxa de retenção atmosférica de CO₂. Os intervalos de incerteza foram determinados pelo próprio autor, que obteve a melhor informação disponível (quando possível) e duplicou o tamanho do intervalo.

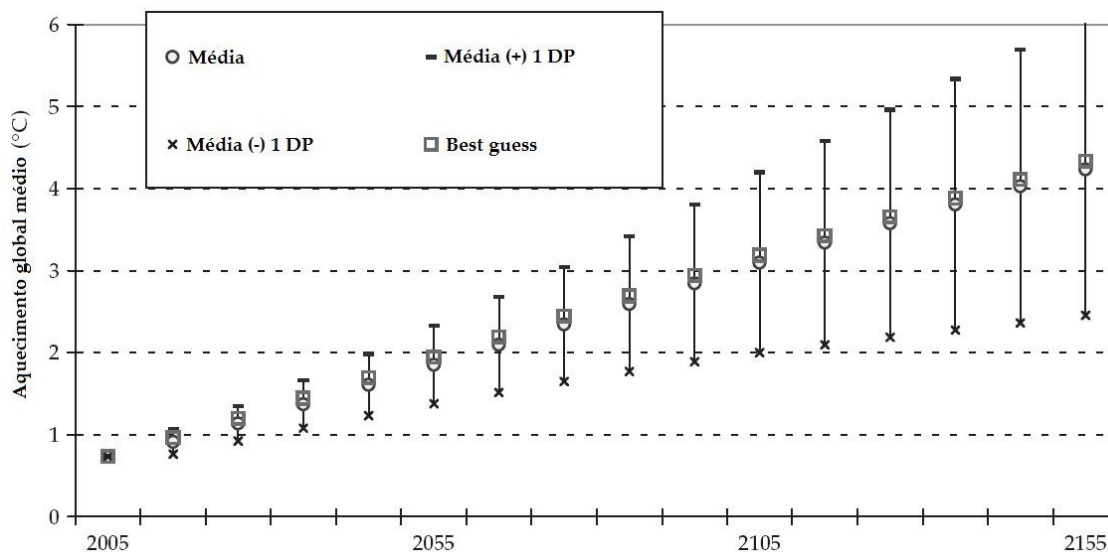


FIGURA 7 – bandas de incerteza para a temperatura global média no cenário *business as usual* (BAU); 2005 a 2155; DICE-2007.

DP = desvio-padrão.

Fonte: adaptado de Nordhaus (2008: 135).

Presumindo distribuição normal desses parâmetros, Nordhaus realiza 100 simulações de Monte Carlo, que o levam a concluir que os dois parâmetros incertos com maior influência sobre os resultados são $A'(t)$ e α . O motivo para se adotarem distribuições normais é que as suas propriedades são melhor entendidas, de forma que a modelagem se torna mais simples. O resultado está reproduzido na Figura 7.

Os resultados são os esperados: dispersão simétrica em torno da média, já que se adotaram fdps normais, bandas de incerteza crescentes no tempo, e aquecimento catastrófico nos cenários mais pessimistas (média mais um desvio-padrão). Com um número pequeno de rodadas, a probabilidade de combinação de valores extremos de todos os parâmetros ao mesmo tempo é quase nula, o que exclui os cenários mais pessimistas possíveis. Por isso, a elevada amplitude das bandas no exercício de Nordhaus é evidência de que a possibilidade de ultrapassagem de limiares perigosos é bastante real.

Ambiguidade 2

Mas as conclusões de Nordhaus não são essas. Ele prefere notar que o *best guess* das simulações de Monte Carlo é praticamente indistinguível da média, e afirmar que “[t]here appears to be no empirical ground for paying a major risk premium for future uncertainties beyond what would be justified by the averages (...)” (NORDHAUS, 2008: 28). Como a probabilidade de erro dessas estimativas seria de 1/3 (ele não diz de que cartola tirou esse número), faria sentido se ater às médias. Ou, em português claro, a incerteza seria irrelevante, e a política pública poderia operar com base na teoria da utilidade esperada.

Duas observações quanto a isso: a primeira é que o tratamento formal da incerteza é feito, geralmente, para se ter uma idéia das situações *extremas* e *possíveis*, e não para se calcular o “equivalente certeza” e tomar decisões com base nisso; a segunda é que, caso este último fosse o procedimento desejado, não faria sentido a adoção de fdps simétricas, pois por definição elas geram resultados muito próximos da média.

Ambiguidade 3

Nordhaus vai além dos argumentos acima, e afirma que é incorreta a tese de Weitzman (2007) de que, devido às caudas longas das fdp climáticas, e à correspondente possibilidade de elevadas perdas futuras de bem-estar, justifica-se a imposição de um elevado prêmio de risco no presente. Nordhaus separa os resultados das 100 rodadas de Monte Carlo em duas partes, uma pessimista e outra otimista, e tira uma média de cada uma delas, concluindo que a perda de bem-estar no cenário otimista é de 1,6%, ao passo que no cenário pessimista é de 4%. Diz, então, que no cenário pessimista o mundo será muito mais rico do que no cenário otimista (metáfora da caverna), de forma que não faria sentido pagar hoje para evitar perdas futuras pouco significativas.

O argumento de Weitzman, todavia, ficou distorcido nesse raciocínio. Aquilo que Weitzman chama de catástrofe escondida nas caudas longas das fdps é uma queda de 50%, 80%, ou até 100% do bem-estar futuro, e não uma marolinha de 4%.

*

É difícil entender as razões por que Nordhaus se esforça tanto para justificar o uso dos convencionais modelos determinísticos de análise de custo-benefício, mesmo quando admite que são falíveis, e que o princípio da precaução é aceitável no caso das mudanças climáticas.

O mais provável é que reconheça que os métodos bayesianos não podem lidar com a incerteza forte, de forma que rejeita os modelos probabilísticos (que aplicam probabilidades subjetivas a todo e qualquer parâmetro incerto). Concentra-se, com isso, naqueles fatos que são razoavelmente conhecidos (incerteza fraca) e, portanto, permitem que haja um grau mínimo de acurácia na aplicação da teoria da utilidade esperada.

Quanto aos fatos desconhecidos, prefere acreditar que logo serão resolvidos, e poderão, com isso, ser inseridos em modelos determinísticos: [w]e *should start with the clear present dangers, after which we can turn to the unclear and distant threats*” (NORDHAUS, 2008: 147). “*The possibility that uncertainties about climate change might soon be resolved argues for postponing actions until knowledge is more sound (...) The best*

investment today may be in learning about climate change rather than in preventing it (idem, 1990b: 207).

3.1.5 Outros temas

Uma importante omissão de modelos agregados como o DICE são os benefícios secundários da transição para uma economia de baixo carbono. Além da ausência dos efeitos dinamizadores de um novo padrão tecnológico, omitem-se os efeitos ambientais positivos da redução de emissões de GHG, como a queda dos níveis gerais de poluição e outros benefícios decorrentes da diminuição da combustão. Como esses modelos se resumem a uma parte da estrutura ecossistêmica, o clima, não são capazes de captar externalidades ambientais positivas ou negativas (a mitigação de emissões também pode ter efeitos colaterais negativos). Uma análise complementar precisaria estudar os *trade-offs* ambientais envolvidos na política climática.

Uma segunda característica evidente no DICE é a primazia da tratabilidade matemática na determinação dos procedimentos metodológicos. Pelo menos quatro procedimentos fundamentais decorreram de questões puramente operacionais: $\eta = 1$ (em versões anteriores do modelo); $\beta = 2$; retornos constantes de escala na função Cobb-Douglass; e distribuição normal das fdps dos parâmetros incertos.

Um quinto procedimento que ficou escondido nas notas de laboratório do DICE-2007 só pôde ser esclarecido por meio de troca de *e-mails* em agosto de 2009. Sugerimos ao Prof. Nordhaus que havia um equívoco nas linhas de programação de seu modelo, pois a variável $M_{AT}(t)$ da Equação (13) estava (e está) calculada como função de $M_{AT}(t+1)$, o que é cronologicamente impossível. E obtivemos a resposta: “[i]t is correct, although counterintuitive. Because of the long time lags in the model this procedure has to be used.”

O terceiro problema de destaque é a tentativa de prever o imprevisível, ou de projetar o improjetável. A parametrização de modelos de simulação é forçosamente dependente do comportamento passado do sistema estudado. Quando os modelos são agregados e não incorporam aprendizado, acabam projetando um futuro igual ao passado, apenas com

mais tempo e mais acumulação de estoques. Como em prazos longos as quebras estruturais são certas, os modelos agregados são erros certos. Já os modelos que incorporam funções de aprendizado têm mais chance de acertar, pois são capazes de produzir novidade.

O último comentário remete à diferença entre arbitrariedades e procedimentos objetivos de tratamento da incerteza. A primeira é sinônimo de chute. O segundo requer a explicitação de uma regra a ser seguida no caso de não haver informações disponíveis: tirar uma média, utilizar o valor de uma variável semelhante, consultar um especialista, etc. O trabalho de Nordhaus possui as duas coisas, mas só a segunda fica explícita. Funtowicz & Ravetz (1994) descreveram com detalhes as arbitrariedades de uma versão anterior do DICE, e mostraram que por trás da presuntiva objetividade e precisão existe um importante componente de adivinhação.

3.1.6 Resultados e implicações

O resultado mais fundamental da obra de Nordhaus é de que um imposto internacionalmente harmonizado sobre o carbono é mecanismo necessário e suficiente para resolver o problema das mudanças climáticas. *“The rest is at best rethoric and may actually be harmful in inducing economic inefficiencies”* (NORDHAUS, 2008: 22).

A teoria que fundamenta essa conclusão normativa foi apresentada no item 2.1.1. Já o argumento principal que Nordhaus usa para defender a regulação de preços em vez de quantidades é o de que, ao não se saber com precisão quais são os verdadeiros limites perigosos (e nunca se saberá, pelo menos antes de ultrapassá-los), não há razão para que a política pública busque limitar as emissões a uma quantidade específica. Mas ele omite o fato de que, na presença de incerteza quanto aos limites, também é imperfeita a determinação dos preços ótimos do carbono pelo cálculo marginal (VALE, 2008).

Caso se determine um teto quantitativo que, depois, venha a ser baixo demais, haverá perdas econômicas que são contornáveis por mecanismos de flexibilização das regras. Por outro lado, se o preço ótimo calculado vier a ser excessivamente baixo, o risco que se corre é mais do que econômico, podendo as consequências ser catastróficas, já que

os ecossistemas não são lineares e possuem limites de resiliência (Apêndice 2).

De qualquer maneira, a estratégia com maior potencial político é a de países ou regiões lançarem programas individuais de *cap-and-trade*, geralmente com certas funcionalidades que os aproximam do mecanismo de preços, mas com foco no estabelecimento de um teto de emissões. No fundo, há um certo acordo entre os economistas de que o que realmente interessa é que se encareçam as emissões, seja com preços ou com limites quantitativos (ALDY, BARRET & STAVINS, 2003; STERN, 2007).

O que realmente distingue a proposta de Nordhaus e, de maneira mais geral, a da corrente gradualista, é a idéia de que toda estratégia complementar à precificação do carbono (redução do consumo, subsídios, comando e controle, entre outras) é pior do que nada. A fundamentação dessa tese é a premissa implícita de que mercados livres, com externalidades corrigidas, são Pareto-eficientes, e isso é o máximo que a política pública pode almejar. Não há resultados formais de modelos que permitam excluir políticas de comando e controle ou de mudança comportamental – pelo menos na obra de Nordhaus.

Com relação às metas da política de mitigação de emissões, Nordhaus analisa dezesseis distintas propostas, oito das quais estão reproduzidas na Tabela 6.

As melhores políticas seriam as que apresentam maior diferença entre o resultado da função objetiva e o cenário base. Destaca-se a política ótima, que a cada período iguala custos marginais a benefícios marginais, produzindo ganho máximo em relação ao cenário base, e fazendo com que a relação benefício / custo seja máxima. As piores seriam a proposta de Stern, a limitação da concentração atmosférica de CO₂ a 1,5 vezes o nível pré-industrial, e a limitação do aumento da temperatura a 1,5 °C em relação a 1990. Estas possuem relação benefício / custo inferior a um, o que indica que são piores do que a inação.

Nordhaus afirma que o cenário ótimo (*first best*) é apenas parâmetro de comparação para as demais propostas, e o papel do tomador de decisão seria calcular a distância em relação a ele das possibilidades alternativas. Os critérios de comparação são subjetivos (bem-estar agregado, também chamado de função “objetiva”) e econômicos (relação benefício / custo); as demais variáveis são apenas consequências da política eficiente. As propostas mais atraentes, então, poderiam ser consideradas *second best*, e a sua implementação es-

taria justificada. A Tabela 6 mostra que, segundo os critérios de Nordhaus, retardar em 50 anos o início da mitigação é uma opção *second best*.

TABELA 6 – propostas de política analisadas pelo DICE-2007 e seus resultados.

Política			Preço do Carbono (US\$ de 2005 / t C)		Variação de T (em relação a 1900) ¹		Concentração de CO ₂ na atmosfera		
	Bem-estar agregado BAU ²	Benefício custo	2010	2100	2100	2200	2050	2100	2200
Ótima	3,37	2,4	33,8	204,4	2,61	3,47	480,9	586,4	658,5
Atraso 50 anos	2,34	2,4	0	203,6	2,72	3,52	507,9	602,9	667,6
Limite 1,5xCO₂	-14,87	0,5	189,7	762,1	1,61	1,78	420,2	420,2	420,2
Limite 2xCO₂	2,88	1,7	39,6	445,5	2,48	2,84	479	557,8	558
Limite 1,5 °C	-14,73	0,5	140,8	899,1	1,5	1,5	434,4	400,4	388,2
Limite 2 °C	-1,6	0,8	60,2	863,4	2	2	466,2	464,9	442,2
Limite 2,5 °C	2,27	1,4	42,2	539,5	2,41	2,5	477,3	544,4	504,6
Proposta Stern³	-16,95	0,5	305,2	948,9	1,52	1,27	417	404,4	361,2

1 – T = temperatura. Nordhaus utiliza ano base (1900) distinto do padrão da literatura, de forma que estes números não são perfeitamente comparáveis com outros estudos; **2** – razão entre o bem-estar agregado da política em questão e o bem-estar agregado do cenário base, *business as usual*; **3** – note-se que Nordhaus empregou um procedimento bastante particular para simular a proposta de Stern, de forma que as estimativas calculadas não correspondem aos números originais do relatório Stern.

Fonte: adaptado de Nordhaus (2008: 82 – 103).

Porém, como se discutiu acima, essa análise está atrelada a um entendimento específico do processo de decisão sob incerteza, cuja “gramática” corresponde ao marginalismo pigouviano, e cujo “vocabulário” são os preços de mercado.

É perfeitamente aceitável que se adote a perspectiva alternativa, que recorre à “gramática” da análise de risco e ao “vocabulário” das unidades físicas e biológicas. Segundo esta outra visão, característica da corrente precaucionista, o cenário *first best* é aquele com mais chances de evitar perigos desconhecidos – limite de aumento da temperatura a 2 °C. Nesse caso, as trajetórias desejáveis são as que se aproximam da antepenúltima linha da

Tabela 6, não em termos de função objetiva, mas em termos de temperatura e de concentrações atmosféricas de CO₂. E a opção *second best* passa a ser a proposta de Stern.

*

Ao mesmo tempo em que aceita a possibilidade de atrasar em 50 anos o início da mitigação, Nordhaus é radical em relação à taxa de participação dos países, chegando a defender implicitamente que, se não houver participação completa ou quase completa, é melhor que não se faça nada, pois a relação benefício / custo passa a ser menor do que um. Os condicionantes da política eficiente são, assim, um imposto globalmente harmonizado e uma taxa de participação próxima de 100%. Satisfeitas essas condições, resta à política pública apenas garantir que as metas de redução de mitigação cresçam gradualmente. Já se os condicionantes não forem cumpridos, a recomendação (implícita) de Nordhaus é a inação.

“There is also potential for a major waste of resources if the greenhouse policies go too far (...) the difference between a climate-change and a no-climate-change scenario would be thinner than the line drawn by a number 2 pencil used to draw the curves. Thanks to the improved resolution of computerized graphics, we can now barely spot the difference!” (Nordhaus, 1993a: 47 – 48).

As implicações do DICE-2007 podem ser resumidas, de maneira caricatural, a três caminhos possíveis: o ideal, em que se implementam metas involuntárias não muito diferentes das de Quioto, aplicadas a todo o mundo por meio de um imposto sobre as emissões de carbono – que conduz a um futuro de quatro mansões por família; o intermediário, que conduz a um mundo misterioso sujeito a riscos razoavelmente elevados, mas onde o bem-estar é bem superior ao atual, apesar de menos sensacional do que no mundo ideal – neste caso, a política pública é do tipo *laissez-faire*; e o mundo das cavernas, que pode decorrer de taxas de mitigação muito elevadas no presente, da falta de cooperação internacional em acordos do clima, ou da adoção de instrumentos econômico-climáticos ineficientes. A ordem de desejabilidade é inequívoca.

3.2 DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO

Quatro fatos sobre o trabalho de William Nordhaus

Como coautor de um dos mais influentes manuais de macroeconomia (a partir de 1985, com Paul Samuelson), Nordhaus é um dos grandes responsáveis pela inércia da economia tradicional (fato 1). É porta-voz do pensamento neoclássico moderno, que preferimos chamar de convencional: aquilo que chegou a um consenso tal na academia que conseguiu entrar nos manuais, tornando-se prática corrente da economia aplicada.

Nordhaus é também um economista aplicado, no sentido de que trabalhou bem mais com estudos empíricos do que com teoria (fato 2). Os seus desenvolvimentos teóricos estiveram cronologicamente concentrados no final dos anos 1960 (ver Apêndice 1), quando ele ainda era bastante jovem. Depois disso, o grosso de seu trabalho foram modelos agregados de crescimento econômico aplicados ao problema da alocação dos recursos naturais.

Nordhaus teve e tem grande interesse pelo debate da economia ambiental, e é um dos principais oponentes das idéias da economia ecológica (fato 3). Tem para isso alguns argumentos razoáveis e outros ruins, mas a maior parte é pura retórica. Em geral, tem-se a clara impressão de que ele não entendeu o fato de que a termodinâmica tem repercussões sobre a economia, deixando, com isso, de absorver a tese essencial, de que há limites para a expansão econômica. Pode-se divagar quanto às razões para isso, mas o fato é que Nordhaus não admite a possibilidade da existência de limites para o crescimento do PIB, e isso fica claro na premissa de uma *backstop technology* que ele incorpora a seus modelos.

Trata-se, em síntese, de um dos principais personagens da resistência da economia ambiental à incorporação de limitações biofísicas aos modelos econômicos.

Por outro lado, ele é pai da economia das mudanças climáticas, e quase todos os procedimentos metodológicos da área decorrem, em alguma medida, do seu trabalho (fato 4). Os modelos de outros autores derivam diretamente de modelos dele, se contrapõem a modelos dele, ou se amparam em procedimentos desenvolvidos por ele. Nordhaus é figura

onipresente. É, além do mais, o principal responsável pela construção de um paradigma dos estudos econômico-climáticos.

O DICE

Uma avaliação sintética do DICE-2007 leva à enumeração dos seguintes pontos positivos e negativos:

Ponto positivo: transparência e elucidação clara dos diversos procedimentos metodológicos adotados e de suas ressalvas.

Ponto negativo: ambiguidade em relação às conclusões e procedimentos de outras versões do modelo e de outros trabalhos do autor (*e.g.*: tratamento da incerteza, prêmio de risco para catástrofes, procedimento de desconto).

Ponto positivo: disponibilização das notas de laboratório e do código de programação torna o modelo facilmente replicável.

Ponto negativo: irrealismo das premissas fundamentais do modelo: retornos constantes de escala, mercado competitivo, firmas atomizadas, entre outras.

Ponto positivo: representação do sistema climático é agregada e simplificada mas reproduz bastante bem os cenários dos modelos biofísicos.

Ponto negativo: ausência de dinâmica tecnológica.

Ponto positivo: agregação feita com base no modelo desagregado RICE torna os resultados mais robustos.

Ponto negativo: primazia da tratabilidade matemática.

Ponto positivo: modelagem da incerteza.

Ponto negativo: interpretação inadequada dos resultados das simulações de Monte Carlo.

Ponto positivo: estudo das diversas propostas de política existentes.

Ponto negativo: superestimação dos custos na equação de custos de mitigação.

Ponto positivo: inclusão na curva de danos da possibilidade de catástrofe.

Ponto negativo: ausência de ponderação para a igualdade.

O DICE possui dois grandes atrativos: o primeiro é a maneira como é comunicado, que facilita o diálogo, permite a replicação e viabiliza a adição de novos setores, novas equações e novas variáveis; e o segundo tem a ver com os ganhos de escala de um modelo que já existe há vinte anos, foi reproduzido nos mais diversos contextos, e foi projetado para aproveitar as vantagens de um modelo desagregado (o RICE) sem precisar pagar os custos da desagregação.

A força do DICE reside no seu papel de catalizador do debate, de referência para as discussões teóricas e metodológicas, e de síntese do conhecimento positivo cristalizado na corrente gradualista. Em termos epistemológicos, o DICE é a chave da ciência “normal” em economia das mudanças climáticas, fornecendo ao pesquisador que o adota a linguagem de uso comum e corrente nos *papers* especializados, os *puzzles* que estão postos nos meios acadêmicos, e o instrumento que, quando corretamente aplicado, terá seus resultados reconhecidos pela comunidade científica.

Como qualquer sistema evolutivo, a ciência exhibe dependência da trajetória, de forma que a posição central do DICE no debate contemporâneo está intimamente associada ao seu pioneirismo no tratamento econômico do problema climático.

A principal fraqueza do modelo são os pilares teóricos e metodológicos que o sustentam. A concepção neoclássica, walrasiana, ou samuelsoniana da economia tem se mostrado inadequada para o estudo da sustentabilidade de sistemas socioambientais (ACKERMAN & NADAL, 2004; BARKER, 2008), e o fato de que os seus resultados no estudo das mudanças climáticas vão de encontro aos dos modelos biofísicos é um sinal disso.

O estudo do principal modelo econômico-climático de William Nordhaus, em suma, é um primeiro e importante passo para o entendimento da situação da pesquisa na área, mas deve ser seguido de outros passos que levem à sua superação. O próximo capítulo apresenta o relatório Stern, o mais relevante trabalho acadêmico a ter questionado os fundamentos da corrente gradualista nos últimos quinze anos.

CAPÍTULO 4

O RELATÓRIO STERN

O relatório Stern foi encomendado pelo então Ministro da Economia do Reino Unido, Gordon Brown, ao ex-economista chefe do Banco Mundial e então segundo secretário do Tesouro britânico, Nicholas Stern, em julho de 2005, para ser concluído quinze meses depois. Lord Stern é um macroeconomista da elite da profissão que desenvolveu pesquisas na área de crescimento econômico, foi professor da Universidade de Oxford e atualmente dá aulas na *London School of Economics*.

Resultado do trabalho de uma equipe de 23 pesquisadores do governo britânico⁴⁴, entre climatologistas e economistas, e de uma série de estudos encomendadas a terceiros, é o mais completo estudo econômico das mudanças climáticas já publicado⁴⁵.

Pode-se dizer que o documento, lançado numa época em que o tema das mudanças climáticas ressurgia na agenda política global depois de alguns anos de marasmo, cumpriu o seu objetivo principal, que era o de mobilizar a opinião pública no sentido de maior comprometimento com uma estabilização da concentração atmosférica de GHG na casa dos 500 ppm (STERN, 2007: ii). O fato de um ex-economista chefe do Banco Mundial, e não um ecologista, ter dito que um problema ambiental exigia medidas fortes e rápidas, e ter apontado números para legitimar essa idéia, foi o principal ingrediente do sucesso midiático do relatório (HOURCADE, AMBROSI & DUMAS, 2009).

Duas demonstrações disso são (i) a emergência de uma forte retórica governamental, principalmente entre os grandes *players* da geopolítica mundial, quanto à criação de

⁴⁴ Nicholas Stern, Siobhan Peters, Vicki Bakhshi, Alex Bowen, Catherine Cameron, Sebastian Catovsky, Di Crane, Sophie Cruickshank, Simon Dietz, Nicola Edmondson, Su-Lin Garbett, Lorraine Hamid, Gideon Hoffman, Daniel Ingram, Ben Jones, Nicola Patmore, Helene Radcliffe, Raj Sathiyarajah, Michelle Stock, Chrys Taylor, Tamsin Vernon, Hannah Wanjie, e Dimitri Zenghelis, que não constam como co-autores do livro, mas estão mencionados nos agradecimentos.

⁴⁵ Arrow (2007), Varian (2006) e Krugman (2010) fazem avaliações equilibradas do estudo.

uma “economia verde” (VALE, 2009); e (ii) a completa substituição dos resultados otimistas de quinze anos de modelos econômico-climáticos⁴⁶ por um consenso de que o aumento da temperatura não pode ultrapassar os dois graus Celsius.

O Parlamento britânico havia publicado um estudo em que levantava dúvidas sobre a relação entre custos e benefícios da mitigação (HOUSE OF LORDS, 2005). Lançou a hipótese de que o terceiro relatório do IPCC não teria apresentado um estudo formal de custo-benefício porque os custos, em termos monetários, superariam os benefícios, e o objetivo implícito do painel seria o de mostrar o contrário. Incitava, então, o Tesouro britânico a financiar um estudo em que os custos e benefícios de políticas de mitigação fossem considerados de maneira explícita, e com resultados expressos em termos monetários.

Daí a iniciativa de produzir o relatório Stern. O qual, todavia, por não ter seguido os caminhos convencionais de escrutínio dos estudos acadêmicos, foi apontado por muitos como politicamente enviesado (NORDHAUS, 2007; SPASH, 2007; WEITZMAN, 2007; YOHE & TOL, 2007). Argumento que tem sentido quando se leva em conta que: o governo trabalhista se esforçava para legitimar o uso da energia nuclear no país; a União Européia estava decidida a cortar fortemente as emissões, mas sem a adesão dos Estados Unidos e de alguns países em desenvolvimento, o esforço seria em vão; o Reino Unido será particularmente afetado pelas mudanças climáticas devido à elevação do nível do mar, ao maior risco de enchentes e à possibilidade de colapso da corrente do Golfo. O autor e sua equipe, por outro lado, definem o relatório como “independente” (STERN, 2007a).

O possível viés político (problema que, de resto, também atinge o IPCC) é, portanto, a primeira característica do relatório Stern. Hipótese que se reforça na leitura do texto, que, devido a problemas empíricos, metodológicos e discursivos, deixa a impressão de ter sido construído de forma a legitimar resultados preestabelecidos.

Os dados empregados foram criticados por muitos como tendenciosos a uma visão pessimista dos impactos esperados e otimista das possibilidades de mitigação das emissões (CARTER *et. al.*, 2007; TOL, 2006; TOL & YOHE, 2006; WEITZMAN, 2007);

⁴⁶ “*These early models have given rise to a powerful and unjustified bias against strong and timely action on climate change*” (STERN, 2008: 21).

os cálculos econômicos foram pouco transparentes em algumas partes, confusos e ambíguos em outras, e diretamente enganadores em certos momentos (ver item 4.3); e no discurso, é notória a tendência a se ressaltarem os custos mais elevados do aumento da temperatura, mesmo quando ainda incertos e pouco estudados, e os menos elevados, mesmo quando pouco realistas, das tecnologias de mitigação de emissões⁴⁷.

A segunda característica que marca o relatório é o seu caráter de compêndio da ciência até então existente em relação ao assunto, com maior atenção aos aspectos econômicos. Dos 27 capítulos em que estão divididas as 692 páginas do livro, quatro trataram de temas que estão completa ou quase completamente fora do escopo da economia, ficando todo o resto dedicado a algum tipo de análise econômica: cálculo dos custos e dos benefícios, modelo econômico-climático, políticas públicas para a mitigação e para a adaptação, e coordenação internacional. O livro é uma espécie de relatório do IPCC em versão amigável, e o foco na análise econômica faz com que seja, ainda hoje, uma síntese bastante completa e razoavelmente atualizada dos diversos debates que se estabelecem na economia do clima.

Finalmente, destaca-se no relatório a adoção de um conjunto relativamente plural de enfoques econômicos, característica imprescindível para um estudo que pretende abarcar as diversas facetas de temática tão complexa. Já no segundo capítulo se expõem, ainda que resumidamente, a crítica de Amartya Sen à economia do bem-estar e as discussões da filosofia moral sobre a ética da distribuição intertemporal do bem-estar (enfoques utilitarista, das capacitações, da generosidade, entre outros).

No Capítulo 16, o relatório emprega a literatura evolucionária (Schumpeter, Freeman) para tratar do tema do desenvolvimento tecnológico. Utiliza o conceito de curvas de aprendizado, e argumenta que o Estado deve assumir os investimentos que têm resultado de longo prazo e *spillovers* na economia (externalidades positivas), pois o setor privado é mais avesso ao risco e busca resultados de curto prazo (conclusão que vai de encontro à postura dos economistas alinhados à hipótese do mercado eficiente). No Capítulo 17, recor-

⁴⁷ Por outro lado, é perfeitamente possível argumentar que os modelos *benchmark* tendem a enfatizar custos elevados de mitigação e benefícios baixos. Por exemplo, a não endogeneização da tecnologia, o parâmetro arbitrário da função de danos e a desconsideração da incerteza produzem esse efeito.

re às literaturas institucionalista e comportamental (Simon, Kaneman e Tversky, Decanio) para dar suporte teórico ao estudo das atitudes dos indivíduos em relação a medidas economicamente racionais de economia de energia, tratando dos temas da racionalidade procedimental e da dependência da trajetória (STERN, 2007: 431 – 432).

As principais conclusões do relatório giram em torno das seguintes afirmações:

“If economics is used to design cost-effective policies, then taking action to tackle climate change will enable societies' potential for well-being to increase much faster in the long run than without action; we can be 'green' and grow. Indeed, if we are not 'green', we will eventually undermine growth, however measured” (STERN, 2007: viii, grifo nosso).

“The world does not need to choose between averting climate change and promoting growth and development. Changes in energy technologies and in the structure of economies have created opportunities to decouple growth from greenhouse gas emissions” (ibidem: xvii, grifo nosso).

A mensagem central é a de que os benefícios da ação forte e rápida superam em muito os custos econômicos da inação:

“Using the results from formal economic models, the Review estimates that if we don't act, the overall costs and risks of climate change will be equivalent to losing at least 5% of global GDP each year, now and forever [em termos do valor presente do PIB mundial de 2001 em diante, até o infinito]. If a wider range of risks and impacts is taken into account, the estimates of damage could rise to 20% of GDP or more” (ibidem: xv).

“(...) [Inaction] now and over the coming decades could create risks of major disruption to economic and social activity, on a scale similar to those associated with the great wars and the economic depression of the first half of the 20th century” (ibidem: 640 – 641).

“In contrast, the costs of action – reducing greenhouse gas emissions to avoid the worst impacts of climate change – can be limited to around 1% of global GDP each year” (ibidem: xv).

Esses resultados apontam para um cenário distinto do que os estudos econômicos convencionalmente sugeriram nos quase quinze anos que antecederam o relatório Stern – desde a publicação do livro de William Cline (1992). Os representantes do *establishment* da economia convencional, majoritariamente acadêmicos de Universidades estadunidenses, não tardaram em criticar o relatório Stern por destoar dos resultados estabelecidos nos modelos “*benchmark*”, legitimados por meio do processo de *peer-review*.

Por exemplo, Tol e Yohe (2006) afirmam que a média das estimativas dos estudos anteriores de custo dos impactos era de aproximadamente 1% do PIB, sendo o valor mínimo de -2% (custo negativo, ou seja, ganho) e o máximo de 5%; já o relatório Stern teria tido uma média de 12,5%, com mínimo de 5% e máximo de 20%. Ao mesmo tempo, esses autores reportam os resultados dos custos de mitigação de um estudo que apontam como realista, cuja estimativa central seria de 2,2%, variando entre 0% e 7,3%; os mesmos valores para o relatório Stern foram de 1%, -1% e 3,4%. Como é possível que um estudo baseado em compilação dos resultados da literatura, perguntem-se Tol & Yohe (2007), produza resultados que são perfeitos *outliers* em relação à literatura padrão?

Tentamos responder a essa pergunta descrevendo os procedimentos adotados por Stern e a sua relação com os resultados do modelo. Detalhes menos relevantes para esta dissertação são omitidos (para uma resenha completa, ver Godard (2008)). Os tópicos que seguem são: a análise de custo-eficiência (item 4.1); o modelo de simulação (item 4.2); o modelo *bottom-up* (item 4.3); e o tratamento do crescimento econômico (item 4.4). O tópico 4.5 conclui o capítulo.

4.1 ANÁLISE DE CUSTO-EFICIÊNCIA

O relatório Stern integra três componentes à análise de custo-eficiência. O primeiro é uma ampla discussão da ciência das mudanças climáticas, em que se estudam os riscos e impactos potenciais com base nos resultados dos modelos biofísicos – em unidades físicas e biológicas (capítulos 1, 3, 4, 5 e 13 do livro). Desse exercício deriva a meta de aquecimento máximo, que implica em uma meta de concentração máxima de GHG na at-

mosfera (*escala sustentável* de exploração dos sumidouros de carbono), que depende de uma certa trajetória de redução de emissões.

O segundo componente é um modelo de simulação, o PAGE-2002, que calcula os custos econômicos da inação, ou seja, do cenário BAU. O resultado desse modelo é confrontado com o custo de mitigação calculado para que se decida, então, pela ação ou inação (capítulos 2, 6 e 13 do livro). Daí o terceiro componente, a análise de custo-eficiência propriamente dita, que utilizando um modelo *bottom-up* determina o *mix* tecnológico ideal para que se atinja a trajetória esperada de mitigação (capítulos 9 e 10 do livro), e cujo resultado é confrontado ao resultado do IAM para justificar a ação precaucionária.

Este tópico discutirá sucintamente o primeiro componente da análise de custo-eficiência, que leva à determinação da escala máxima e da trajetória de mitigação, e os itens 4.2 e 4.3 discutirão o modelo de cálculo de custos da inação e o modelo *bottom-up*.

As figuras apresentadas nos Anexos 3, 4 e 5 deixam bastante claras duas idéias: (i) o avanço do conhecimento entre os anos de 2001 e 2009 leva à conclusão de que os impactos para um dado nível de temperatura são bem mais elevados do que se imaginava; e (ii) o patamar de 2 °C parece representar, de fato, o limiar entre risco excessivo e risco aceitável. O problema é que, pela natureza multivariada do fenômeno, pelas grandes incertezas envolvidas, e pelas assimetrias de todos os tipos (valores, poder, informação, métricas, unidades de medida, etc), é praticamente impossível que se calcule com precisão o grau de urgência da adoção de medidas para que não se ultrapasse esse limiar.

Na leitura de Stern (com base na análise dos resultados de vários modelos), a tentativa de ficar abaixo de 450 ppm CO₂e iria requerer a adoção de tecnologias muito custosas antes do seu período de maturação, para fazer com que as emissões parassem de crescer dentro de poucos anos, e isso seria demasiado caro. O limite de 500 ppm seria, então, a meta mais adequada, nível para o qual a temperatura média deveria aumentar entre 2,4 e 2,8 °C, de acordo com as estimativas do quarto relatório do IPCC (esse intervalo de temperatura é atribuído a uma concentração de entre 490 e 535 ppm CO₂e)⁴⁸.

Considerando-se que as emissões atuais são da ordem de 50 Gt CO₂e (UNDP,

⁴⁸ IPCC (2007a: 15).

2007), e que a absorção natural é da ordem de 7 a 12 Gt CO₂ por ano, sobem à atmosfera todos os anos aproximadamente 40 Gt CO₂e, ou 5 ppm (dos quais devem ser descontados os aerossóis, que têm efeito negativo, para que se obtenha a variação final da concentração). Com isso, a meta proposta por Stern requer que as emissões atinjam o máximo em 2012 e decresçam até aproximadamente 20 Gt CO₂e por ano em 2050, ou menos da metade do nível atual⁴⁹. Depois de 2050, com a diminuição da capacidade de absorção dos sumidouros (devido ao desflorestamento e ao próprio aumento da temperatura, que debilita a absorção oceânica e libera Metano do *permafrost*), a absorção natural deve cair para 5 Gt-CO₂e em 2150 e 1 Gt nos Séculos seguintes.

A implementação dessas metas exige uma gestão adequada do processo:

- uma *meta quantitativa de longo prazo clara e explícita* para o limite da concentração atmosférica de GHG (*e.g.*, máximo de 500 ppm CO₂e), sendo que o valor exato dependerá de considerações de risco e incerteza sobre a resiliência do sistema climático.
- *Metas de curto prazo* desenhadas de maneira consistente com o objetivo de longo prazo, de forma a garantir flexibilidade sobre quanto, como e quando se irá emitir. Dentro dos períodos mais curtos, as empresas teriam a possibilidade de adaptar as suas estratégias de emissões às flutuações de mercado sem comprometer a meta global.
- A *credibilidade* de que o objetivo será perseguido é essencial para os investimentos em ativos de longa duração. Equipamento de produção, processos produtivos e fluxos de investimento precisam se adaptar de maneira gradual ao teto de emissões de longo prazo, e se os agentes não tiverem certeza de que as políticas se manterão inalteradas, tenderão a postergar investimentos ou a especular. A melhor maneira de se garantir a credibilidade é a construção de uma institucionalidade regulatória que seja amplamente apoiada pela sociedade, pelo setor privado e pelos tomadores de decisão em geral.
- Fortes incertezas são uma propriedade da ciência e da economia das mudanças

⁴⁹ Estes números passaram a ser defendidos por Stern (2008a) um ano depois da publicação do relatório. Neste, trabalhava-se com uma faixa segura que variava entre 450 e 550 ppm CO₂e, e admitia-se pico das emissões entre 2015 e 2025, com emissões de 30 a 35 GtCO₂e em 2050.

climáticas, de modo que as políticas precisam ter *flexibilidade* para serem revistas quando novas informações surgirem. Correções são parte fundamental do processo.

- Para que o mercado de carbono fique estável, as revisões devem ser *previsíveis*, exatamente como numa regra de Taylor para metas de inflação. Se regras de revisão forem anunciadas e estritamente seguidas, as variações de preços terão menor impacto (STERN, 2007).

Apesar de o relatório Stern ser bem mais do que um modelo de cálculo dos custos da inação, o que mais causou impacto dentro e fora da comunidade acadêmica de economia foram os resultados do modelo de simulação.

4.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

Stern e sua equipe precisavam de um IAM com as seguintes propriedades: (i) horizonte de longuíssimo prazo, uma vez que os GHG permanecem na atmosfera por mais de 300 anos, e existe um intervalo de décadas entre emissão e danos; (ii) valoração mesmo de impactos de fora do mercado; (iii) foco no tratamento do risco e da incerteza; e (iv) eventos climáticos extremos, descontínuos e irreversíveis devem ser considerados.

Selecionaram o PAGE-2002 (*Policy Analysis of Greenhouse Effect*)⁵⁰, um modelo que se destaca por ser descritivo e probabilístico, pelo maior grau de explicitação das relações físicas e econômicas – o que implica em maior número de equações, 53 –, e por ser *top-down*: não desagrega os impactos em danos sobre os setores da economia, como fizeram Margulis e Dobeux (2010), por exemplo. Além do mais, a tecnologia é exógena e está incorporada no crescimento constante do PIB de 1,9% ao ano.

As principais equações do PAGE-2002 estão listadas no Anexo 6. Em relação ao bem mais compacto modelo de Nordhaus (2008), cabe mencionar oito diferenças: (i) desagregação espacial em oito regiões (União Européia, Estados Unidos, ex-União Soviética e Leste europeu, África e Oriente Médio, China e Ásia centralmente planejada, Índia e Su-

⁵⁰ Hope (2006).

deste asiático, América Latina, e outros OCDE); (ii) explicitação das emissões naturais, que crescem com o aquecimento; (iii) modelagem do fluxo de Sulfatos, aerossóis que diminuem o forçamento radiativo; (iv) endogenização dos três mais importantes GHG (CO_2 , CH_4 e SF_6); (v) desagregação regional da temperatura; (vi) inclusão de um patamar tolerável de aquecimento, que muda de acordo com as políticas de adaptação; (vii) possibilidade de uma descontinuidade climática; e (viii) explicitação dos custos de adaptação.

O PAGE-2002 roda em dez *time steps* que representam intervalos crescentes de tempo, começando pelo ano 2000 ($t = 0$), passando pelos anos 2001 ($t = 1$) e 2002, seguindo para 2010 ($t = 4$), 2020 e assim por diante até 2080 ($t = 7$), e saltando em seguida para 2100 ($t = 8$), 2150 e 2200. O relatório Stern adiciona um 11º *time step* que representa todo o período que vai de 2200 até o infinito.

O expoente β da função de danos (Equação 37) é um dos parâmetros do modelo que mais têm impacto sobre os resultados, como explica o relatório em seu pós-escrito (STERN, 2007: 660). Como todos os demais parâmetros incertos, β assume uma função densidade de probabilidades triangular, com valores mínimo igual 1, moda igual a 1,3, e máximo 3, seguindo o terceiro relatório do IPCC (Figura 8, lado esquerdo). A sensibilidade dos resultados a esse parâmetro é mostrada no Anexo 7, onde fica claro que o valor mais frequente nas simulações feitas pelo relatório Stern, de $\beta = 1,3$, gera danos inferiores aos do *benchmark*, que é o modelo de Nordhaus, para um aquecimento de 2,5 °C.

Mesmo quando a moda é alterada, passando a assumir $\beta = 2,25$, a curva de danos é inferior à de Nordhaus, o que indica que, para que o modelo do relatório Stern desse resultados iguais aos de Nordhaus, deveria adotar um expoente superior a 2,25. Como Nordhaus adota 2, conclui-se que, tudo o mais constante, o PAGE-2002 é menos pessimista, em termos do cálculo agregado de danos, do que o DICE.

A distribuição lognormal do lado direito da Figura 8 é uma versão modificada por Dietz (2009) da fdp do expoente da função de danos. Ele presume que 90% da fdp estão contidos no intervalo β igual a zero, moda igual a 2 (*benchmark*) e máximo 3, restando 10% de probabilidade de valores superiores a 3. A distribuição mais adequada segundo o *software @Risk* é a lognormal (logaritmo de β tem distribuição normal), que gera um valor míni-

mo de 0,6, moda de 1,7 e 99º percentil de 3,8. Com isso, e com a aplicação do mesmo procedimento ao parâmetro sensibilidade climática, Dietz encontrou probabilidades consideravelmente elevadas de catástrofes socioambientais, como discutido no Capítulo 2.

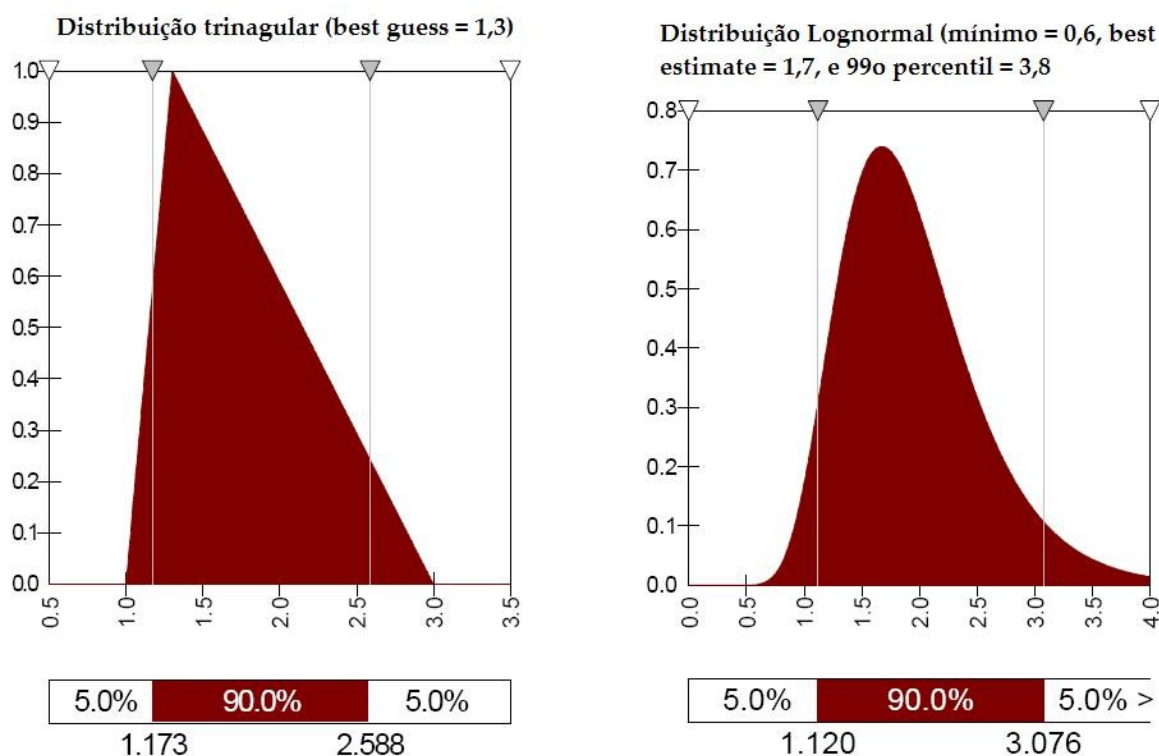


FIGURA 8 – funções densidade de probabilidade do expoente da função de danos (β). Esquerda: adotada pelo relatório Stern; direita: Dietz (2009). Fonte: Dietz (2009: 30).

De qualquer maneira, não existe evidência empírica que possa ajudar a determinar o valor de β . A escolha é totalmente arbitrária. O fato de uma função quadrática ter se tornado *benchmark* nos estudos econômicos mostra o quanto os modelos formais são influenciados pela tratabilidade matemática dos resultados.

4.2.1 Ponderação para a igualdade

O PAGE-2002 não inclui ponderação para a igualdade, talvez porque, ao contrário do exposto no Capítulo 2, esse procedimento leva o modelo a estimar custos sociais do carbono menos elevados. Chris Hope (2008) argumenta que, à medida que η aumenta, a taxa de desconto (r) também cresce, fazendo com que as estimativas de danos diminuam mais do que crescem por conta do efeito da ponderação para a igualdade.

Ao mesmo tempo em que a equação de Ramsey atribui ao parâmetro η o efeito de aversão à desigualdade intergeracional (Equação 3), o procedimento de ponderação para a igualdade lhe imputa o efeito de aversão à desigualdade intrageracional ou espacial (Equação 5). O problema é que existe um *trade-off* entre esses efeitos, de forma que aumentar o valor de η pode implicar tanto em resultados mais pessimistas quanto mais otimistas, a depender da complexa interação entre η , a função de danos e a função de bem-estar.

Simon Dietz (2009) faz as contas e prova que Hope está certo: relata uma queda do custo total de 15,3% do PIB para 14,1% quando η aumento de 1 para 3. Mas o relatório Stern argumenta que não incorporou no modelo os cálculos de ponderação para a igualdade por falta de tempo, e adota um procedimento *ad hoc* para compensar a falta: aumenta as estimativas de custo em 25%, fazendo com que o resultado do modelo formal, que era de 10,9%, chegue a 13,65% (STERN, 2007: 187).

No entanto, se Hope e Dietz estiverem certos (dois colaboradores do relatório), Stern não poderia ter feito isso, pois a inclusão no modelo da ponderação para a igualdade teria diminuído os 10,9%, e não aumentado. Por outro lado, poder-se-ia considerar correta a meta-análise de Tol, e concluir que a ponderação para a igualdade sempre aumenta as estimativas de custo em algo próximo aos 20%, de modo que o procedimento de Stern, apesar de questionável, estaria correto, pois além de ter embasamento ético, estaria alinhado com os resultados obtidos na literatura.

Fica explícito, em qualquer hipótese, o “*ad hoc-ismo*” do relatório. Que não por isso se destaca em relação ao DICE, como mostraram Funtowicz & Ravetz (1994): procura-se chegar a representações precisas de eventos altamente incertos, adota-se uma retórica de

muita modéstia quanto às possibilidades da modelagem, recorre-se a procedimentos completamente infundados, mas fazem-se recomendações precisas.

4.2.2 Procedimento de desconto

(...) I would be very surprised, indeed deeply worried, if a policy-maker thinking about these issues decided that everything turned on whether the elasticity of social marginal utility, η , equals 1.1 or 1.7, or on the very close details of pure time discounting (...) economists do the profession and themselves a disservice if they suggest that our whole policy analysis turns on model specifics” (STERN, 2007a: 117).

O dissenso sobre os parâmetros que determinam o procedimento de desconto dominou o debate da economia das mudanças climáticas por pelo menos dois anos após a publicação do relatório Stern. Dentre as diversas modificações que Stern fez aos procedimentos que se consideravam convencionais, a mais controversa foi adotar a taxa de desconto mais baixa aplicada em um estudo de grande repercussão, como mostrou a Tabela 5.

ρ (rô)

O parâmetro ρ no trabalho de Stern é próximo de zero para evitar a desvalorização das gerações futuras com base em um injustificável sentimento geral de impaciência, mas é positivo para considerar a possibilidade de extinção da raça humana (e, nesse sentido, um grau de impaciência eticamente justificado). No caso de $\rho = 0,1\%$, a probabilidade de extinção da raça humana seria de aproximadamente 10% num prazo de cem anos.

Os analistas ligados à corrente gradualista invariavelmente criticam essa posição de Stern. Argumentam que a postura prescritiva seria uma espécie de tentativa de impor a visão de um único pesquisador ou grupo de pesquisadores a toda a sociedade, e que, numa

democracia, o correto seria observar o comportamento das pessoas e empregar um procedimento descritivo (preferência revelada). Defendem uma espécie de moralidade superior do mercado (BARKER, 2008). Nordhaus (2008) vai mais longe, e insinua que o procedimento de desconto do relatório Stern reflete os velhos hábitos do império britânico de impor a sua vontade ao mundo; e lembrou o caso das armas de destruição em massa do Iraque, em que ficou comprovado que a opinião do governo do Reino Unido nem sempre está correta.

Esse argumento é curioso quando se nota que os integrantes da corrente gradua-lista são os mesmos que defendem ortodoxamente a análise de custo-benefício como regra exclusiva de decisão, a qual se baseia na idéia de um ditador benevolente que impõe à sociedade a sua forma de ver o mundo (estrutura de modelo analítico, parâmetros das equações, tratamento da incerteza, etc).

A perspectiva de Stern e da corrente precaucionista é a de que não se pode justificar eticamente a transposição da impaciência individual a decisões relevantes para a sociedade e para as gerações futuras. Mesmo que, eventualmente, a sociedade se comportasse dessa maneira, seria eticamente aconselhável que as decisões fossem tomadas com base no comportamento “ideal” da sociedade. Os principais economistas que estudaram o assunto chegaram à mesma conclusão que Stern.

O livro salienta inúmeras vezes que o procedimento “*standard*” de desconto é inadequado, pois decorre de um modelo de análise marginal, e afirma que o procedimento mais indicado seriam taxas de desconto (do consumo) que incorporassem a incerteza, e diminuíssem na presença dela – algo na linha da Equação (4); que se diferenciasssem pelo tipo de bem consumido (bens reprodutíveis, rivais e excluíveis; e recursos naturais), assumindo valores negativos para o caso de ativos ambientais; e que diminuíssem se aumentasse a desigualdade. Em todos os casos, a taxa de desconto do consumo é endógena e variável no tempo, pois depende da interação entre dois parâmetros e uma variável.

η (*eta*)

A adoção de $\eta = 1$, por outro lado, foi pouco justificada no texto, que se ateve

ao argumento da tratabilidade matemática (pois nesse caso, a Equação (19) do Apêndice 1 assume a forma $u(c) = \ln(c)$). Mas Stern (2008) segue Pearce (2003) e argumenta que η muito maior do que 1 produz uma aversão excessivamente elevada à desigualdade, de forma que considera aceitável algo no intervalo de zero a dois.

Dasgupta (2007) dá suporte à premissa ética que determina o valor assumido para ρ , mas observa que tanto Stern quanto Cline e Nordhaus desrespeitam outra premissa ética ao assumir η próximo da unidade – o que implicaria em relativa indiferença à desigualdade social intrageracional. Para ele, η deve ser definido no intervalo entre 2 e 4, principalmente porque, num modelo de otimização do consumo, a taxa de poupança é igual a $1/\eta$, de forma que $\eta \approx 1$ gera uma taxa de poupança absurdamente alta, de quase 100%.

Mas Brad DeLong (2006) mostrou que essa regra de poupança só é válida quando o modelo presume tecnologia constante, de sorte que, com uma premissa minimamente realista da influência da inovação sobre o produto, valores baixos de η podem ser condizentes com taxas de poupança normais (de 15% a 30%). É o mesmo argumento que leva Stern (2008) a insistir em $\eta = 1$ e a supor uma taxa de poupança exógena de 20%.

r

A principal crítica feita a Stern foi quanto à determinação de r , que para os gradualistas deve se guiar pelas taxas de juros privadas de longo prazo livres de risco observadas no mercado, enquanto para os precaucionistas deve se alinhar a uma taxa social de desconto, determinada especificamente para a aplicação em projetos públicos de grande escala.

Stern (2008) defende que as taxas de desconto privadas (TDP) não são sempre iguais às taxas de desconto sociais (r), que por sua vez são diferentes do retorno privado do investimento (i), e podem diferir do retorno social do investimento (RSI): $TDP \neq r \neq i \neq RSI$. Em projetos privados de pequena e média escala (relativamente ao projeto público de mitigação das mudanças climáticas) a taxa de desconto privada é igual ao retorno privado do investimento, medido por taxas de juros de mercado.

Quando se trata de projetos públicos, ou mesmo de projetos privados com re-

percussões públicas, a taxa de desconto aplicável é a taxa de desconto social, que poderá ser igual à taxa de desconto privada no caso em que as imperfeições de mercado (externalidades, assimetrias de diversos tipos) forem controláveis, mas que será diferente da taxa de desconto privada, e do correspondente retorno privado do investimento, quando se tratar de projetos com elevadas doses de incerteza, com prazos medidos em centenas de anos.

Com tais prazos é impossível que se estimem com mínima certeza as taxas de crescimento do PIB, dos estoques de recursos naturais, do consumo, e dos diversos agregados que influenciam a escolha de uma taxa de desconto. Adicionalmente, a não inclusão da depleção de recursos naturais na contabilidade do crescimento produz a falsa idéia de que há um crescimento muito elevado, o que aumenta o desconto do futuro.

Ademais, mesmo que fosse possível fazer essas estimativas, não faria sentido considerar que o comportamento observado de agentes privados no mercado financeiro é uma boa *proxy* daquilo que as diferentes gerações devem fazer, e efetivamente fariam, em relação a um problema da magnitude das mudanças climáticas. Até porque o indivíduo tem horizonte de vida finito, mas a sociedade existe para sempre (exceto se for extinta).

Em síntese, é muito difícil aceitar a idéia defendida pelos gradualistas de que a equação de Ramsey deve ser calibrada de forma a que a taxa de desconto social acompanhe o retorno privado do investimento de longo prazo observado na economia. Não se pode transplantar a taxa de desconto do indivíduo para toda a sociedade.

A opção de Stern (seguindo a tradição de William Cline, e endossada por Arrow *et. al.*, 2004) foi a de considerar a variável r prescritiva (ou endógena de fato), em vez de descritiva (ou exógena, como faz Nordhaus). Os parâmetros ρ e η foram, então, determinados normativamente, e a taxa de desconto social foi o resultado endógeno da interação desses parâmetros com a variável exógena g . É uma solução melhor, mas que não resolve os principais problemas do procedimento de desconto.

Uma outra saída foi sugerida por Weitzman (1998), que provou que, no caso dos modelos econômico-climáticos, a taxa de desconto do consumo é decrescente no tempo. Se houver incerteza sobre o valor futuro de r , entre diversas possibilidades r_i – e há muita –, o valor esperado no longuíssimo prazo será igual ao menor valor possível. Por exem-

plo, caso as possibilidades em $t = 300$ sejam $r_1(300) = 6\%$, com probabilidade subjetiva p_1 , e $r_2(300) = 1,4\%$, com probabilidade subjetiva p_2 , então o valor esperado será $r(300) = 1,4\%$:

$$r(t) = -\frac{\ln \sum p_i e^{-r_i t}}{t} \quad (17)$$

Assim, $r(0) = \sum p_i r_i$, e $r(\infty) = \min[r_i]$. Logo, a taxa de desconto deve cair no longuíssimo prazo a um valor igual ao menor possível.

O problema é que, com r decrescente e assintoticamente muito pequeno, se o horizonte do modelo for infinito, os resultados, em termos de valor presente, serão altamente influenciados por acontecimentos estimados para oitocentos, mil, dois mil anos no futuro (o que, de fato, acontece nos cálculos de Stern, como mostra a Tabela 9). O que poderá ser visto por muitos como a mais pura fantasia, se é que os horizontes de cem ou duzentos anos já não merecem ser assim tratados. Conclui-se, portanto, que o problema da taxa de desconto deve ser estudado conjuntamente com o horizonte de análise do modelo.

4.2.3 Danos climáticos

O calcanhar de Aquiles do relatório Stern não é o procedimento de desconto, como apontou a imensa maioria dos analistas, mas dois outros fatores que praticamente não foram questionados: a maneira como os custos de mitigação são comparados com os danos estimados, e o tratamento do crescimento econômico⁵¹. Ambos os temas são detalhados neste item e nos dois que o seguem.

O Capítulo 6 do relatório apresenta o modelo formal de cálculo dos danos agregados das mudanças climáticas. Depois de uma breve revisão dos três principais IAMs gradualistas do final dos anos 1990, o relatório conclui que os modelos convencionais apresen-

⁵¹ Maddison (2007) foi um dos poucos a perceber estes problemas.

tam importantes limitações, entre as quais a falta de contabilização de uma série de impactos de fora do mercado, e a exclusão de impactos catastróficos – mas não analisa o modelo de Cline (1992), que apesar de defasado, teve bem mais influência sobre o trabalho de Stern e da corrente precaucionista. Alerta, então, para a urgência de uma perspectiva mais realista quanto aos riscos envolvidos e às maneiras de se evitá-los.

O modelo inclui impactos de mercado sobre os setores agrícola, de energia, e de zonas costeiras, e impactos de fora do mercado sobre ecossistemas e mortalidade. Inclui também, com probabilidades subjetivas, a possibilidade de eventos climáticos extremos. Para calcular o valor dos impactos relativamente ao PIB, Stern utiliza a seguinte função:

$$W = \sum_{t=0}^{2200} n(t) \ln(c(t) e^{-\rho t}) + \left[\frac{n(T) \ln(c(T))}{\rho} + \frac{n(T) g}{\rho^2} \right] e^{-\rho T} \quad (18)$$

Onde: W = bem-estar intergeracional agregado; $n(t)$ = população na data t ; $c(t)$ = consumo *per capita*; T = horizonte de tempo considerado pelo estudo.

Até o ano de 2200, os danos são calculados de acordo com as equações do PAGE-2002 (Anexo 6); depois disso, são zerados e a economia passa a crescer sem novas restrições climáticas. Ou seja, os danos da Equação (37) são subtraídos da variável $c(t)$ até $t = 2200$, a partir de quando o problema das mudanças climáticas é considerado resolvido (danos iguais a zero), e a economia passa a crescer à mesma taxa que teria crescido na ausência de qualquer restrição climática. A taxa média de crescimento do consumo *per capita* no cenário base, em que não há aquecimento global, é de 1,3% (1,9% do PIB menos 0,6% da população), mesmo valor que o modelo exibe de 2200 em diante.

Para calcular o cenário base (curva A da Figura 9) o setor de danos do modelo é desligado, e simula-se a economia como se não existissem mudanças climáticas – sem danos decorrentes do aquecimento, e sem gastos defensivos. Os resultados servem de contra-factual para a estimativa da magnitude das perdas derivadas das mudanças climáticas. Por

exemplo, uma segunda rodada do modelo liga o setor de danos e simula o cenário BAU, em que nada é feito para mitigar as emissões – curva B da Figura 9. A diferença entre o cenário base e o cenário BAU representa as perdas estimadas para o caso da inação.

A curva B capta os gastos defensivos que são realizados naturalmente pela economia (adaptação), mesmo num cenário *laissez-faire*, para evitar as piores consequências das mudanças climáticas, e que têm efeito positivo sobre o produto. A diferença entre o cenário base e a curva B, descontada a cada período a uma taxa r e acumulada por todo o horizonte do modelo, é o valor que Stern chama de perda do PIB (mais precisamente, do *Balanced Growth Equivalent* – BGE) “agora e para sempre”⁵² decorrente da inação.

A Equação (18) explicita o problema que se identificou no tópico anterior: um modelo com horizonte infinito e com ρ pequeno tenderá a ser dominado por acontecimentos de períodos muito distantes no futuro. O lado esquerdo da equação contabiliza os danos agregados até 2200, que nada mais são do que a integral descontada da curva A (Figura 9) menos a integral descontada da curva B, entre a origem e $t = 2200$. Já o lado direito da equação, entre colchetes, contabiliza os danos depois de 2200, que na Figura 9 são representados pela diferença entre as integrais descontadas das curvas A e B.

Assim, mesmo que depois de 2200 não se contabilizem no modelo ulteriores impactos das mudanças climáticas, o nível do consumo *per capita* do cenário BAU já terá ficado comprometido, e os danos estimados continuarão crescendo à medida que se estende o horizonte do modelo. É por isso que, segundo os cálculos de Nordhaus (2008), mais de metade dos danos estimados por Stern referem-se ao período posterior ao ano 2800.

⁵² Essa expressão, ainda que conceitualmente correta, passa a idéia equivocada de que os custos da inação começam agora e se mantêm para sempre no mesmo valor. Mas os custos são pequenos nas primeiras décadas e crescem à medida que se aproximam do final do Século. Os números de 5% e 20% são uma média descontada e calculada em termos de *Balanced Growth Equivalent* (BGE). BGE é o valor do consumo *per capita* em 2000 que, crescendo a uma taxa constante $g = 1,3\%$, daria o mesmo valor de utilidade agregada que o cenário BAU. Uma perda de 20% do BGE corresponde a uma perda de igual magnitude do consumo *per capita* começando em 2000 e se estendendo até o infinito (STERN, 2007: 185). Pode ser entendida como um imposto aplicado para sempre cuja receita é destruída.

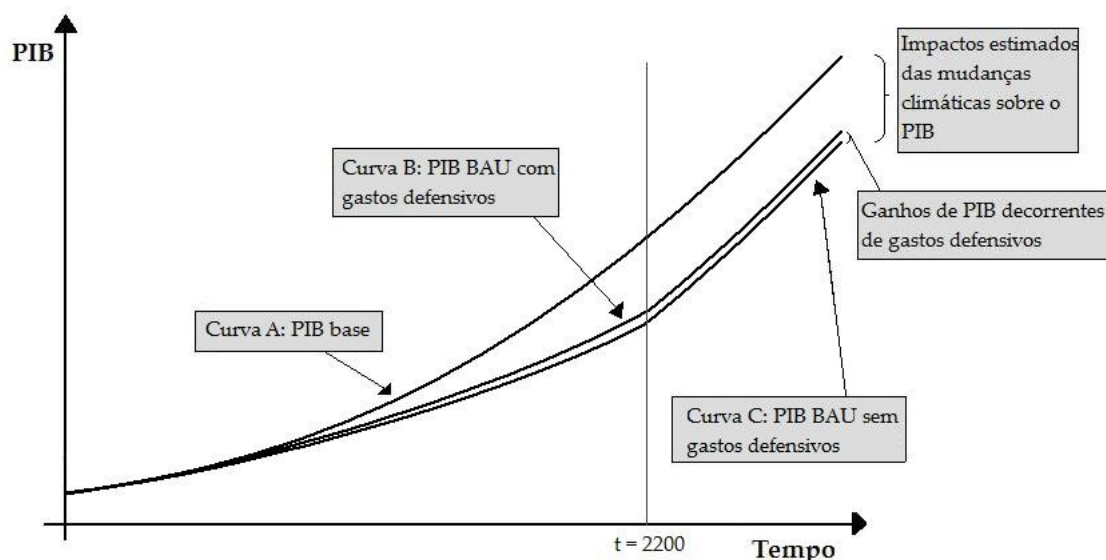


FIGURA 9 – curvas hipotéticas de PIB base (sem aquecimento global), PIB com mudanças climáticas sem gastos defensivos no cenário BAU (*business as usual*), e PIB com mudanças climáticas com gastos defensivos no cenário BAU.

Curva A – PIB no cenário base, em que não há aquecimento global; **curva B** – PIB no cenário BAU, em que há mudanças climáticas, não se tomam medidas de mitigação de emissões, mas há gastos defensivos; **curva C** – PIB no cenários BAU, com mudanças climáticas, sem medidas de mitigação e sem gastos defensivos.

A Tabela 7 sintetiza os cálculos do relatório Stern. Para estimar os danos das mudanças climáticas ele trabalha com dois grandes cenários de *laissez-faire*, apresentados nas colunas do meio da tabela, chamados de IPCC e *high climate*. O primeiro reproduz as características do cenário A2 do IPCC, um dos mais pessimistas, e o segundo incorpora informações mais recentes que apontam para um quadro ainda mais pessimista em termos de sensibilidade climática e de impactos do aquecimento. Já o cenário “controle”, da coluna da direita, deveria refletir a trajetória do PIB no caso de implementação das medidas de mitigação propostas (item 4.3), mas não é calculado. As linhas representam a inclusão de diferentes conjuntos de impactos nos cálculos (danos de fora do mercado, possibilidade de catástrofe, ponderação para a igualdade, fdps de caudas longas).

Os dois números que chamaram a atenção do mundo como conclusões do rela-

tório Stern estão destacados em negrito e itálico: 5% e 20%. O primeiro é a média das 1.000 rodadas de Monte Carlo do PAGE-2002 no cenário BAU IPCC em que se consideram apenas danos de mercado e se inclui a possibilidade de catástrofe. O último inclui danos de fora do mercado, o procedimento *ad hoc* para a contabilização de ponderação para a igualdade, e um procedimento ainda mais arbitrário para a consideração da possibilidade de as fdps dos parâmetros incertos terem caudas longas (simplesmente se aumenta o custo de 13,63% para 20%, dizendo-se apenas muito vagamente como isso foi feito).

Este último procedimento indica o grau de arbitrariedade a que um modelo pode recorrer para legitimar uma determinada visão, ou talvez apenas para chegar a um número redondo – por outro lado, o modelo formal permite, pelo menos, que se identifique a arbitrariedade. Stern realiza cálculos complexos, discute profundamente o tema da taxa de desconto, segue um método preciso de modelagem da incerteza, e no final, de maneira suficientemente escondida no texto para que quase ninguém a tenha notado, aumenta a sua estimativa de custos em 46,75% para fazer jus ao “*fact that we are unsure of which probability distribution to use*” (STERN, 2007: 187).

Três conjuntos de problemas fazem com que os números da Tabela 7 sejam muito pouco confiáveis para a elaboração de políticas públicas: (i) o fato de que a maior parte dos danos estimados seja do período posterior ao ano 2200; (ii) as grosseiras arbitrariedades a que se recorreu para obter-se o valor de 20%; e (iii) o fato de o modelo não incluir tecnologia endógena, o que certamente teria diminuído os custos estimados da inação.

Talvez prevendo que os analistas se dariam conta desses problemas (o que, no final das contas, não aconteceu, devido ao domínio da discussão da taxa de desconto), Stern fez inúmeras ressalvas durante o texto: “(...) *these are highly aggregative and simplified models and, as such, the results should be seen as illustrative only*” (ibidem: 124). “*These models should be seen as one contribution to that discussion. They should be treated with great circumspection. There is a danger that, because they are quantitative, they will be taken too literally. They should not be*” (ibidem: 167).

TABELA 7 – perda de valor presente do BGE (*Balanced Growth Equivalent*)¹ em diferentes cenários futuros – ano 2000 até o infinito.

Cenários	BAU base ²			BAU pessimista ³			Controle ⁴
	Média	5%	95%	Média	5%	95%	
Mercado, sem catástrofe	2,1	0,3	5,9	2,5	0,3	7,5	?
Mercado, com catástrofe	5	0,6	12,3	6,9	0,9	16,5	?
Mercado + não mercado, com catástrofe	10,9	2,2	27,4	14,4	2,7	32,6	?
Mercado + não mercado, com catástrofe, com ponderação para a igualdade ⁵	13,63	–	–	18	–	–	?
Mercado + não mercado, com catástrofe, com ponderação para a igualdade, com funções densidade de probabilidade de caudas longas ⁶	20	–	–	?	–	–	?

1 – Valor do consumo *per capita* em 2000 que, crescendo a uma taxa constante $g = 1,3\%$, daria a mesma utilidade agregada que o cenário BAU. Uma perda de 20% do BGE corresponde a uma perda de igual magnitude do consumo *per capita* começando em 2000 e se estendendo até o infinito (STERN, 2007: 185). Pode ser entendida como um imposto aplicado para sempre cuja receita é destruída; **2** – o cenário IPCC corresponde ao cenário A2 do terceiro relatório do IPCC, que é o segundo mais pessimista de seis cenários (ver Anexo 8) – as análises científicas recentes corroboram a observação de que as previsões mais pessimistas do terceiro relatório são as mais prováveis; **3** – o cenário mais pessimista, chamado de *high climate*, se baseiam em trabalhos mais recentes e em duas importantes hipóteses: a de que haverá maior enfraquecimento dos sumidouros de carbono devido ao aumento da temperatura do que antes previsto, e a de que as emissões de metano do *permafrost* serão superiores às previsões anteriores; **4** – o cenário controle é aquele em que são aplicadas as medidas de mitigação e adaptação invocadas pelo relatório; **5** – o procedimento de ponderação para a igualdade não é integrado no modelo quantitativo, mas aplicado de maneira *ad hoc*: simplesmente se aumenta o valor estimado da perda de BGE em 25%, de acordo com o *benchmark* da literatura; **6** – a incerteza quanto à forma das funções densidade de probabilidade dos 31 parâmetros incertos leva Stern a aumentar a perda do BGE de 13,63% para 20% no cenário BAU base, mas o relatório não informa como isso foi feito.

Fonte: adaptado de Stern (2007: 186).

Mas com os “números mágicos” de 5% e 20% presentes no sumário para tomadores de decisão, em praticamente todas as resenhas feitas do relatório, e nas falas de Nicholas Stern, não era de se esperar que as ressalvas fossem levadas a sério. Pior do que isso, todavia, foi a comparação dessas estimativas com o terceiro “número mágico”, de 1%.

4.3 CUSTOS DE MITIGAÇÃO

Uma análise de custo-benefício convencional determina, no mesmo modelo, os custos dos danos esperados, os custos de mitigação, e a taxa ótima de redução das emissões. Mas, como visto no Capítulo 2, esse procedimento está sujeito a uma série de erros, de forma que Stern prefere dividir os cálculos em três partes independentes: (i) custos da inação; (ii) meta de redução de emissões; e (iii) trajetória custo-efetiva para a obtenção dessa meta. As duas primeiras foram descritas acima, e este tópico apresentará a terceira.

Os custos de mitigação são calculados por meio de uma análise desagregada (modelo *bottom-up*)⁵³, em que se computam os preços correntes e esperados das diversas matrizes tecnológicas que podem levar a uma estabilização da concentração atmosférica de GHG na casa dos 500 a 550 ppm CO₂e. Essa parte do relatório foi encomendada ao professor do *Imperial College* e economista britânico Dennis Anderson, que tem larga experiência na área de estudos energéticos e ambientais. Adicionalmente, o professor Terry Barker, da Universidade de Cambridge, realizou uma meta-análise de estudos econômicos agregados que calculam os custos de mitigação (com tecnologia endógena), e chegou a conclusões semelhantes às de Anderson.

O centro das estimativas, para o caso das emissões derivadas de combustíveis fósseis, é um custo de 0,3% do PIB em 2015, 0,7% em 2025, e 1% em 2050, variando, no caso deste último ano, entre um ganho de 1% (cenário tecnologicamente otimista) e uma perda de 3,3% (cenário pessimista). Não há estimativas para os custos de mitigação no setor de uso da terra. Os resultados da meta-análise (que não se resumem a combustíveis fósseis) são bem parecidos: variam de um ganho líquido de 3,9% a um custo de 3,4%, sendo a média o custo de 1% do PIB (*ibidem*: 262, 271).

⁵³ Procedimento que, no estudo de Stern ou em qualquer outro, está sujeito à dificuldade de se saber quais custos de mitigação são efetivamente *adicionais*, e quais teriam sido feitos de qualquer forma, num cenário *laissez-faire*, a título de adaptação. Problema semelhante é enfrentado pelos mecanismos de pagamento por serviços ambientais.

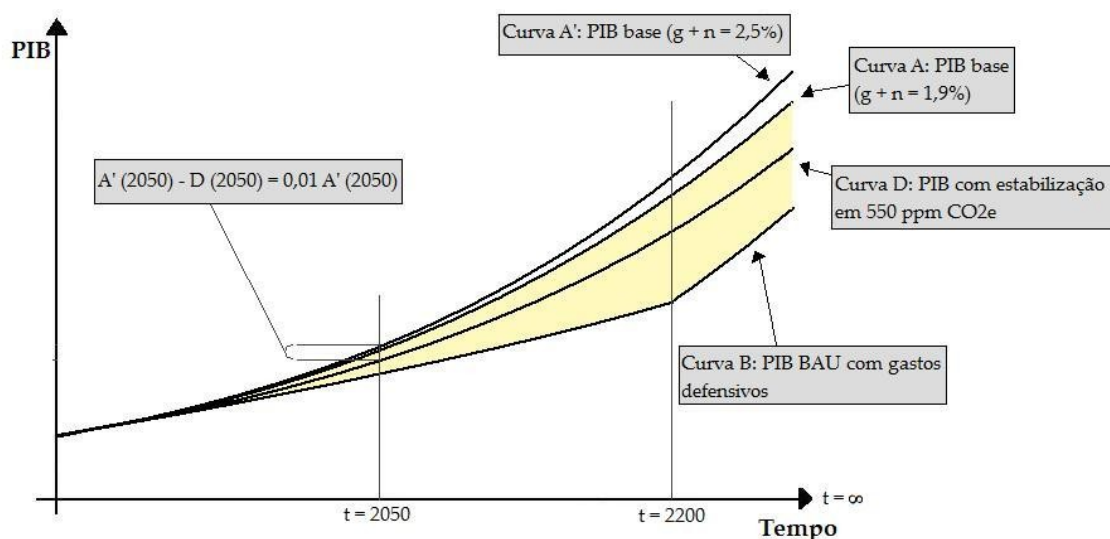


FIGURA 10 – curvas hipotéticas de PIB utilizadas para o cálculo dos custos de mitigação, e curvas utilizadas para o cálculo dos custos da inação, relatório Stern.

Curva A – PIB no cenário base (em que não há aquecimento global), utilizado como denominador dos custos de inação (crescimento anual do PIB de 1,9%); **curva A'** – PIB no cenário base utilizado como denominador dos custos de mitigação (crescimento anual do PIB de 2,5%); **curva B** – PIB no cenário BAU (*business as usual*), em que há mudanças climáticas, não se tomam medidas de mitigação de emissões, mas há gastos defensivos; **curva D** – PIB no cenários em que são empregadas estratégias de mitigação suficientes para estabilizar a concentração atmosférica de GHG em torno de 500 a 550 ppm CO₂e – corresponde à coluna “controle” da Tabela 8. A área colorida do gráfico corresponde aos custos calculados da inação, de entre 5% e 20%.

O PIB que serve de denominador para os cálculos de Anderson não é nenhum dos que foram utilizados no capítulo que estima os danos agregados das mudanças climáticas, mas um PIB exógeno que cresce 2,5% ao ano (diferente dos 1,9% do cenário base da Figura 9). E o numerador também não foi obtido por meio dos procedimentos da Equação (18) e da Tabela 7. Com isso, a possibilidade de comparação de danos com custos de mitigação fica totalmente comprometida.

A curva A' da Figura 10 é a que foi utilizada como denominador dos custos de mitigação; ela difere da curva A, utilizada como denominador do cálculo dos custos de inação. A curva D representa a trajetória hipotética do PIB com aquecimento próximo a 2 °C, como recomendado por Stern e pela maioria dos analistas das ciências naturais, e a curva B

é o cenário BAU com gastos defensivos.

Para que os “números mágicos” do relatório Stern fossem comparáveis, eles deveriam ter tido o mesmo denominador e os seus numeradores teriam de ter sido obtidos por procedimentos iguais. Nenhuma dessas condições se verifica, como esclarece a Tabela 8.

TABELA 8 – “números mágicos” do relatório Stern, interpretação formal, numerador e denominador de cada um deles.

“Número mágico”	Interpretação formal	Numerador	Denominador
1% (custo de mitigação em relação ao PIB)	$0,01 A' (2050)$ (custos da mitigação de emissões de combustíveis fósseis em um ponto específico do tempo, com tecnologia endógena)	$A' (2050) - D (2050)$	$A' (2050)$
5%; 20% (custo da inação em relação ao PIB)	$0,125 \pm 0,075 \int_0^{\infty} A^{-\rho t}$ (custos da inação agregados até o infinito, sem tecnologia endógena)	$\int_0^{\infty} A^{-\rho t} - \int_0^{\infty} B^{-\rho t}$ (área colorida da Figura 10)	$\int_0^{\infty} A^{-\rho t}$

Mas o relatório Stern faz a comparação direta:

“if we don’t act, the overall costs and risks of climate change will be equivalent to losing at least 5% of global GDP each year, now and forever. If a wider range of risks and impacts is taken into account, the estimates of damage could rise to 20% of GDP or more. In contrast, the costs of action (...) can be limited to around 1% of global GDP each year” (ibidem: xv, grifo nosso).

“In broad brush terms, spending somewhere in the region of 1% of gross world product on average forever could prevent the world losing the equivalent of 5 – 20% of gross product forever” (ibidem: 320, grifo nosso).

O custo calculado de 1% não é “a cada ano” e nem “para sempre”, mas no ano de 2050 unicamente; se resume a combustíveis fósseis, mas é anunciado de forma genérica (a inclusão dos demais setores teria levado a um resultado superior a 1%); o numerador é apenas o custo em 2050, e não a agregação dos custos descontados entre 2001 e o infinito – os custos da inação são agregados de 2001 até o infinito e descontados; o denominador é um PIB que cresce 2,5% ao ano, diferente daquele usado como denominador dos custos da inação; e a dinâmica tecnológica desde cálculo é totalmente diferente daquela que se considerou para o cálculo dos custos da inação.

Ainda que todos esses problemas fossem irrelevantes, os danos de 5% ou 20% não seriam comparáveis com os custos de mitigação de 1%, pois estes levariam a um aquecimento de 2 °C, enquanto aqueles são baseados em um contrafactual em que não há aquecimento. Para que pudessem ter sido adequadamente comparados, os resultados do modelo *bottom-up* deveriam ter sido carregados no PAGE-2002 de forma a estimar uma curva D (como hipoteticamente traçada na Figura 10), o que teria permitido preencher a coluna “controle” da Tabela 7. Mas o relatório passa a idéia de que a curva D é igual à curva A.

O argumento de maior apelo do relatório Stern, de que os custos da inação superam largamente os custos da ação, pode, no máximo, estar certo pelas razões erradas (WEITZMAN, 2007). A falta de padronização das medidas e dos procedimentos metodológicos faz com que os resultados dos modelos formais percam a maior parte do seu apelo, ligado à consistência e à transparência, e as teses do relatório passem a ter de ser sustentadas de outras maneiras.

4.4 CRESCIMENTO ECONÔMICO

A mais notória falha conceitual de Stern é a confusão entre crescimento econômico, medido pelo PIB, e desenvolvimento. Ele admite que o crescimento deve se tornar “verde”, subentendendo basicamente uma economia igualmente consumista mas de baixo carbono. E dedica um inteiro capítulo à tentativa de mostrar que a hipótese de crescimento indefinido à taxa anual de 1,9% não inviabiliza a redução de 80% das emissões correntes.

No entanto, a relação de Erlich ($I = P \times A \times T$, onde: I = impacto ambiental; P = população; A = afluência ou consumo por pessoa; e T = tecnologia ou intensidade material da produção) mostra que a estabilização dos impactos ambientais exige que a intensidade material da produção (T) caia pelo menos tanto quanto aumenta o PIB ($A \times P$). Se os impactos tiverem que ser reduzidos a 1 / 5 do nível atual, T deve cair cinco vezes mais do que aumenta o PIB. Se depois de duzentos anos a escala da economia modelada por Stern cresce 43 vezes, a redução de emissões almejada requer que a eficiência aumente 215 vezes.

Na prática, isso quer dizer que, se um automóvel atualmente consome um litro de gasolina para rodar 20 Km, ele deverá passar a rodar 4.300 Km com a mesma quantidade de combustível. Ou, alternativamente, por exemplo, deverá atingir a eficiência de 100 Km / L e os motoristas terão de dirigir 42 vezes menos.

A pergunta mais adequada, então, parece ser: é possível reduzir a escala das emissões ao mesmo tempo em que o PIB cresce exponencialmente?

O próprio relatório mostra que não há experiência de redução de emissões com crescimento econômico, negando taxativamente a possibilidade de uma curva de Kuznetz ambiental⁵⁴ para o carbono. Desconstrói a idéia de desacoplamento entre crescimento econômico e emissões, pois admite que, apesar de os países desenvolvidos terem transitado para uma economia de serviços, isso foi acompanhado de deslocamento da indústria manufatureira para países em desenvolvimento. Além disso, o aumento da renda faz crescer a demanda por serviços carbono-intensivos, como transporte aéreo e uso do automóvel.

Os únicos países que conseguiram reduzir a escala das emissões foram a Fran-

⁵⁴ Ver Quadro 2 no Apêndice 2.

ça, onde as emissões caíram 1% ao ano com a transição para a energia nuclear; e a ex-União Soviética, no contexto de recessão econômica.

Uma distinção fundamental que deve ser feita é entre escala e intensidade. O que determina o efeito estufa é a quantidade de GHG que se emite, independente da eficiência com que essa emissão produz riqueza e bem-estar. Assim, mesmo que a intensidade carbono da economia venha a cair, isso de nada adiantará se a quantidade total de carbono emitida continuar a crescer. E existe uma séria possibilidade de aumentos da intensidade terem efeitos negativos sobre a escala, devido ao chamado “efeito rebote”, uma espécie de tiro no pé que faz com que aumentos da eficiência de automóveis induzam a mais quilômetros rodados, e não a menos (JACKSON, 2009).

Entre 1992 e 2002, a eficiência não foi capaz de conter o aumento das emissões. Mas não há evidências, diz Stern, de que o crescimento econômico possa vir a ser freado, de forma que seria ilusório adotar uma hipótese desse tipo. Prefere apostar que “[s]*tructural shifts in economies may change the relationship between income and emissions*” (STERN, 2007: 205), e que “*the relationship between economic development and CO₂ emissions growth is not immutable*” (ibidem: 210). Mas omite o fato de que não há comprovação empírica (nem teórica) de que o PIB pode crescer indefinidamente sem aumento do *throughput* (fluxo de matéria e energia).

É esta premissa pré-analítica que une o relatório Stern ao pensamento convencional da economia: a idéia de que o destino material e moral das sociedades humanas é o crescente e ilimitado exossomatismo (instrumentalização da natureza), e que os problemas que eventualmente venham a surgir serão resolvidos pelo próprio aumento da expansão da economia sobre a natureza (ver Apêndice 2).

Joseph Schumpeter, Celso Furtado e Hermany Daly enfatizaram o papel central da visão pré-analítica (conjuntos de hipóteses que não podem ser testadas, e que estão enraizadas em sistemas de valores) sobre o percurso que assume uma corrente de pensamento. É exatamente esse papel que Norgaard (1994) atribui à idéia da inevitabilidade do progresso: o de amarra cognitiva a que está sujeito o pensamento de determinado grupo.

A visão pré-analítica é uma premissa epistemológica metafísica (*belief*) que

faze referência à natureza da realidade, à maneira como as pessoas se encaixam na realidade, ao modo como se produz o conhecimento e à própria natureza do conhecimento. Está firmemente enraizada na visão ocidental daquilo que pode ser “cientificamente comprovado”, e leva o público a excluir quaisquer outras formas de apreensão da realidade.

“Many people operate on the belief that progress will occur through continued technological advance, unless scientifically proved otherwise” (ibidem: 54). A crença de que é *inevitável* o avanço constante dos padrões material e moral da sociedade (otimismo tecnológico) caracteriza a premissa mais fundamental da economia convencional no que se refere à relação entre o desenvolvimento e o meio ambiente. Nesse ponto, Stern em nada avançou em relação à corrente gradualista.

4.5 IMPLICAÇÕES E AVALIAÇÃO

A melhor síntese das implicações de política pública do relatório Stern é o gráfico apresentado na Figura 1. A taxa de mitigação das emissões de GHG deveria atingir 50% em 2015, o que implicaria em um esforço elevadíssimo desde agora, com custos incertos, mas que deveriam ficar entre US\$ 90 bilhões e US\$ 224 bilhões, sendo a estimativa central de US\$ 134 bilhões (0,3% do PIB). O custo subiria para US\$ 349 bilhões em 2025 e US\$ 930 bilhões em 2050. Ao mesmo tempo, a estimativa de custo de 1% do PIB “agora para sempre” implicaria em gastos já neste ano da ordem de US\$ 400 bilhões.

A operacionalização dos gastos propostos não se resumiria ao mecanismo de preços, mas incluiria um conjunto de outros três eixos de ações, como mostra o Quadro 1.

Como se nota, são consideráveis as implicações da economia das mudanças climáticas precaucionista para a política pública em escala mundial. A serem válidos os cálculos de Stern, os principais países responsáveis pelas emissões de GHG precisariam passar por uma radical reformulação de suas economias no curto prazo, com efeitos potencialmente benéficos, mas sujeitos às mais variadas incertezas.

QUADRO 1 – instrumentos de política pública sugeridos pelo relatório Stern para a transição para uma economia de baixo carbono.

Technology push (lado da oferta) – subsídios governamentais, financiamento direto, prêmios e outras formas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento na área de eficiência do uso do carbono. Sob a premissa de que novas tecnologias geram benefícios que extrapolam a capacidade de apropriação do inventor, e dados os altos custos ligados ao risco de mercado e às somas de capital requeridas, Stern argumenta que o financiamento público para a inovação em eficiência de carbono se justifica economicamente. Sugere que aumente de US\$ 33 bilhões em 2005 para algo em torno de US\$ 165 a US\$ 330 bilhões. Ao mesmo tempo, os incentivos da ordem de US\$ 150 a US\$ 250 bilhões para os combustíveis fósseis devem ser eliminados.

Comando e controle (lado da oferta) – impõe normas relativas aos tipos de tecnologias e fontes de energia que podem ser usadas por indústrias, edifícios, automóveis e outras fontes de emissão de GHG. Quando aplicadas aos bens de capital, essas normas tendem a gerar perversos incentivos para a postergação da substituição do maquinário existente, já que a dificuldade prática de se controlar a eficiência energética do equipamento instalado força a regulação a se restringir ao maquinário novo. Por outro lado, a imposição de padrões mais amplos de uso da energia tem dado bons resultados quando combinada com a estratégia de *technology push*. Por exemplo, o *German Electricity Feed Act*, dos anos 1990, requer que as indústrias comprem energia de fontes renováveis e fixa os preços dessa energia numa escala que declina com o tempo. O estímulo à inovação decorre da demanda garantida e da previsibilidade do mercado para os investidores, ao mesmo tempo em que a competição fica garantida e os ganhos de eficiência são repassados aos consumidores. O resultado é uma participação da energia renovável na oferta total duas vezes maior do que na Europa.

Mudança comportamental (lado da demanda: *market pull*) – informação, educação ecológica, evidência empírica, persuasão e discussão induzirão os consumidores e eleitores a optarem pelas melhores soluções ambientais disponíveis. As preferências do consumidor devem ser objeto da política pública.

Precificação do carbono – já foi discutido no Capítulo 2. O Protocolo de Kyoto, o *European Trade Scheme* e o *Regional Greenhouse Gas Initiative* (dez estados do Noroeste dos Estados Unidos) são exemplos da implementação de diferentes instrumentos de precificação do carbono.

Fonte: Stern (2007).

Uma avaliação sintética do relatório Stern leva à enumeração dos seguintes pontos positivos e negativos:

Ponto positivo: uso de um procedimento de desconto adequado para projetos de longuíssimo prazo e sujeitos à incerteza forte e à ignorância.

Ponto negativo: horizonte infinito do cálculo de custos da inação.

Ponto positivo: modelagem da incerteza com simulações de Monte Carlo.

Ponto negativo: aumento arbitrário da estimativa de custos da inação, em 46,75%, justificado por uma presuntiva consideração de funções densidade de probabilidades com caudas longas.

Ponto positivo: análise de custo-eficiência, em oposição à ortodoxia dos modelos de custo-benefício.

Ponto negativo: comparação infundada dos resultados do modelo *bottom-up* com os resultados do IAM.

Ponto positivo: interação com diversas disciplinas da economia e de fora da economia no âmbito analítico, em oposição a uma interação que se resume aos âmbitos empírico e paramétrico.

Ponto negativo: desconsideração das limitações ecossistêmicas para a expansão da escala da economia.

Ponto positivo: adoção de modelo de simulação regionalmente desagregado.

Ponto negativo: ponderação para igualdade *ad hoc*.

Ponto positivo: consideração de pesquisas recentes sobre sensibilidade climática e vulnerabilidade ao aquecimento e às mudanças climáticas.

Ponto negativo: modelo IAM não está documentado no relatório Stern (mas está em Hope, 2006).

Ponto positivo: incorporação da possibilidade de descontinuidades climáticas.

Ponto negativo: tecnologia exógena no PAGE-2002.

Todos os pontos negativos do relatório Stern estão ligados a procedimentos metodológicos mal empregados. Já os pontos positivos dizem respeito à incorporação de pers-

pectivas que não fazem parte da economia convencional, e que são úteis para se tratar do problema analítico mudanças climáticas: a filosofia moral, a teoria da decisão sob incerteza, o princípio da precaução, a análise de custo-eficiência, e mesmo a economia ecológica.

Houve fortes falhas na maneira como se empregaram os modelos, e faltou diálogo entre as partes do relatório, coisas que, em maior ou menor grau, afetam todo e qualquer estudo da área. Mas fez-se o esforço de expandir o campo de análise da economia das mudanças climáticas, reconhecendo-se que a caixa de ferramentas convencional é limitada para o tratamento de problemas de largo horizonte temporal que envolvem a relação entre ecossistemas, sociedade e economia. O enorme avanço do relatório Stern no campo epistemológico é uma bem-vinda novidade, e um sinal de que a ortodoxia das análises de custo-benefício tenderá a perder força nos próximos anos.

A “bomba epistemológica” que o relatório Stern lançou sobre a economia das mudanças climáticas foi descrita por Terry Barker (2008) como um importante passo no sentido de uma “nova economia”, baseada no estudo de sistemas complexos, dinâmicos e não lineares, que põe a mudança tecnológica no centro do avanço econômico, em que o problema da equidade é analisado sob o ponto de vista normativo da ética, em que a racionalidade é limitada, entre outros fatores. O mesmo paradigma que Eric Beinhocker (2006) chamou de economia da complexidade.

É bem provável que essas avaliações estejam corretas, pelo menos em alguma medida, e que o relatório Stern tenha representado uma ruptura no processo de consolidação da corrente gradualista. Mas isso se deve muito menos às críticas internas, advindas, por exemplo, da economia ecológica, do que da percepção por parte dos cientistas naturais de que as análises convencionais da economia estão totalmente deslocadas em relação ao debate da ciência das mudanças climáticas, e mais do que tudo, da força política da retórica da sustentabilidade que vem se consolidando no discurso, e às vezes na prática, dos grandes *players* geopolíticos mundiais (G8, Estados Unidos, União Européia, Reino Unido)⁵⁵.

⁵⁵ Vale (2009).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS: AVALIAÇÃO CRÍTICA E PROPOSTA

Este capítulo sintetiza a dissertação, fazendo a ponte entre a teoria e os métodos apresentados no Capítulo 2, e os modelos descritos nos Capítulos 3 e 4. O objetivo principal é avaliar a hipótese central do estudo, o que se faz no item 5.1. No item 5.2 discutem-se os limites da ciência positiva em temas que envolvem incerteza irreduzível. O Capítulo 6 conclui a dissertação.

5.1 NORDHAUS *versus* STERN

The implications of following a slow ‘policy ramp’, with meagre emission reductions over the next quarter of a century, would, on our reading of the evidence, be very risky indeed, yet this is implicit in the arguments of, for example, Nordhaus (...) They do not seem ready to acknowledge the riskiness of the paths they suggest. Our conclusion, that global efforts should be directed at stabilising GHG concentrations in the range of 450 to 550 ppm CO₂e, is robust to a variety of considerations (...) If our critics are prepared to allow GHG concentrations to rise to 650 ppm CO₂e, 750, or beyond, with significant associated risks of eventual temperature increases in excess of 5°C above pre-industrial levels (a transformation in global climate, taking it way beyond human experience, and making radical relocations of populations likely), then they should say so.” (DIETZ et. al., 2007: 230 – 232).

Os estudos de Nordhaus e de Stern fazem recomendações em dois grandes eixos: qualitativo e quantitativo. O primeiro determina *como* se devem mitigar as emissões de

gases-estufa, e a resposta de Stern, e da corrente precaucionista, é de que são necessários pelo menos quatro instrumentos: *technology-push*, comando e controle, mudança comportamental, e precificação do carbono (seja com limites quantitativos ou com um imposto). Já Nordhaus e a corrente gradualista são radicais em que um imposto sobre o carbono é mecanismo suficiente para se atingirem os resultados desejados.

O eixo quantitativo determina *quanto* e *quando* investir. As respostas de ambas as correntes foram apresentadas na Figura 1. O grupo de Nordhaus advoga por metas de mitigação que crescem linearmente com o tempo, aceitando, inclusive, a possibilidade de se começar com algumas décadas de atraso. Já o grupo de Stern defende a aplicação imediata do princípio da precaução, o que implica em investimentos fortes desde o início. Recomenda que se invistam US\$ 134 bilhões no presente, passando para US\$ 349 bilhões em 2025 e US\$ 930 bilhões em 2050, para que as emissões comecem a decrescer em 2012, e a concentração atmosférica não ultrapasse o limiar de 500 ppm CO₂e.

A recomendação de Nordhaus é que se invistam US\$ 20,5 bilhões em 2015, passando para US\$ 34,7 bilhões em 2025 e US\$ 132 bilhões em 2050, e que as emissões atinjam o pico em 2105, levando a concentração atmosférica a 710 ppm CO₂e em 2175 (NORDHAUS, 2007e).

A proposta de Stern visa a garantir um patamar máximo de aumento da temperatura de 2 °C, sob a premissa de que níveis acima desse são demasiado perigosos para a sociedade e para os ecossistemas. A recomendação de Nordhaus, por outro lado, é a de que, uma vez que tenham sido computados os custos de mitigação e os danos monetários conhecidos decorrentes da inação, a trajetória adequada dos investimentos passa a ser guiada pelo critério da eficiência econômica marginal, e o aquecimento resultante, considerado ótimo, é de 2,71 °C em 2105 e 3,47 °C em 2205, relativamente a 1900 (ibidem) – mas, de acordo com os dados do IPCC (2007a: 15), o aquecimento para uma concentração de 710 ppm CO₂e pode chegar a 4,9 °C.

Por que os estudos de Nordhaus e de Stern levam a recomendações tão distintas?

Esta dissertação foi organizada de forma a responder a essa questão com foco

no eixo quantitativo, de quanto e quando investir. Mesmo assim, faremos preliminarmente algumas considerações sobre o eixo qualitativo.

5.1.1 Eixo qualitativo: instrumentos econômicos

A principal diferença a ser ressaltada é entre os autores. William Nordhaus é um dos grandes disseminadores da teoria econômica convencional, não só através de seu famoso manual de macroeconomia, que já está na 19ª edição, mas também pelos inúmeros artigos publicados nas mais prestigiosas revistas acadêmicas de economia. Uma revisão de sua obra mostra que ele faz parte de um grupo de *scholars* de elite que se esforçam para que a economia não se distancie muito dos trilhos, à diferença de economistas que trabalham na ponta do conhecimento e procuram romper as barreiras da tradição (Daron Acemoglu, Douglass North e George Akerlof, por exemplo).

Nicholas Stern teve bastante contato com a academia estadunidense, onde possui bom trânsito, mas é um economista formado na bem mais pluralista tradição britânica. O maior destaque da sua carreira não é acadêmico, mas o trabalho na fronteira com a política pública – no Banco Mundial, no Tesouro Britânico, e mesmo na Universidade de Londres, onde estudou a realidade dos países asiáticos, particularmente da Índia.

Nordhaus e Stern são autores que operam em diferentes frequências. Enquanto o primeiro desenvolve pesquisa aplicada exclusivamente nos marcos da tradição neoclássica, admitindo novas idéias e métodos apenas quando já estão integrados ao *core* da ciência normal (quando passaram da fronteira para os manuais), Stern tem um pé no estudo e outro na prática. Não deve impressionar que tenha tido, nos últimos quatro anos, uma rotina incansável de viagens pelo mundo para a disseminação das idéias de seu relatório, enquanto a atuação Nordhaus se resume estritamente aos confins da pesquisa.

Em consequência dessa perspectiva mais ampla e da formação menos ortodoxa, Stern é aberto a teorias e métodos que vão além do convencional enfoque da análise de custo-benefício:

“[c]areful analytical investigation by economists of policies on climate change involves the whole range of the tools of our trade, including the economics of risk and uncertainty, innovation and technology, development and growth, international trade and investment, financial markets, legal issues, ethics and welfare, as well as public and environmental economics. It will no doubt require the development of further analytical methods. And it necessitates close collaboration with scientists and other social scientists” (STERN, 2008: 24).

Disso decorre um entendimento do processo de desenvolvimento que ultrapassa as fronteiras dos modelos estilizados preferidos por Nordhaus. Uma visão mais pormenorizada, com menos pretensão de generalidade – mas não muito distinta no que concerne à relação entre crescimento econômico e meio ambiente (e.g.: STERN, 2005).

Tudo isso levou Stern a perceber que a hipótese dos mercados eficientes não passa de uma abstração teórica sem correspondência na realidade, e que nas economias de verdade existem curvas de aprendizado, *lock-ins* tecnológicos, equilíbrios não cooperativos em negociações internacionais, preferências flexíveis e passíveis de modificação frente à política pública, ecossistemas com resiliência limitada, entre muitas outras coisas. Já William Nordhaus vai na linha de internalização das externalidades → alocação eficiente dos recursos → transferências (potenciais) para remediar os prejudicados.

Mas, como argumentou Amartya Sen (2005: 48), o critério de Kaldor-Hicks não passa de um critério de Pareto disfarçado, e este, “como o 'espírito de César', pode 'vir quente do inferno’”:

“a questão de por que a mera possibilidade de compensar os perdedores deveria ser adequada para estabelecer uma melhora social mesmo se a compensação não fosse de fato paga. Entre os perdedores poderiam incluir-se as pessoas menos favorecidas e mais miseráveis da sociedade, e não é nenhum consolo para elas ouvir que é possível compensá-las plenamente, mas ('Deus do céu!') não há nenhum plano para fazê-lo. Se, por um lado, os perdedores forem efe-

tivamente compensados, o resultado geral – após a compensação – é uma melhora paretiana, portanto não há a *necessidade* de teste de compensação como suplemento do princípio de Pareto. Assim, os critérios de compensação ou *não são convincentes* ou *são superfluos*. O princípio de Pareto não pode ser ampliado para abranger juízos sobre distribuição sem que realmente se façam juízos distributivos comparativos interpessoais” (ibidem: 49).

As recomendações de instrumentos econômicos de Nordhaus e de Stern decorrem menos de procedimentos técnicos do que da visão pré-analítica de cada um deles sobre a validade ou não da hipótese dos mercados eficientes. Enquanto William Nordhaus dificilmente se convencerá de que qualquer mecanismo além dos preços pode ser benéfico, Stern sabe que, na prática, as coisas são bem diferentes.

5.1.2 Eixo quantitativo: quanto e quando investir

A mais fundamental decisão que o modelista deve tomar é quanto ao tipo de modelo. Quando opta pela otimização, está escolhendo também a regra de decisão, que é a do custo-benefício, a “gramática” do marginalismo, e o “vocabulário” das unidades monetárias. Já os modelos de simulação não estão atrelados a uma regra de decisão específica.

Nordhaus adota o enfoque prescritivo, em que um modelo de custo-benefício determina a meta de mitigação de emissões, além da trajetória dos investimentos. Esse tipo de procedimento tem influência sobre os resultados porque parte de parâmetros econômicos (consumo) e subjetivos (preferências) para determinar os resultados em termos de parâmetros físicos (emissões, concentração atmosférica de GHG, temperatura). Inverte, com isso, a ordem real das coisas, pois é a natureza que impõe limites à economia, e não o contrário.

Já o modelo de Stern recorre à análise multicritérios, acoplando um estudo detalhado e desagregado dos riscos climáticos, responsável por determinar a meta de mitigação, a um modelo de custo-eficiência, que determina a trajetória economicamente satisfatória dos investimentos. Parte de parâmetros biofísicos para determinar os parâmetros econômi-

cos, o que reduz a possibilidade de *overshooting* da capacidade ecossistêmica de provisão de serviços essenciais para o homem. Daí a adequação do estudo de Stern ao quase consenso que se formou em torno do teto de 2 °C para o aquecimento.

A maneira como cada corrente aplica a análise marginal está ligado a essa discussão. A corrente gradualista pretende que a trajetória ótima das variáveis biofísicas, junto com a distribuição, sejam determinadas pela eficiência marginal (custo marginal = benefício marginal) de variáveis econômicas. Esse procedimento seria adequado se as externalidades ambientais e os critérios valorativos necessários para a determinação da distribuição justa pudessem ser perfeitamente internalizadas pelo sistema de preços, mas isso está longe de ser possível. Com isso, o procedimento aceitável, do ponto de vista da sustentabilidade forte (substituibilidade limitada entre capital natural e outras formas de capital), é que o critério da eficiência marginal seja utilizado para a alocação dos recursos uma vez determinadas a escala ótima e a distribuição justa (ROMEIRO, 2001).

Uma constatação assustadora dos resultados do DICE-2007 ajuda a esclarecer a imensa importância que tem a regra de decisão. A trajetória de mitigação prescrita pelo modelo de Nordhaus incorre em custos agregados, em termos de valor presente, iguais a 0,56% do produto agregado da economia. Isso se compara com custos agregados da inação de 5,3% (Tabela 10), que caem para 1,44% uma vez implementada a trajetória ótima.

Caso seja adotada a trajetória de mitigação proposta por Stern, o valor presente dos custos é de 0,61% do produto agregado, ou 9% a mais do que no caso da rampa de Nordhaus. E o valor presente dos danos agregados cai para 0,22%, uma eficácia 31,6% superior à de Nordhaus – sempre segundo o DICE-2007, e mantendo-se o mesmo denominador para que os números sejam comparáveis.

Uma regra de decisão que não tivesse como base a eficiência marginal claramente optaria pela trajetória de mitigação de Stern, pois custa apenas 9% a mais do que a rampa de Nordhaus e tem eficácia 31,6% maior. O problema é que, no caso da proposta de Stern, os custos de mitigação crescem muito no curto prazo (chegam a US\$ 1,23 trilhões em 2035), o que é ineficiente do ponto de vista da análise marginal, já que os benefícios são menores no curto prazo – no caso da rampa, o investimento ótimo em mitigação em 2035 é

de meros US\$ 56 bilhões.

O procedimento adotado por Nordhaus não garante que a escala sustentável de exploração dos ecossistemas seja respeitada, mas faz questão de que o critério da eficiência alocativa seja cumprido. Já o relatório Stern criticou explicitamente essa perspectiva, e preferiu garantir, em primeiro lugar, que a escala sustentável não seja ultrapassada, para só então determinar a solução economicamente viável.

Horizonte do modelo

O segundo fator relevante para os resultados quantitativos é o horizonte do modelo. Como visto no item 4.2.2, dois procedimentos são aceitáveis: horizonte infinito ou muito longo e taxa de desconto elevada, ou horizonte mais curto (até duzentos anos é o padrão) e taxa de desconto baixa ou nula. No primeiro caso, a taxa de desconto faz com que os custos e benefícios que estão muito distantes no tempo sejam menores, mas não nulos. Já no segundo caso, o próprio modelista determina qual é o prazo relevante, e a taxa de desconto tem menor efeito sobre o período escolhido.

Talvez o modelo de Nordhaus seja o que melhor se sai neste sentido, pois tem horizonte longo (600 anos) e taxa de desconto do tempo alta (1,5%). Com isso, dá menor peso às gerações que viverão, digamos, daqui a cem anos, mas leva também em consideração, apesar de muito pouco, as gerações que viverão daqui a duzentos anos. O modelo de Stern, por outro lado, concentra uma parte considerável de seus resultados calculados no longuíssimo prazo, devido à taxa de desconto do tempo quase nula.

Um exemplo simples ajuda a esclarecer o assunto. Tomem-se as equações do DICE-2007, a trajetória de mitigação ótima de Nordhaus, e um modelo com horizonte de mil anos. Aplicando-se a taxa de desconto do tempo de Nordhaus, de 1,5% (e $\eta = 2$), tem-se que 77,41% da utilidade agregada calculada estará concentrado nos primeiros cem anos da série, 94,82% nos primeiros duzentos anos, e 99,9% nos primeiros 600 anos. Esses resultados estão expressos na Tabela 9, bem como os resultados da adoção do procedimento de desconto de Stern.

TABELA 9 – valor presente líquido (%) calculado para diferentes intervalos de tempo, no DICE-2007, com os procedimentos de desconto de Nordhaus e de Stern.

Período	Procedimento de desconto	
	Nordhaus ¹	Stern ²
2005 a 2105 (primeiros 100 anos)	77,41%	12,72%
2005 a 2205 (primeiros 200 anos)	94,82%	24,69%
2005 a 2605 (primeiros 600 anos)	99,99%	67,07%
2205 a 3005 (últimos 800 anos)	5,18%	75,31%
2605 a 3005 (últimos 400 anos)	0,01%	32,93%

1 – Taxas de mitigação do cenário ótimo de Nordhaus (2008) e modelo com horizonte de 1.000 anos; 2 – modelo com horizonte de 1.000 anos. A simulação teve de usar $\eta = 0,95$, pois $\eta = 1$ é incompatível com a função de utilidade de Nordhaus (Equação 19).

Os resultados são condicionais à estrutura do DICE-2007, mas, devido ao efeito assintótico que decorre do grande horizonte de análise, podem ser tomados como razoavelmente representativos daquilo que aconteceria no PAGE-2002. Vê-se que o modelo de Nordhaus dá bastante ênfase aos primeiros 100 anos do horizonte temporal, bem menos ênfase aos 100 anos seguintes, e muito pouca ênfase aos períodos posteriores. Esse procedimento poderia ser criticado por desconsiderar a maior parte das gerações futuras (pensando-se num horizonte infinito), mas a perspectiva contrária é igualmente problemática.

No modelo de Stern, 1/3 dos resultados dizem respeito às gerações de 600 anos no futuro, ao passo que apenas 12,72% dizem respeito aos primeiros 100 anos. Resultados desse tipo não são de nenhuma maneira justificáveis, pois impõem sobre o presente um ônus desmedidamente alto, igual à acumulação dos ônus de *infinitas* gerações futuras.

Caso os modelos fossem exatamente iguais (com a estrutura do DICE-2007), e variassem apenas o horizonte e o procedimento de desconto, o valor presente do PIB líquido de danos calculado por Stern, no cenário BAU, seria 45,7 vezes superior ao calculado por Nordhaus.

Esse resultado mostra que, apesar de ser correta a idéia de que as gerações futuras merecem tratamento igual ao da geração presente, que está por trás de uma taxa de des-

conto do tempo (ρ) próxima de zero, a sua aplicação exige parcimônia na determinação do horizonte temporal do modelo.

Procedimento de desconto

O tema do procedimento de desconto é central em modelos econômico-climáticos, razão por que foi apontado pelos gradualistas como *a única* explicação para as conclusões divergentes de Stern e de Nordhaus. Reproduzimos a seguir os resultados de testes de sensibilidade para os dois parâmetros da equação de Ramsey.

TABELA 10 – danos agregados como porcentagem do PIB no cenário BAU (*business as usual*) para diferentes taxas de desconto do tempo, modelos de Nordhaus e de Stern.

Cenário	DICE-2007			PAGE-2002		
	$\eta = 2$			$\eta = 1$		
	$\rho = 0,1\%$	$\rho = 1,0\%$	$\rho = 1,5\%$	$\rho = 0,1\%$	$\rho = 1,0\%$	$\rho = 1,5\%$
Mercado, com catástrofe (Stern)	x	x	x	5,0%	2,3%	1,4%
Índice	x	x	x	100	46	28
Mercado + não mercado, com catástrofe*	9,91%	6,6%	5,3%	10,9%	5,2%	3,3%
Índice	100	66,6	53,48	100	47,7	30,3
	$\rho = 1,5\%$			$\rho = 0,1\%$		
	$\eta = 1$	$\eta = 1,5$	$\eta = 2$	$\eta = 1$	$\eta = 1,5$	$\eta = 2$
Mercado, com catástrofe (Stern)	x	x	x	5,0%	2,9%	x
Índice	x	x	x	100	58	x
Mercado + não mercado, com catástrofe*	7,81%	6,43%	5,3%	10,9%	6,5%	x
Índice	100	82,33	67,86	100	59,6	x

* Este cenário é diferente nos modelos de Nordhaus e de Stern, apesar de incluir as mesmas categorias de danos, pois as variáveis consideradas e os cálculos são distintos. Com isso, a comparabilidade não é perfeita; **siglas e símbolos:** DICE – *Dynamic Intergrated Climate Economy model* (NORDHAUS, 2008); PAGE – *Policy Analysis of Greenhouse Effect* (HOPE, 2006; STERN, 2007); ρ = taxa de desconto do tempo; η = elasticidade da utilidade marginal do consumo (Equação 3); **cenários:** os dois que deram origem aos “números mágicos” do relatório Stern, 5% e 20%.

Fonte: os números do PAGE-2002 foram obtidos de Stern (2007: 667 – 668), e os do DICE-2007 resultam da manipulação do modelo, disponível em Nordhaus (2007e).

A Tabela 10 mostra que ambos os modelos têm elevada sensibilidade ao parâmetro ρ , mas o PAGE tem mais, devido ao horizonte temporal infinito. O mesmo vale para η : sensibilidade elevada em ambos, na casa dos 40% para um aumento de η de 1 para 2; maior sensibilidade no PAGE; e resultados do DICE tão ou mais pessimistas do que os do PAGE.

O fato de que para $\rho = 1\%$ e $1,5\%$ o DICE-2007 estima custos mais elevados do que o PAGE-2002 prova que a função de danos do DICE é mais pessimista.

Confirmam-se, assim, os argumentos de que o procedimento de desconto tem elevada influência sobre os resultados dos modelos econômico-climáticos. Mas os resultados dependem de todos os procedimentos técnicos adotados, não apenas da taxa de desconto. Por exemplo, o fato de que o DICE, mesmo com taxa de desconto superior à de Stern, calculou danos agregados semelhantes aos do PAGE, não levou Nordhaus a propor políticas parecidas com as que propôs Stern. Por quê? Porque as regras de decisão são diferentes.

Tratamento da incerteza

A Figura 7 deixou claro que a aplicação de simulações de Monte Carlo ao DICE-2007 gera uma considerável dispersão das estimativas da variável aumento da temperatura. Mas quais são as implicações disso para os custos agregados?

Um exercício simples permite que se responda a essa pergunta. Inserimos no DICE-2007 os valores mais pessimistas possíveis de cada um dos parâmetros incertos escolhidos por Nordhaus e apresentados no item 3.1.4. O resultado foi um dano agregado, em termos de valor presente, de 21,5% do PIB mundial. Já a simulação com os valores mais otimistas dos parâmetros produziu um dano agregado de 2%. Um exercício parecido feito no relatório Stern, e apresentado na Tabela 7, resultou em 32,6% e 0,3% para as estimativas mais pessimista e mais otimista, respectivamente (a maior dispersão das estimativas do PAGE-2002 se deve tanto ao horizonte infinito do modelo quanto ao fato de ter feito 1.000 simulações de Monte Carlo).

Esses resultados mostram duas coisas: a primeira é que basicamente tudo pode

acontecer, desde um impacto negligível até uma catástrofe de magnitudes impensáveis. A segunda é que aquilo que Weitzman chamou, em economiquês convencional, de “fdps de caudas longas”, mas que significa simplesmente ignorância quanto aos possíveis impactos de temperaturas elevadas, é bem mais determinante para os resultados do que qualquer um dos demais fatores discutidos neste capítulo. Para que não haja dúvidas, basta fazer as contas e notar que, no caso do DICE, o valor dos danos no extremo pessimista é quase 11 vezes maior do que o valor dos danos no extremo otimista; no caso do PAGE, são 110 vezes.

No entanto, o resultado do DICE-2007 (5,3%) fica muito mais próximo do extremo otimista do que do extremo pessimista, ao passo que os dois principais resultados do PAGE-2002 (5% e 10,9%) captam bem melhor a dispersão dos possíveis resultados.

A segunda conclusão que se tira é a de que, além de se equivocarem os graduallistas por atribuírem somente ao procedimento de desconto as diferenças entre os resultados de Stern e de Nordhaus, erram também ao acreditarem que é à taxa de desconto que os resultados são mais sensíveis. Como visto, a dispersão resultante das diferentes taxas de desconto é minúscula quando comparada à dispersão resultante da modelagem da incerteza.

Expoente da função de danos (β)

A Tabela 11 apresenta os testes de sensibilidade para o parâmetro β . Observa-se maior sensibilidade no DICE, em que os números resultam de simulações determinísticas, do que no PAGE, cujos resultados são médias de simulações probabilísticas.

Duas conclusões: (i) o parâmetro β tem um efeito considerável sobre os resultados, igual ou maior do que o da taxa de desconto; (ii) como já foi mencionado, a função de danos do DICE-2007 é bem mais pessimista do que a do PAGE-2002.

TABELA 11 – danos agregados como porcentagem do PIB no cenário BAU (*business as usual*) para diferentes expoentes da função de danos, modelos de Nordhaus e de Stern.

Cenário	DICE-2007			PAGE-2002		
	$\beta = 1,3$	$\beta = 2$	$\beta = 2,25$	$\beta = 1,3^*$	$\beta = 2$	$\beta = 2,25^*$
Mercado, com catástrofe (Stern)	x	x	x	5,0%	x	6,0%
Índice	x	x	x	100	x	120
Mercado + não mercado, com catástrofe**	1,99%	5,30%	16,15%	10,9%	x	14,2%
Índice	100	266,33	811,56	100	x	130,28

* Os testes de sensibilidade do PAGE-2002 foram feitos num contexto probabilístico, em que o parâmetro β variou em um intervalo que teve como moda o valor aqui apresentado; ** este cenário é diferente nos modelos de Nordhaus e de Stern, apesar de incluir as mesmas categorias de danos, pois as variáveis consideradas e os cálculos são distintos. Com isso, a comparabilidade não é perfeita; **siglas e símbolos:** DICE – *Dynamic Intergrated Climate Economy model* (NORDHAUS, 2008); PAGE – *Policy Analysis of Greenhouse Effect* (HOPE, 2006; STERN, 2007); β = expoente da função de danos (Equações 9 e 18); **cenários:** os dois que deram origem aos “números mágicos” do relatório Stern, 5% e 20%.

Fonte: os números do PAGE-2002 foram obtidos de Stern (2007: 667 – 668), e os do DICE-2007 resultam da manipulação do modelo, disponível em Nordhaus (2007e).

Tecnologia

Que efeitos teria a inclusão de tecnologia endógena nos modelos?

O efeito no DICE foi calculado por Popp (2004), que estimou um ganho de bem-estar de entre 1,9% e 45,3% no cenário BAU. Já as estimativas de custos de mitigação poderiam cair 185%, em média, principalmente nos primeiros períodos do modelo, como visto no item 3.1.1.

O relatório Stern tem dois modelos quantitativos distintos, um com tecnologia endógena (o modelo *bottom-up*), e outro com tecnologia exógena (o PAGE-2002). Em relação a este último, não há estimativas do impacto da tecnologia sobre os danos da inação.

Ponderação para a igualdade e desagregação espacial

O DICE exclui a possibilidade de dar igual peso aos danos em países ricos e pobres, fazendo uma explícita “ponderação para a desigualdade”. Já o relatório Stern aumentou a sua estimativa mais pessimista em 25% para refletir a necessidade de ponderação para a igualdade, mas esse número não pode ser tomado como evidência do impacto do procedimento sobre os resultados, porque foi determinado fora do modelo.

Na prática, nem o DICE nem o PAGE fizeram ponderação para a igualdade, de forma que não houve impacto desse procedimento sobre os resultados.

A desagregação espacial provavelmente tem resultados sobre o o modelo de Stern, mas não há testes de sensibilidade disponíveis para esse fator. O mais provável, de qualquer maneira, é que o DICE capte em alguma medida os efeitos da desagregação, pois resulta da agregação do RICE, de forma que não deve haver efeito considerável sobre a diferença dos resultados dos modelos.

Visão pré-analítica

A idéia de que a natureza representa uma limitação real (no sentido físico da palavra) ao crescimento econômico deixou recentemente de ser especulação teórica de economistas ecológicos. Passou a ser especulação teórica também de economistas convencionais.

Acemoglu *et. al.* (2009) apresentam uma adaptação do modelo de Ramsey-Cass-Koopmans, com formulações simples que expressam a relação entre bem-estar humano e preservação do meio ambiente, e mostram que, no longo prazo, o crescimento *laissez-faire* sempre leva à depleção total do capital natural, e ao desastre. A economia do modelo tem um setor que opera com tecnologias limpas e outro que opera com tecnologias sujas, e a qualidade do meio ambiente depende do tamanho do primeiro, além da substituíbilidade entre capital natural e outras formas de capital, e da taxa de regeneração dos ecossistemas. Quando o capital natural tende a zero, há uma perda infinita de bem-estar, e o prêmio de risco para que isso não aconteça também se torna infinito.

Sem intervenção no sentido de controlar o *thoroughput*, mesmo uma economia com dinâmica tecnológica explícita, como é a de Acemoglu e colegas, vai ao desastre. E um imposto sobre o carbono não seria suficiente, segundo os autores, sendo necessários outros instrumentos de incentivo à inovação no setor limpo, que, além do mais, deveriam ser implementados o antes possível, pois isso reduziria os riscos de catástrofe.

Não devia ser necessário que um grupo de economistas altamente insuspeitos chegasse às mesmas conclusões que a economia ecológica enfatiza há décadas para que isso tivesse a chance de ser considerado pela economia convencional. De qualquer maneira, fica claro, agora, para o *mainstream* da economia, que a visão pré-analítica radical de Nordhaus não passa no teste da lógica dedutivista.

O relatório Stern foi um trabalho inovador, em muitos sentidos, mas mostrou-se altamente conservador na questão fundamental do crescimento econômico. Como mostramos no item 4.4, os próprios argumentos e dados apresentados no documento levam à conclusão de que é praticamente impossível que se obtenham as reduções de emissão almeçadas por Stern com o crescimento econômico desejado por ele. A sua saída foi igual à de Nordhaus, de apostar em um milagre, apenas com nome diferente.

5.1.3 Síntese

A hipótese de trabalho da dissertação foi a de que “têm peso igualmente relevante dois conjuntos de fatores técnicos, e o resultado final deriva de uma complexa interação entre eles”. O primeiro é relativo à estrutura dos modelos, com destaque para o tratamento da incerteza, o nível de desagregação no tempo e espaço, e o tratamento da inovação tecnológica, e o segundo contempla o processo de desconto do futuro, em que inevitavelmente se deságua na complicada esfera da ética.”

Em que medida ela foi corroborada ou rejeitada pela análise deste capítulo?

A pesquisa mostrou que não têm peso igualmente relevante esses dois conjuntos de fatores, e que nem sequer eles podem ser agrupados dessa maneira. Cada fator tem peculiaridades que o distinguem dos demais em diversos aspectos. Assim, o conteúdo central da

hipótese foi claramente rejeitado. Além do mais, outros fatores relevantes foram apontados como determinantes dos resultados, ao mesmo tempo em que o estudo de alguns não foi possível dentro dos limites desta pesquisa.

Por outro lado, a idéia de que o resultado final deriva de uma complexa interação entre diversas premissas teóricas e procedimentos metodológicos se mostrou correta.

A investigação sugeriu, em primeiro lugar, que a regra de decisão se sobrepõe a todas as demais características dos modelos na determinação da diferença entre as propostas de Nordhaus e de Stern. Se Nordhaus abrisse mão do critério da eficiência marginal como determinante absoluto das decisões econômicas, as suas recomendações, com base no DICE-2007, se aproximariam muito das de Stern, pois verificou-se que os danos da inação calculados pelo DICE, mesmo com taxa de desconto mais alta, foram compatíveis com os danos estimados pelo PAGE.

O segundo fator com maior influência sobre os resultados é a combinação do procedimento de desconto como o horizonte temporal. Duas combinações são possíveis: horizonte longo ou infinito e taxa de desconto elevada, ou horizonte menor e taxa de desconto baixa ou nula. Um olhar atento mostra que a última opção é superior, pois em vez de empregar uma taxa de desconto injustificavelmente alta (em termos éticos) para corrigir o problema do horizonte longo demais (também eticamente discutível), adota taxa de desconto e horizonte temporal eticamente justificáveis.

Infelizmente, nem Nordhaus nem Stern seguiram o procedimento apropriado. Com isso, o relatório Stern produziu estimativas de custos da inação cujas duas terças partes dizem respeito às gerações que viverão daqui a duzentos anos e depois. As estimativas de Nordhaus atribuíram esse mesmo percentual aos próximos cem anos, o que é questionável, mas parece mais aceitável.

O resultado da combinação de procedimentos adotada por Nordhaus é um valor presente relativamente mais baixo de custos e benefícios, o que, tudo o mais constante, teria levado a estimativas muito inferiores às que se obtém com a combinação de procedimentos de Stern. Nesse caso, esperar-se-ia que o relatório Stern tivesse produzido estimativas de danos muito mais elevadas, mas não foi o que aconteceu. Tudo o mais não estava constante.

Como a função de danos do DICE é mais pessimista do que a do PAGE, houve uma atenuação do efeito do baixo desconto associado a horizonte longo.

Em terceiro lugar está o tratamento da incerteza. Dependendo da maneira como se ponderam os cenários mais pessimistas relativamente aos mais otimistas, os resultados podem variar em dez, vinte, e até cem ordens de magnitude.

O procedimento de Nordhaus é fazer recomendações com base em estimativas determinísticas, supondo um mundo sem incertezas. Isso leva a uma estimativa de danos agregados bem mais próxima do extremo otimista do que do pessimista. Já Stern produz distribuições de probabilidades dos resultados, e faz recomendações com base numa análise integrada dos riscos calculados.

A função de danos é o quarto item com efeito sobre os resultados dos modelos. A forma funcional empregada pelo DICE-2007 é mais pessimista do que a do PAGE-2002. Além disso, o DICE adota um expoente quadrático, ao passo que no relatório Stern esse parâmetro assume valores em uma distribuição triangular com moda igual a 1,3. Com essas combinações, os resultados do DICE são bem mais pessimistas do que os do PAGE.

O quinto fator é a tecnologia, que é exógena em ambos os modelos no caso dos custos de inação, mas é endógena no cálculo dos custos de mitigação de Stern. Um exercício simples mostrou que, se os custos de mitigação do relatório Stern tivessem sido calculados com base em tecnologia exógena, teriam sido de 100% a 200% superiores nas cinco primeiras décadas (como aconteceu com o DICE), que são as mais importantes.

Finalmente, discutimos o tema da visão pré-analítica que presume a inexistência de restrições ao crescimento exponencial da economia. Enquanto Nordhaus materializa essa idéia na premissa de uma milagrosa *backstop technology*, Stern se limita a defender que o PIB pode vir a se desacoplar completamente do uso do carbono.

A ponderação para a igualdade não foi aplicada aos modelos, e o efeito da desagregação espacial não pôde ser estimado.

Em síntese, os modelos, os procedimentos, e as perspectivas analíticas são bastante diferentes, e as recomendações de política derivam de uma complexa interação entre esses fatores. Cinco itens dominam os resultados, em ordem de relevância: regra de deci-

são, procedimento de desconto e horizonte temporal, tratamento da incerteza, função de danos, e tratamento da tecnologia.

5.2 A CIÊNCIA POSITIVA PODE ENFRENTAR O PROBLEMA DA INCERTEZA IRREDUTÍVEL?

“Every cost-benefit analysis is an exercise in subjective uncertainty (...) Formally, of course, cost-benefit analysis can deal with uncertainty – by taking expected values, relying on expected-utility theory, accounting for risk aversion, and using all of the other, by now familiar, paraphernalia of the modern theory of the economics of uncertainty. In principle, it does not matter whether the probabilities that show up in our cost-benefit calculations are objective or subjective because the mathematical formulas are the same for either case. But in lumping together objective and subjective uncertainties and thereby obscuring their distinction (...) I think that contemporary macroeconomics goes too far and leads to a mindset that too-easily identifies probability (and 'economic science') with exercises in calibration to sample frequencies from past data” (WEITZMAN, 2007: 19).

O investimento em ciência reduz a incerteza forte, pois aumenta a capacidade de processamento e melhora a capacidade cognitiva, diminuindo a incerteza procedimental; aumenta a quantidade e qualidade de informações disponíveis, diminuindo a indeterminação; e descobre novos estados possíveis de coisas, diminuindo a ignorância. No entanto, é lúcido admitir que há um componente irredutível na incerteza, devido à complexidade dos ecossistemas e da sua relação coevolutiva com a sociedade (NORGAARD, 1994), e que não se sabe quando se atingirá esse limite nem qual será.

Na verdade, a própria natureza da incerteza torna impossível que se meça a sua magnitude, intensidade, ou qualquer outra propriedade. Nesse caso, é necessário que se tomem decisões com base naquilo que se tem à disposição, mesmo que esteja bem longe da perfeição (HENRY, 2006). A Figura 11 mostra esse raciocínio de maneira esquemática.

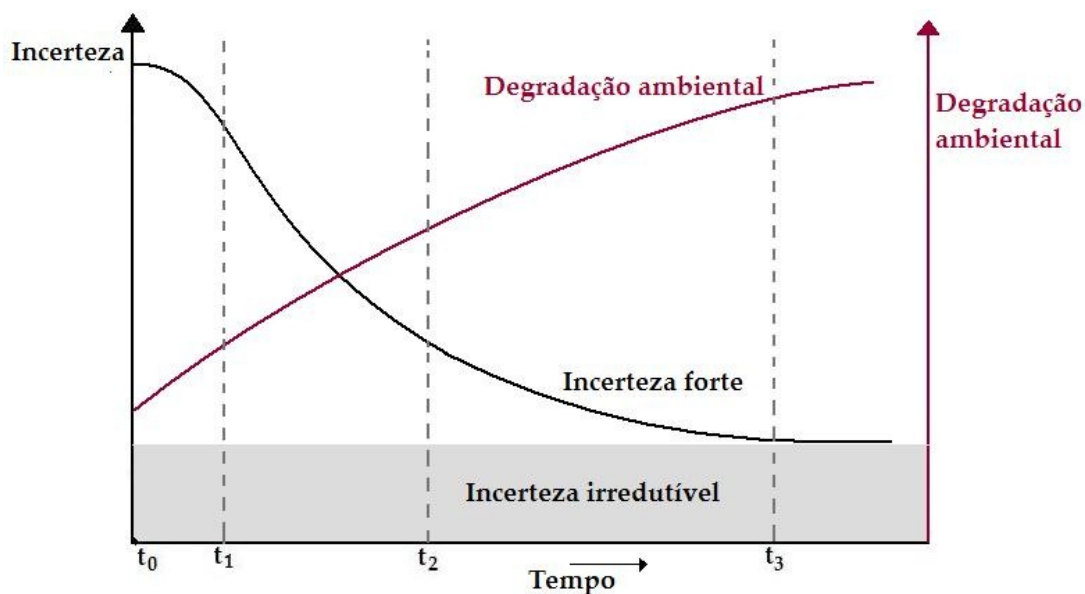


FIGURA 11 – esquema hipotético da evolução no tempo da magnitude das incertezas forte e fraca – problemas socioambientais envolvendo coevolução e complexidade.

Pode-se supor que o estado inicial do estudo de um fenômeno socioambiental seja composto de muita incerteza forte (quase tudo se ignora sobre o fenômeno). Por exemplo, nos anos 1950 o conhecimento sobre as formas funcionais, os parâmetros e as distribuições de probabilidade dos fenômenos que governam o efeito estufa era mínimo, ao passo que *déficit* de capacidade computacional, a falta de séries de dados e o desconhecimento das possíveis relações causais eram máximos (curva de incerteza forte, t_0). Já em meados dos anos 1970 (t_1), quando um pequeno grupo de cientistas havia lançado a hipótese do aquecimento global e estudado o fenômeno mais a fundo, aumentou consideravelmente a quantidade de relações causais conhecidas com distribuições de probabilidades únicas, aditivas e minimamente confiáveis. Diminuiu, com isso, a incerteza forte, ao mesmo tempo em que aumentou a degradação ambiental.

A decisão de postergar a ação contra um fenômeno incerto mas potencialmente catastrófico se baseia na idéia de que o ganho de informação que decorre da diminuição da incerteza forte pode vir a justificar um nível menos intenso de ação. O risco que se corre,

por outro lado, é de que, enquanto se espera, e a degradação ambiental aumenta, sejam atingidos os limiares de resiliência que detonarão resultados catastróficos. A pergunta, portanto, é: onde está o limiar de resiliência? E a resposta, naturalmente, é que não se sabe.

O gráfico presume que a incerteza irredutível representa um limite para a queda da incerteza forte. Existe um componente essencialmente imprevisível, cujos maiores representantes são os fenômenos emergentes da dinâmica evolutiva. Quando se atinge esse piso, a pesquisa deixa de poder resolver os problemas, e fica tudo nas mãos do julgamento.

Os limiares ecossistêmicos são fenômenos emergentes da dinâmica evolutiva, de forma que a informação sobre eles está localizado na área de incerteza irredutível do gráfico. Faça-se mais ou menos pesquisa, nunca se saberá ao certo onde eles estão.

Aceitas essas idéias, a conclusão imediata é que decisões devem ser tomadas com base nas informações que se tem, pois postergá-las não vai ajudar a conhecer o que é fundamental, mas vai contribuir para que o sistema se aproxime de limiares perigosos.

Uma distinção importante que surge dessa discussão é entre o tratamento da incerteza no patamar dos modelos, por um lado, e o seu enfrentamento no patamar da tomada de decisão, por outro. No primeiro caso, modelos probabilísticos são capazes de lidar com a incerteza fraca, e de maneira limitada, com a incerteza forte. Mas a incerteza irredutível não possa ser modelada nem reduzida.

O enfrentamento da incerteza irredutível só pode acontecer na esfera da tomada de decisão, de forma que são necessários instrumentos que aliem os desenvolvimentos científicos positivos a um processo decisório capaz de otimizar o julgamento sob incerteza (NORGAARD & BAER, 2005; STEWART, 2000). Daí o princípio da precaução.

“[T]hese new problems are in many ways different from those of research science (...) [which] has its means for quality assurance of the products of the work, [i.e.] peer review (...) For these new problems, quality depends on open dialogue among those affected. This we call an 'extended peer community' (...) Seen out of context, such a proposal might seem to involve a dilution of the authority of science, and its dragging into the arena of politics. But (...) this con-

text of science is one involving policy (...) They are already being created (...) called 'citizens' juries', 'focus groups', or 'consensus conferences' (...) they all have one important element in common: they assess the quality of policy proposals, including a scientific element, on the basis of whatever science they can master during the preparation period" (FUNTOWICZ & RAVETZ, 2001: 22).

Ao método de pesquisa que se aplica a situações complexas que envolvem incerteza irreduzível e interesses variados Funtowicz e Ravetz chamaram ciência pós-normal. Defendem que quanto maior for a intensidade da incerteza e maiores forem os interesses e riscos envolvidos na tomada de decisão, menores serão as possibilidades de a ciência positiva sozinha poder determinar as escolhas adequadas.

A idéia de uma ciência pós-normal é a de se reconhecer que não há soluções ótimas e objetivas para problemas complexos de escala ampla, como as mudanças climáticas, e que, portanto, deve-se desenvolver, paralelamente à racionalidade substantiva, positiva, determinística, a racionalidade procedimental, que se preocupa com a trajetória mais do que com os resultados. O critério de demarcação da ciência pós-normal seriam os fatos disponíveis à *extended peer-community*, muito mais amplos do que aqueles de que dispõe a comunidade do tradicional *peer-review*.

Hammond (2007) apresenta dois argumentos importantes para fortalecer essa visão: o primeiro é que o raciocínio analítico, do qual a matemática é a máxima representante, está, com frequência, perfeitamente correto, se feito de maneira perfeitamente correta, mas terrivelmente errado se feito de maneira errada. O segundo é que, mesmo estando perfeitamente corretos, os resultados de um modelo formal podem não ser adequados para aqueles que recorrem majoritariamente à intuição como ferramenta para a tomada de decisão. Decisões que envolvem altos riscos e interesses devem ser tomadas com base na maior quantidade de indicadores possíveis.

Essa perspectiva também é defendida por Norgaard (1994), que reconhece os benefícios e conquistas que derivaram do positivismo, mas afirma que muitos dos problemas contemporâneos exigem uma reflexão sistêmica que colide com a idéia de atomismo

característica da ciência *normal*. Na fraqueza das ciências sistêmicas (*i.e.*, pós-normal) residiriam as dificuldades do homem para se relacionar sustentavelmente com o meio ambiente: o conhecimento sobre o cosmos coevolui com a relação que se tem com ele, de modo que uma epistemologia reducionista afeta negativamente a dinâmica da relação sociedade / ambiente, que por sua vez afeta negativamente a capacidade de entendimento da ciência.

As mudanças climáticas impõem à economia um desafio analítico totalmente novo, pois trata-se de tema em que os fatos são incertos, os valores controversos, os riscos e interesses elevados, e a decisão urgente. Nesse contexto, e considerando-se o raciocínio implícito na Figura 11, é possível sugerir o encaminhamento de três soluções paralelas.

A primeira é o conhecimento da natureza dos sistemas que estão sendo estudados, que inclui a pesquisa nas ciências naturais e economia; esta tarefa é da ciência positiva. A segunda é a melhoria dos instrumentos que fazem com que a informação chegue aos tomadores de decisão. A terceira é o desenvolvimento do processo de tomada de decisão.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Os mais importantes estudos econômicos das mudanças climáticas fazem recomendações muito diferentes, um de políticas que levam a aquecimento de entre 2,4 °C e 2,8 °C, e outro de políticas que resultam em 4 °C a 4,9 °C de aumento da temperatura em relação à era pré-industrial (segundo os dados do IPCC). Os investimentos propostos por Nordhaus e por Stern também são muito diferentes. Por que as suas análises levam a recomendações tão distintas?

Essa foi a pergunta central da dissertação, cuja resposta foi sintetizada no Capítulo 5 depois de termos apresentado, no Capítulo 2, as teorias e métodos relevantes para o entendimento dos estudos econômicos do clima, e de termos esmiuçado o modelo de Nordhaus no Capítulo 3 e o de Stern no Capítulo 4.

A resposta mais simples seria que os autores têm modelos bem diferentes, que levam a resultados díspares, e com isso fazem recomendações distintas. É quase isso, mas há uma série de qualificações importantes.

Os modelos são de fato muito diferentes. Basicamente, análise de custo-benefício e análise de custo-eficiência, respectivamente. No primeiro caso, a prescrição é feita pelo próprio modelo, que calcula a trajetória ótima das variáveis econômicas e climáticas de acordo com o critério da eficiência marginal. No segundo caso, a prescrição é feita exogenamente, em última instância pelo julgamento do analista, que avalia os resultados de modelos biofísicos e pondera os riscos envolvidos, tendo em mente o princípio da precaução. Na sequência, um modelo econômico determina os investimentos necessários para se atingir a meta estipulada.

Em termos operacionais, Nordhaus e a corrente gradualista adotam modelos de otimização do tipo Ramsey-Cass-Koopmans, um dos mais importantes modelos

neoclássicos de crescimento. Ademais, o DICE-2007 é um modelo determinístico, espacial e setorialmente agregado, e com tecnologia exógena. Já Stern adota dois modelos: um para o cálculo dos custos da inação (PAGE-2002), que é descritivo, probabilístico, espacialmente desagregado, setorialmente agregado, e tem tecnologia endógena; e outro para o cálculo dos custos da trajetória de mitigação custo-eficiente, que é setorialmente desagregado e possui tecnologia endógena.

Ainda que os modelos sejam distintos, no entanto, os seus resultados são compatíveis. A equação de danos de Nordhaus é bem mais pessimista do que a Stern, de forma que, mesmo com um procedimento de desconto e um horizonte de modelo que levam a resultados muito mais otimistas, ele chega a estimativas compatíveis com as de Stern (custos da inação de 5,3%). Se usasse o procedimento de desconto de Stern, chegaria a resultados tão ou mais pessimistas; com o horizonte de análise de Stern, os resultados seriam muito mais pessimistas.

Além do mais, a trajetória das variáveis climáticas em ambos os modelos reproduz a dos modelos biofísicos do IPCC, de forma que não há muita diferença quando a isso – na verdade, Nordhaus reproduz o cenário mais pessimista, ao passo que Stern reproduz o segundo mais pessimista.

Já os custos de mitigação de Nordhaus são muito mais altos do que os de Stern (185% a mais nos primeiros 50 anos, taxa que decresce no tempo), basicamente porque Nordhaus adota tecnologia exógena (resíduo de Solow), ao mesmo tempo em que utiliza o procedimento *ad hoc* de uma *backstop technology* (um *deus-ex-machina* tecnológico), mas presume que a mitigação será sempre feita com a tecnologia mais cara possível.

Stern utiliza um modelo setorialmente desagregado para inferir os custos de mitigação, procedimento com nível de realismo muito superior, e que implicitamente considera a dinâmica inovativa.

O cenário, então, é o seguinte:

Nordhaus e Stern têm custos de inação compatíveis (com qualificações, mas no geral é isso); os custos de mitigação de Nordhaus são bem mais elevados, principalmente nos primeiros 50 anos, que é o que interessa para a política pública no curto prazo.

A que resultados numéricos isso leva?

A política ideal ("ótima") de Nordhaus custa 0,56% do PIB agregado, e reduz os danos de 5,3% para 1,44% – o que gera aquecimento de até 4,9 °C, segundo o IPCC. A política ideal de Stern custa 0,61% do PIB agregado, e reduz os danos de 5,3% para 0,22% – com aquecimento de até 2,4 °C. Ambos os cálculos foram feitos no DICE-2007 com a taxa de desconto de Nordhaus, de forma que são diretamente comparáveis.

Nota-se que, em Stern, os custos crescem muito pouco (9%) para se obter um ganho grande em termos de redução de danos (85%). Por que Nordhaus não aproveita esse “almoço barato”, e Stern sim?

A regra de decisão de Nordhaus é a eficiência marginal: a cada *time step* do modelo, custos marginais devem igualar benefícios marginais (otimização). A regra de decisão de Stern é a eficácia ambiental + custo-eficiência. Ele escolhe primeiro a meta de aumento de temperatura (exogenamente), que consensualmente é de 2 °C. Feito isso, adota um modelo que determina o *mix* tecnológico economicamente custo-eficiente.

A diferença fundamental é a regra de decisão. Enquanto Nordhaus avalia os resultados do modelo com base em critérios subjetivos (bem-estar agregado, ou função "objetiva") e econômicos (custo-benefício), sob a lupa da eficiência marginal, para então determinar a trajetória das variáveis físicas, Stern avalia os resultados dos modelos com base em critérios físicos, econômicos, subjetivos, políticos, etc, sob a lupa da aceitabilidade de riscos e incertezas, para então determinar a trajetória das variáveis econômicas.

Nordhaus é levado a propor um imposto sobre o carbono como instrumento suficiente para controle do problema climático, ao passo que Stern propõe uma combinação de pelo menos 4 instrumentos: precificação do carbono (seja por imposto ou quantidade), comando e controle, mudança comportamental e *technology push*.

Qualificações

O modelo de Nordhaus é mais consistente do que o de Stern, pois resulta de trinta e cinco anos de pesquisa na área. Não está livre de arbitrariedades, arredondamentos

injustificados, etc, mas faz isso menos do que Stern.

Além da análise de custo-eficiência com modelo *bottom-up*, Stern calcula os custos da inação, ou do cenário BAU. Utiliza um modelo conhecido na literatura e tão bom quanto o de Nordhaus. Os grandes problemas são dois: (i) aumenta os resultados em 46,75% de forma arbitrária, para chegar ao “número mágico” de 20%; e (ii) enfatiza a comparação dos resultados do PAGE-2002 (custos da inação de 5% a 20% do PIB mundial “agora e para sempre”) com os resultados do modelo de custo-eficiência (custo de mitigação de 1% do PIB mundial “agora e para sempre”), apesar de serem grandezas absolutamente incomparáveis, já que foram obtidas por procedimentos distintos, são medidas em unidades diferentes, e têm denominadores distintos.

Adicionamento, a transparência do modelo de Stern fica muito comprometida pelo fato de ele não ter publicado os valores que adotou para os parâmetros, nem a maneira como os determinou / calibrou. Pode-se recorrer ao trabalho do autor original do modelo, que é de reprodução relativamente simples, mas não se sabe ao certo se os procedimentos do relatório foram exatamente iguais, pois não diz isso em lugar algum, mas diz em vários lugares que alterou este ou aquele procedimento. Com isso, uma reprodução 100% criteriosa do custos de inação do relatório Stern é impossível.

Já o DICE é de muito fácil reprodução. O código de programação do modelo de otimização está disponível na internet, bem como uma planilha de *Excel* que reproduz o funcionamento do modelo (só não consegue fazer a otimização). Além do mais, os procedimentos de calibragem estão relativamente bem explicados em um *background paper*. Não é perfeito, todavia, pois para se saber, por exemplo, como faz a valoração dos danos, deve-se recorrer a artigos anteriores.

O modelo de Nordhaus é agregado, mas interage com um modelo desagregado, de forma que diminui o viés de agregação.

Nordhaus é consistente no sentido de que presume crescimento elevado durante os próximos 100, 200, 600 anos, de forma que a economia aumenta de tamanho 40, 100, 200 vezes, e propõe taxas de mitigação que são factíveis nesse contexto.

Stern é inconsistente porque presume o mesmo crescimento econômico, mas

recomenda taxas de mitigação elevadíssimas, que, segundo os dados e análise histórica do próprio relatório, são impossíveis no contexto de crescimento ilimitado. Daí que ele dialoga com aqueles que percebem serem os objetivos de crescimento ilimitado e de controle do problema ambiental incompatíveis no longo prazo, quando determina a meta de mitigação exogenamente, mas cai em contradição ao não tocar no assunto "limites ao crescimento".

O tema do procedimento de desconto é altamente controverso, e a perspectiva de Stern é a mais defensável, além de se apoiar nas conclusões da maior parte dos economistas da elite da profissão que estudaram o assunto (Sen, Stiglitz, Arrow, Krugman, Pigou, Ramsey, Mirlees, Harrod, Solow, entre outros).

Mas o procedimento de desconto não pode ser analisado isoladamente. O horizonte do modelo tem de ser levado em consideração. Quando isso é feito, chega-se à conclusão de que o procedimento de Nordhaus é o menos pior, ao passo que o de Stern é quase o pior – há uma possibilidade ainda pior.

O procedimento adequado seria horizonte curto (até 200 anos é o padrão, mas o IPCC prefere 100 anos) e taxa de desconto do tempo baixíssima ou nula. O procedimento menos pior é horizonte longo e taxa de desconto alta. Nordhaus vai nesta linha, com horizonte de 600 anos e taxa de desconto do tempo de 1,5% (taxa de desconto do consumo de 5,5%). Já Stern adota horizonte infinito e taxa de desconto do tempo de 0,1% (taxa de desconto do consumo de 1,4%). Resultado: se ambos os autores utilizassem exatamente o mesmo modelo, variando apenas o desconto e o horizonte, Stern chegaria a resultados 45 vezes mais pessimistas do que Nordhaus.

Mas Stern tem uma função de danos mais otimista, que faz o contrapeso ao inadequado procedimento de desconto + horizonte temporal. A diferença entre os resultados que decorrem da adoção de hipóteses mais ou menos otimistas em relação à função de danos é de entre 0,18 e 2,67 vezes a estimativa central dos estudos. Por exemplo, Nordhaus estima danos de 1,99% do PIB agregado com $\beta = 1,3$, ao passo que a estimativa central, com $\beta = 2$, é de 5,3%. A estimativa mais pessimista ($\beta = 2,25$), então, é de 16,15% ($= 1,99\% + (2,67 \times 5,3\%)$).

Nordhaus é ortodoxo na regra de decisão, que é a eficiência alocativa, e Stern

incorpora a escala sustentável (ainda que de forma incongruente). O que fica perdido no debate, em ambos os casos, é o tema da equidade. Nordhaus o aborda de maneira consistente, é verdade, mas em sentido anti-ético (ponderação de Negishi) e fantasioso (critério de Kaldor-Hicks). Já Stern defende a ponderação para a igualdade, mas não a aplica no modelo, senão de forma *ad hoc*, aumentando os custos calculados em 25%.

Além disso, a abordagem da igualdade pelo parâmetro η da equação de Ramsey é uma complicação tão grande que deixa toda a operação confusa e sem saber-se ao certo para onde leva (o parâmetro representa, a um só tempo, a aversão à desigualdade intergeracional, aversão à desigualdade intrageracional e aversão ao risco; ao ser tudo isso, e ao ficar engessado pela calibragem da equação de Ramsey, termina não sendo nada).

O tratamento da incerteza tem grande influência sobre os resultados dos modelos, e é a área em que a economia das mudanças climáticas mais aportou, aporta e aportará, no curto prazo, à economia. A discussão envolve a teoria da utilidade esperada, as diversas tipologias de incerteza, e a maneira como isso é levado em conta nos modelos. A diferença entre um modelo probabilístico e um determinístico, no caso dos estudos de Nordhaus e de Stern, é uma variabilidade, da estimativa mais otimista à mais pessimista, de entre 3,68 e 4,06 vezes o *best guess*. Assim, por exemplo, no caso de Nordhaus, o *best guess* é um custo de inação de 5,3% do PIB agregado, e a estimativa mais otimista de 2%, de forma que a estimativa mais pessimista é de 21,5% ($= 2\% + (3,68 \times 5,3\%)$).

*

Há muito o que se aprender de ambos os estudos; principalmente, que resta um longo caminho a ser percorrido para que a economia possa lidar com o problema da sustentabilidade. Em relação ao que já se fez, os 35 anos de desenvolvimento de modelos econômico-climáticos trouxeram enormes avanços na consistência dos modelos, na acurácia da reprodução dos resultados dos modelos biofísicos, e na modelagem da incerteza. Este é hoje um procedimento possível, que dá resultados concretos e permite que se avaliem, em alguma medida, os riscos envolvidos com diferentes trajetórias de emissões. Além do mais, o tratamento da tecnologia, que não foi abordado por Nordhaus mas foi por Stern, é uma área com grandes avanços e com a possibilidade de modelagem de processos

inovativos (pesquisa, aprendizado).

Por outro lado, a regra de decisão ortodoxamente defendida pela corrente gradualista deve ser acrescida de dois critérios, com prioridade em relação a ela: escala sustentável de exploração dos recursos naturais, e distribuição equitativa dos ônus e dos bônus da política pública. O problema das análises convencionais não está em que a prescrição seja feita de maneira objetiva e transparente, mas no instrumento marginalista de prescrição, que não é suficiente para garantir que limiares avaliados (politicamente) como perigosos não sejam ultrapassados.

A superação desses problemas foi catapultada pelo relatório Stern, que renovou debates que estavam ficando obscurecidos pelas tecnicidades dos modelos quantitativos de custo-benefício. O prognóstico mais prudente atualmente é que o enfoque gradualista perca força, e que os modelos transitem para uma perspectiva mais desagregada (*bottom-up*), com horizontes menores, e baseada em simulação. É provável que as amarras à parafernália do equilíbrio geral se rompam cada vez mais. Tende a ganhar campo, com isso, o enfoque precaucionista.

Caso venha a ocorrer, essa transição será mais do que tudo consequência da pressão implícita dos cientistas naturais, que não entendem como a economia convencional pode prescrever medidas tão otimistas quanto as de Nordhaus, e dos tomadores de decisão, que precisam dar respostas convincentes ao movimento popular que está na raiz da contemporânea “retórica da sustentabilidade”.

Os *insiders* que poderão de alguma forma contribuir para essa transição são os que adotam a linguagem matemática. Por exemplo, Martin Weitzman defende que a cauda direita da função densidade de probabilidade das variáveis climáticas é longa, que é mais incerta quanto mais se distancia da moda, e que os convencionais modelos baseados na teoria da utilidade esperada são inócuos diante disso. Recebe imensa atenção. Clive Spash argumenta há bem mais tempo que as análises de custo-benefício são inadequadas na presença de incerteza irreduzível, o que dá exatamente no mesmo, mas é ignorado.

O mesmo vale para o recentíssimo esforço de Daron Acemoglu de estudar as repercussões do estudo do meio ambiente para a economia, que levou a conclusões muito

parecidas com as que a economia ecológica defende há décadas, mas que têm sido ignoradas pelo *mainstream* da economia.

Uma perspectiva mais pragmática e eficaz para o estudo da sustentabilidade poderia seguir três passos simples:

- (1) determinação de um limite máximo de exploração do recurso em questão, seja a atmosfera (*e.g.*, concentração de 500 ppm CO₂e), a floresta amazônica ou qualquer outro.
- (2) Determinação de uma regra de distribuição dos ônus do controle. Em muitos casos, e certamente no das mudanças climáticas, três critérios são necessários: responsabilidade histórica, capacidade de ação, e grau de utilização corrente do recurso. Aplicados às negociações do regime pós-Quito, estes critérios indicam que têm maior responsabilidade os países que mais poluíram a atmosfera no passado, os que têm mais capacidade de ação (em termos de domínio de tecnologias, por exemplo), e os que emitem mais. Esses critérios também são aplicáveis a temas como preservação de florestas nativas, por exemplo.
- (3) Uma vez definidos o limite máximo de exploração e a regra de distribuição, deve-se pensar na alocação eficiente dos recursos, tanto no presente quanto intertemporalmente.

Alguns dos problemas de pesquisa que decorrem dessa perspectiva são: qual é o limite máximo? Quais são as consequências da adoção de diferentes regras de distribuição? Que mecanismos favorecem a eficiência alocativa para uma dada meta e uma dada distribuição? É preciso harmonizar os mecanismos internacionalmente? Qual é a trajetória tecnológica necessária para se atingir a meta? Qual é a institucionalidade mais adequada para se discutir responsabilidades? Qual é o formato mais adequado do *enforcement*?

Uma área em particular que precisa de investimento analítico é o estudo dos *trade-offs* socioambientais que decorrem de diferentes políticas públicas. Como enfatiza o controverso Björn Lomborg, a decisão quanto a determinado investimento precisa contemplar os investimentos alternativos, os riscos embutidos e os retornos esperados.

Por exemplo, quais são as externalidades positivas do fim da economia da combustão? E as externalidades negativas? Que externalidades negativas tem a política

climática? Que externalidades negativas têm diferentes instrumentos de política climática que produzem trajetórias parecidas das emissões? Quais são os efeitos colaterais de diferentes modalidades de geoengenharia? Em que medida o controle do desmatamento em regiões pobres pode afetar negativamente o bem-estar das populações locais?

Pouco se têm feito essas perguntas. No tema do clima, os modelos incluem apenas um tipo de capital natural e não fazem considerações quando ao retorno de políticas públicas mais tradicionais como educação, saúde ou nutrição. É claro que os modelos já são suficientemente complexos, mas as possibilidades que a tecnologia computacional e informacional disponibilizam à ciência não lhe dão o direito de se abster de análises que, ainda que complexas, podem aumentar a eficácia e a efetividade da política pública.

*

Esta dissertação abordou o tratamento dado pela economia ao tema das mudanças climáticas. Estudaram-se em detalhes os dois principais modelos contemporâneos, e apresentou-se a teoria relevante para que o iniciante possa navegar razoavelmente bem pelas discussões avançadas da área. Elaborou-se, ainda, como material complementar, uma resenha da obra do mais importante autor da área, William Nordhaus.

Além de tentar esclarecer as razões que levam os economistas a recomendarem políticas climáticas tão díspares, a pesquisa procurou sistematizar os argumentos das diversas correntes de economia das mudanças climáticas, propondo uma classificação dos modelos com base em critérios como regra de decisão, tratamento da incerteza, estrutura do modelo, perspectiva de ciência, entre outras. Espera-se que esse primeiro esforço forneça as bases para estudos mais aprofundados das diversas perspectivas em economia do clima.

Pôs em discussão, por fim, a idéia de que a ciência positiva é apenas um das peças de um emaranhado de formas de conhecimento e instituições que deverão informar a sociedade e seus representantes para que venham a tomar decisões racionais em relação a temas multi-facetados como são as mudanças climáticas. Tão importantes quanto o conhecimento objetivo são a comunicação do conhecimento, o processo de tomada de decisão, e a consideração de formas de conhecimento não positivas.

REFERÊNCIAS

- ACEMOGLU, Daron, AGHION, Phillipe, BURSZTYN, Leonardo & HEMOUS, David (2009) “The environment and directed technical change.” Disponível em: <http://econ-www.mit.edu/files/4383> Acesso em: 19/05/2010.
- ACKERMAN, Frank *et. al.* (2007) “Economists' statement on climate change.” Disponível em: <http://www.cmyf.org/uploads/2/9/0/6/2906152/economistsstatementonclimate-change.pdf> Acesso em: 13/05/2010.
- ACKERMAN, Frank & NADAL, Alejandro (orgs.) (2004) **The flawed foundations of equilibrium economics**. Nova Iorque, EUA: Routledge, 220p.
- ALDY, Joseph, BARRET, Scoth & STAVINS, Robert (2003) “Thirteen plus one: a comparison of global climate change policy architectures.” **Climate Policy**, 4 (3), pp. 373 – 397.
- ANTHOFF, David (2004) “Social cost of carbon: equity weighting.” Dissertação (mestrado em *Environmental Change and Management*), Universidade de Oxford, Reino Unido.
- ANTHOFF, David, HEPBURN, Cameron & TOL, Richard (2007) “Equity weighting and the marginal damage costs of climate change.” Working paper 43, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milão, Itália.
- ARROW, Kenneth (2007) “Global climate change: a challenge to policy.” **Economist's voice**, junho de 2007, pp. 1 – 5.
- ARROW, Kenneth & DEBREU, Gerard (1954) “Existence of an equilibrium for a competitive economy.” *Econometrica*, 22, pp. 265 – 290.
- ARROW, Kenneth, DASGUPTA, Partha, GOULDER, Lawrence, DAILY, Gretchen, ERLICH, Paul, HEAL, Geoffrey, LEVIN, Simon, MÄLER, Karl-Göran, SCHNEIDER, Stephen, STARRET, David & WALKER, Brian (2004) “Are we consuming too much?” **Journal of Economic Perspectives**, 18 (3), pp. 147 – 172.
- ARROW, Kenneth, JORGENSON, Dale, KRUGMAN, Paul, NORDHAUS, William & SOLOW, Robert (1997) “The economist's statement on climate change.” Disponível em: <http://www.rprogress.org/publications/1997/econstatement.htm> Acesso em: 12/05/2010.
- BAER, Paul & SPASH, Clive (2008) “Cost-benefit analysis of climate change: Stern revisited.” Working paper 2008-07, CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra, Australia.

- BARKER, Terry (2008) “The economics of avoiding dangerous climate change. An editorial essay on The Stern Review.” **Climatic Change**, 84 (3 – 4), pp. 173 – 194.
- BARKER, Terry, MAHVASH, Saed & KÖHLER, Jonathan (2006) “The costs of greenhouse gas mitigation with induced technological change: a meta-analysis of estimates in the literature.” Working paper 89, Tyndal Centre for Climate Change Research, Reino Unido.
- BARRO, Robert & SALA-I-MARTIN, Xavier (1999) **Economic growth**. Cambridge, EUA: The MIT Press, 539p.
- BEINHOCKER, Eric (2006) **The origin of wealth**. Boston, EUA: Harvard Business School Press, 547p.
- BOSSETTI, Valentina, CARRARO, Carlo & GALEOTTI, Marzio (2006) “Stabilization targets, technical change and the macroeconomic costs of climate change control.” Working paper 2.2006, Note di Lavoro Series, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milão, Itália.
- BRAUCH, Martin Detrich (2007) “Clima e instituições: uma abordagem da nova economia institucional à mudança climática.” Dissertação (Economia), Universidade Federal de Pelotas.
- CAIXETA, Daniel (2009) “Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica.” **Leituras de Economia Política**, 14, pp. 1 – 31.
- CARTER, Robert, DE FREITAS, Chris, GOKLANY, Indur, HOLLAND, David & LINDZEN, Richard (2007) “Climate change. Climate science and the Stern review.” **World Economics**, 8 (2), pp. 161 – 182.
- CASS, David (1965) “Optimal growth in an aggregative model of capital accumulation.” **Review of Economic Studies**, 33, pp. 233 – 240.
- CLINE, William (1992) **The economics of global warming**. Washington, EUA: Institute for International Economics, 409p.
- COASE, Ronald (1960) “The problem of social cost.” **Journal of Law and Economics**, 3, pp. 1 – 44.
- COLANDER, David, HOLT, Richard & ROSSER, Barkley (2004) “The changing face of mainstream economics.” **Review of Political Economy**, 16 (4), pp. 485 – 499.

- COMMON, Mick & STAGL, Sigrid (2005) **Ecological economics. An introduction.** Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 600p.
- COSTANZA, Robert *et. al.* (1997) “The value of the world's ecosystem services and natural capital.” **Nature**, 387, pp. 253 – 260.
- DALY, Herman (2009) “From a failed growth economy to a steady-state economy.” Aula dada no encontro bianual da Associação Estadunidense de Economia Ecológica, Washington, EUA, junho de 2009.
- _____ (1996) **Beyond growth.** Boston, EUA: Beacon Press, 253p.
- DALY, Herman & FARLEY, Joshua (2004) **Ecological economics. Principles and applications.** Washington, EUA: Island Press, 454p.
- DASGUPTA, Partha (2007) “Discounting climate change.” Disponível em: http://www.econ.cam.ac.uk/faculty/dasgupta/pub07/stavins_june07.pdf Acesso em: 02/09/2007.
- _____ (2004) **Human well-being and the natural environment.** Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 351p.
- DELONG, Brad (2006) “Partha Dasgupta makes a mistake in his critique of the Stern Review.” Disponível em: http://delong.typepad.com/sdj/2006/11/partha_dasguptu.html Acesso em: 29/05/2010.
- DEQUECH, David (2009) “Varieties of uncertainty: a survey of the economic literatura.” Anais do XXXVI Encontro Nacional de Economia, ANPEC - Associação Nacional dos Centros de Pós-graduação em Economia.
- DIETZ, Simon (2009) “High impact, low probability? An empirical analysis of risk in the economics of climate change.” Working paper 9, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics, Londres, Reino Unido.
- DIETZ, Simon, ANDERSON, Dennis, STERN, Nicholas, TAYLOR, Chris & ZENGHE-LIS, Dimitri (2007) “Right for the right reasons.” **World Economics**, 8 (2), pp. 229 – 258.
- EDENHOFER, Ottmar, BAUER, Nico & KRIEGLER, Elmar (2005) “The impact of technological change on climate protection and welfare: insights from the model MIND.” **Ecological Economics**, 54, pp. 277 – 292.
- FUNTOWICZ, Silvio & RAVETZ, Jerry (2001) “Post-normal science. Science and gover-

- nance under conditions of complexity.” In: DECKER, Michael (2001) **Interdisciplinarity in technology assessment**. Berlin, Alemanha: Springer, pp. 15 – 24.
-
- (1994) “The worth of a songbird: ecological economics as a post-normal science.” **Ecological Economics**, 10, pp. 197 – 207.
- GODARD, Olivier (2008) “The Stern review on the economics of climate change: contents, insights and assessment of the critical debate.” **Sapiens**, 1 (1), pp. 23 – 41.
- GROSSMAN, Gene M. & KRUEGER, Alan B. (1995) “Economic growth and the environment.” **The Quarterly Journal of Economics**, 110 (2), pp. 353 – 77.
- HAMMOND, Kenneth (2007) **Beyond rationality**. Nova Iorque, EUA: Oxford University Press, 338p.
- HANLEY, Nick & SPASH, Clive (1993) **Cost-benefit analysis and the environment**. Hampshire, Reino Unido: Edward Elgar, 278p.
- HANSEN, Matthew, STEHMAN, Stephen & POTAPOV, Peter (2010) “Quantification of global gross forest cover loss.” Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) Early Edition.
- HENRY, Claude (2006) “Decision-making under scientific, political and economic uncertainty.” Working paper DDX-06-12, Le Cahiers, Chaire Développement Durable, Ecole Polytechnique, França.
- HOPE, Chris (2008) “Discount rates, equity weights and the social cost of carbon.” **Energy Economics**, 30 (3), pp. 1011 – 1019.
-
- (2006) “The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC’s five reasons for concern.” **The Integrated Assessment Journal**, 6 (1): 19 – 56.
- HOPE, Chris, ANDERSON, John & WENNAM, Paul (1993) “Policy analysis of the greenhouse effect: an application of the PAGE model.” **Energy Policy**, 21 (3), pp. 327 – 338.
- HOURCADE, Jean-Charles, AMBROSI, Philippe & DUMAS, Patrice (2009) “Beyond the Stern review: lessons from a risky venture at the limits of the cost-benefit analysis.” **Ecological Economics**, 68 (10), pp. 2479 – 2484.
- HOUSE OF LORDS (2005) **The economics of climate change**. Londres, Reino Unido: The Stationery Office, vol. I.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007) “Summary for policymakers.” *In*: SOLOMON, Susan *et al.* (eds.). **Climate change 2007: the physical science basis. Contribuição do working group I para o fourth assessment report do IPCC**. Cambridge, Reino Unido, e Nova Iorque, EUA: Cambridge University Press, pp. 1 – 18.

(2007a) “Summary for policymakers”. *In*: METZ Bertz *et al.* (eds.). **Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribuição do working group III para o fourth assessment report do IPCC**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, pp. 1 – 36.

(2001) “Summary for policymakers.” *In*: HOUGHTON, J. T. *et al.* (eds.). **Climate change 2001: the scientific basis. Contribuição do working group I para o third assessment report do IPCC**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, pp. 1 – 83.

(1996) **Climate change 1995: the science of climate change**. Editado por HOUGHTON, J.T. *et al.*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 572p.

(1990) **Climate change: the IPCC scientific assessment**. Preparado pelo *working group I*, editado por HOUGHTON, J.T. *et al.*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

JACKSON, Tim (2009) **Prosperity without growth**. Londres, Reino Unido: Sustainable Development Commission, 133p.

JANSSEN, Marco & OSTROM, Elinor (2006) “Empirically based, agent-based models.” **Ecology and Society**, 11 (2), 37.

KELLER, Charles (2007) “Global warming 2007. An update to global warming: the balance of evidence and its policy implications.” **TheScientificWorldJOURNAL**, 7, pp. 381 – 399.

(2003) “Global warming: the balance of evidence and its policy implications.” **TheScientificWorldJOURNAL**, 3, pp. 357 – 411.

KNIGHT, Frank (1921) **Risk, uncertainty and profit**. Boston, EUA: Houghton Mifflin, 400p.

KOOPMANS, Tjalling (1965) “On the concept of optimal economic growth.” *In*: **The econometric approach to development planning**. Amsterdam, Holanda: North-Holland Publishing Co., pp. 225 – 87.

- KRUGMAN, Paul (2010) “Building a green economy.” The New York Times, 11/04/2010, p. MM34.
- LINDZEN, Richard (1994) “On the scientific basis for global warming scenarios.” **Environmental Pollution**, 83, pp. 125 – 134.
- LINDZEN, Richard *et. al.* (2006) “Open Kyoto to debate.” Disponível em: <http://www.canada.com/nationalpost/financialpost/story.html?id=3711460e-bd5a-475d-a6be-4db87559d605> Acesso em 09/08/2007.
- MADDISON, David (2007) “Further comments on the Stern Review.” Disponível em: <http://www.economics.bham.ac.uk/maddison/Stern%20Comments.pdf> Acesso em: 29/05/2010.
- MARGULIS, Sérgio & DUBEUX, Carolina (eds.) (2010) **Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades**. São Paulo: FEA / USP, 84p.
- MCNEIL, Judith & WILLIAMS, Jeremy (2007) “An examination of the McKibbin-Wilcoxon hybrid proposal for a carbon price for Australia.” Working paper 005, U21Global, Cingapura.
- MEADOWS, Donella, MEADOWS, Dennis, RANDERS, Jørgen & BEHRENS, William (1972) **The limits to growth: a report for the Club of Rome's predicament of mankind**. Nova Iorque, EUA: Universe Books, 205p.
- MENDELSON, Robert (2009) “Climate change and economic growth.” Working paper Nº 60, Commission on Growth and Development, Washington, EUA.
- _____ (2006) “A critique of the Stern Report.” **Regulation**, 29 (4): pp. 42 – 46.
- MENDELSON, Robert, DINAR, Ariel & WILLIAMS, Larry (2006) “The distributional impact of climate change between rich and poor countries.” **Environment and Development Economics**, 11, pp. 159 – 178.
- MOLION, Luiz Carlos (2008) “Aquecimento global, uma visão crítica.” *In*: VEIGA (2008), pp. 55 – 82.
- NORDHAUS, William (2010) “Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment.” Disponível em: http://nordhaus.econ.yale.edu/documents/Copen_020310.pdf Acesso em: 05/05/2010.

-
- (2008) **A question of balance**. New Haven, EUA: Yale University Press, 234p.
-
- (2007) “The challenge of global warming: economic models and environmental policy.” Disponível em: http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/DICE-GAMS/dice_mss_060707_pub.pdf Acesso em 15/06/2007.
-
- (2007a) “Comments on the Stern review.” *In*: Yale Symposium on the Stern review. New Haven, EUA: Yale the Study of Globalization, pp. 71 – 77.
-
- (2007b) “A review of the Stern Review on the economics of global warming.” **Journal of Economic Literature**, 45, pp. 686 – 702.
-
- (2007c) “Alternative measures of output in global economic-environmental models: purchasing power parity or market exchange rates?” **Energy Economics**, 3.
-
- (2007d) “Accompanying notes and documentation on development of DICE-2007 model: notes on DICE-2007.delta.v8 as of September 21, 2007.” Disponível em: http://nordhaus.econ.yale.edu/Accom_Notes_100507.pdf Acesso em: 05/06/2010.
-
- (2007e) “DICE–2007 beta version – Excel.” Disponível em: http://nordhaus.econ.yale.edu/documents/Dice2007_EXCEL_d8b.xlsx Acesso em: 05/06/2010.
-
- (1999) “The economic impacts of abrupt climate change.” Trabalho apresentado em um congresso sobre *Abrupt climate change: the role of oceans, atmosphere and the Polar regions*, National Research Council, 22 de janeiro de 1999.
-
- (1999a) “Roll the DICE again: the economics of global warming.” Disponível em: http://j-bradford-delong.net/pdf_files/Nordhaus_global_warming_98.PDF Acesso em: 03/06/2010.
-
- (1994) “Reflections on the concept of sustainable economic growth.” *In*: PASINETTI, Luigi & SOLOW, Robert (eds.) (1994) **Economic growth and the structure of long-term development**. Oxford University Press, pp. 309 – 325.
-
- (1993) “Reflections on the economics of climate change.” **Journal of Economic Perspectives**, 7 (4), pp. 11 – 25.
-
- (1993a) “Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases.” **Resource and Energy Economics**, 15, pp. 27 – 50.

-
- _____ (1992) "The ecology of markets." **Proceedings of the National Academy of Science**, 89, pp. 843 – 850.
-
- _____ (1992a) "An optimal transition path for controlling greenhouse gases." **Science**, 258, pp. 1315 – 19.
-
- _____ (1992b) "Lethal model II: the Limits to Growth revisited." **Brookings Papers on Economic Activity**, 2.
-
- _____ (1990) "An intertemporal general-equilibrium model of economic growth and climate change." *In*: WOOD, David and KAYA, Yoshi (eds.) (1990) **Proceedings of the Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Policy Analysis, October 22-23, 1990**. Washington, EUA, pp. 416 – 433.
-
- _____ (1990b) "Slowing the greenhouse express: the economics of greenhouse warming." *In*: AARON, Henry (ed.) (1990) **Setting National Priorities**. Washington, EUA: Brookings.
-
- _____ (1982) "How fast should we graze the global commons?" **American Economic Review**, 72 (2), pp. 242 – 246.
-
- _____ (1980) "Thinking about carbon dioxide: theoretical and empirical aspects of optimal control strategies." Working paper 565, Cowles Foundation Papers, Cowles Foundation for Research in Economics, Universidade de Yale, New Haven, EUA.
-
- _____ (1979) **The efficient use of energy resources**. New Haven, EUA: Yale University Press.
-
- _____ (1977) "Strategies for the control of carbon dioxide." Working paper 443, Cowles Foundation Papers, Cowles Foundation for Research in Economics, Universidade de Yale, New Haven, EUA.
-
- _____ (1977a) "Economic growth and climate: the case of carbon dioxide." **The American Economic Review**, 67 (1), pp. 341 – 346.
-
- _____ (1975) "Can we control carbon dioxide?" Working paper 75-63, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.
-
- _____ (1974) "Resources as a constraint on growth." **American Economic Review**, 64 (2).
-
- _____ (1973) "The allocation of energy resources." **Brookings Papers**

on Economic Activity, 3.

(1973a) “World dynamics: measurement without data.” **The Economic Journal**, 83 (332), pp. 1156 – 1183.

NORDHAUS, William & AUSUBEL, Jesse (1983) “A review of estimates of future carbon dioxide emissions.” *In*: NATIONAL RESEARCH COUNCIL-NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (1983) **Changing Climate**. National Academy Press.

NORDHAUS, William & TOBIN, James (1973) “Is growth obsolete?” **Income and Wealth**, 38.

NORDHAUS, William & YANG, Zili (1996) “A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies.” **American Economic Review**, 86 (4), pp. 741 – 765.

NORDHAUS, William & YOHE, Gary (1983) “Future carbon dioxide emissions from fossil fuels.” *In*: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (1983) **Changing Climate**. National Academy Press.

NORGAARD, Richard (1994) **Development betrayed**. Londres: Routledge, 280p.

NORGAARD, Richard & BAER, Paul (2005) “Collectively seeing climate change: the limits of formal models.” **Bioscience**, 55 (11), pp. 961 – 966.

OLIVEIRA, Sonia Maria (2008) “Base científica para a compreensão do aquecimento global.” *In*: VEIGA (2008), pp. 17 – 54.

PEARCE, David (2003) “The social cost of carbon and its policy implications.” **Oxford Review of Economic Policy**, 19 (3), pp. 362 – 384.

PIGOU, Arthur (1920) **The economics of welfare**. Londres, Reino Unido: MacMillan and Co.

PLAMBECK, Erica & HOPE, Chris W. (1996) “PAGE95. An updated valuation of the impacts of global warming”. **Energy Policy**, 24 (9): 783-794.

POPP, David (2004) “ENTICE-BR: the effects of backstop technology R&D on climate policy models.” Working paper 10285, NBER Working Papers Series, National Bureau of Economic Research, Cambridge, EUA.

PYKA, Andreas & FAGIOLO, Giorgio (2005) “Agent-based modelling: a methodology for Neo-Schumpeterian economics.” Working paper 272, Volkswirtschaftliche Diskussion-

reihe, Institut für Volkswirtschaftslehre, Alemanha.

RAMSEY, Frank (1928) “A mathematical theory of savings.” **Economic Journal**, 38, pp. 543 – 559.

RICHARDSON, Catherine, STEFFEN, Will, SCHELLNHUBER, Hans Joachim, ALCAMO, Joseph, BARKER, Terry, KAMMEN, Daniel, LEEMANS, Rik, LIVERMAN, Diana, MUNASINGHE, Mohan, OSMAN-ELASHA, Balgis, STERN, Nicholas & Wæver (2009) **Climate change, global risks, challenges and decisions. Synthesis report**. Copenhagen, Dinamarca: University of Copenhagen, 39p.

ROMEIRO, Ademar (2001) “Economia ou economia política da sustentabilidade?” Working paper 102, Textos para Discussão, Instituto de Economia, UNICAMP.

SACHS, Ignacy (2002) Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Garamond, 92p.

SANTOS, Edi Carlos Martins (2009) “O dano econômico do aquecimento global: uma revisão da metodologia de cálculo e dos parâmetros e procedimentos fundamentais que afetam a sua estimação.” Dissertação (Economia Política), Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

SEN, Amartya (2005) **Sobre ética e economia**. São Paulo: Companhia das Letras, 143p.

SMITH, Joel *et. al.* (2009) “Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 'reasons for concern'.” **Proceedings of the National Academy of Sciences**, doi/10.1073/pnas.0812355106, no prelo.

SOLOW, Robert (1974) “The economics of resources or the resources of economics.” **The American Economic Review**, 64 (2), pp. 1 – 14.

SPASH, Clive (2007) “The economics of climate change impacts à la Stern: novel and nuanced or rhetorically restricted?” **Ecological Economics**, 63, pp. 706 – 713.

(2002) **Greenhouse economics: values and ethics**. Londres, Reino Unido: Routledge, 298p.

STERN, David (2003) “The environmental Kuznets curve.” Sociedade Internacional de Economia Ecológica, Encyclopaedia Internet de Economia Ecológica.

STERN, Nicholas (2008) “The economics of climate change.” **American Economic Review: Papers and Proceedings**, 98 (2), pp. 1 – 37.

- _____ (2008a) “Key elements of a global deal on climate change.” Londres, Reino Unido: The London School of Economics and Political Science.
- _____ (2007) **The economics of climate change**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 692p.
- _____ (2007a) “Reaction to the panelists: Sir. Nicholas Stern.” *In: Yale Symposium on the Stern review*. New Haven, EUA: Yale Center for the Study of Globalization, pp. 117 – 130.
- _____ (2006) “Stern review: the economics of climate change.” Disponível em: http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm Acesso em: 05/02/2007.
- _____ (2005) “Preface.” *In: _____*, DETHIER, Jean-Jacques & ROGERS, Halsey (2005) **Growth and empowerment**. Cambridge, EUA: MIT Press, 518p.
- STEWART, Thomas (2000) “Uncertainty, judgement and error in decisions.” *In: SA-REWITZ, Daniel, PIELKE, Roger & BYERLY, Radford (eds.) (2000) Prediction: science, decision making and the future of nature*. Washington, EUA: Island Press, pp. 41 – 57.
- THE ECONOMIST (1990) “Editorial.” Volume 317, edição 7678.
- TOL, Richard (2006) “The Stern review of the economics of climate change: a comment.” **Energy and Environment**, 17 (6), pp. 977 – 981.
- _____ (2006a) “Integrated assessment modelling.” Working paper FNU-102, Sustainability and Global Change, Universidade de Hamburgo, Alemanha.
- _____ (2005) “The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties.” **Energy Policy**, 33, pp. 2064 – 2074.
- TOL, Richard & YOHE, Gary (2007) “The Stern review: a deconstruction.” Working paper FNU-125, Sustainability and Global Change, Universidade de Hamburgo, Alemanha.
- _____ (2006) “A review of the Stern review.” **World Economics**, 7 (4), pp. 233 – 250.
- UNDP - UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM (2007) **Human development report 2007/2008. Fighting climate change: human solidarity in a divided world**. Nova Iorque, EUA: Palgrave Mcmillan.

VALE, Petterson Molina (2009) “A condição estável da economia: teoria e prática.” Anais do XXXVII Encontro Nacional de Economia, ANPEC - Associação Nacional dos Centros de Pós-graduação em Economia.

(2008) “Ecological economics and carbon pricing instruments: a review of the hybrid approach.” Trabalho apresentado no 10º Encontro anual da Associação Internacional de Economia Ecológica (ISEE), Nairobi, Quênia.

VAN DER SLUIJS, Jeroen (1996) “Integrated Assessment Models and the management of uncertainties.” Working paper 96-119, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

VARIAN, Hall (2006) “Recalculating the costs of global climate change.” The New York Times, 14/12/2006.

VEIGA, José Eli da (2010) “No enalço do carbono.” Valor Econômico, 20/04/2010.

(org.) (2008) **Aquecimento global: frias contendas científicas.** São Paulo: SENAC, 112p.

VEIGA, José Eli da & VALE, Petterson Molina (2009) “COP-15 and the ethics of climate change.” Trabalho apresentado no congresso *Climate Change – Global Risks, Challenges and Decisions*, Copenhagen, Dinamarca, março de 2009.

(2008) “Economia e política do aquecimento global.” In: VEIGA (2008), pp. 89 – 110.

(2007) “Aquecimento global, um balanço das controvérsias.” Texto apresentado na sessão de 07/11/2007 do ciclo de seminários do departamento de economia da FEA / USP intitulado “Brasil no Século XXI: desafios para o futuro”.

VON NEUMANN, John & MORGESTERN, Oskar (1944) **Theory of games and economic behavior.** Nova Jérsei, EUA: Princeton University Press, 641p.

WEART, Spencer (2009) “The discovery of global warming.” Disponível em: <http://www.aip.org/history/climate/pdf/internat.pdf> Acesso em: 08/05/2010.

WEITZMAN, Martin (2009) “On modelling and interpreting the economics of catastrophic climate change.” **The Review of Economics and Statistics**, 91 (1), pp. 1 – 19.

(2007) “A review of the Stern review of the economics of climate change.” **Journal of Economic Literature**, 45 (3), pp. 703 – 724.

(1998) “Why the far distant future should be discounted at its lowest possible rate.” **Journal of Environmental Economics and Management**, 36, pp. 201 – 208.

YOHE, Gary & TOL, Richard (2007) “The Stern review: implications for climate change.” **Environment**, 49 (2), pp. 36 – 42.

APÊNDICE 1 – modelo de Ramsey-Cass-Koopmans (RCK) de otimização intertemporal do consumo.

O modelo de Ramsey-Cass-Koopmans (RCK), sintetizado no final dos anos 1960 a partir dos trabalhos de Frank Ramsey (1928), David Cass (1965) e Tjalling Koopmans (1965), é um modelo de otimização intertemporal do consumo baseado numa plataforma de equilíbrio geral (para uma descrição genérica, ver Barro & Sala-i-Martin (1999); para uma descrição do modelo adaptado ao estudo do meio ambiente, ver Dasgupta (2004)). Os seus principais pressupostos são que o aumento do bem-estar é dado por incrementos no consumo, e que a sociedade pode optar por consumo ou poupança de acordo a taxa de crescimento do estoque de capital da economia.

A função de bem-estar social

Admite-se, em primeiro lugar, que a utilidade marginal do consumo (u) declina com o aumento do consumo (c), e que pode ser descrita por uma função isoelástica (de elasticidade constante):

$$u(c) = \frac{c^{1-\eta}}{1-\eta} \quad (19)$$

Onde: η (eta) = fator de aversão ao risco (também atua como elasticidade da utilidade marginal do consumo, e como fator de aversão à desigualdade).

$$u'(c) = c^{-\eta} \quad (20)$$

Onde: η = elasticidade da utilidade marginal do consumo.

Essa função representa um conjunto de preferências bem definidas, e cresce com o consumo – $u'(c) > 0$ – a uma taxa decrescente – $u''(c) < 0$.

Pressupõe-se, em seguida, que a função de bem-estar social de cada geração (V) é individualista, não decrescente, simétrica e aditiva (ANTHOFF, HEPBURN & TOL, 2007), obtendo-se, então, a agregação da utilidade de todos os indivíduos:

$$V = \sum_{i=1}^n U[C(i)] \quad (21)$$

Onde: $C(i)$ = consumo do indivíduo i ; n = tamanho da população.

O procedimento padrão, no entanto, não soma as utilidades de diferentes indivíduos, mas multiplica a utilidade de um indivíduo representativo pelo total da população:

$$V(t) = n(t) \times c(t) ; c(t) = \frac{C(t)}{n(t)} ; C(t) = \sum_{i=1}^n C(i) \quad (22)$$

Onde: t = data (o período compreendido entre duas datas será entendido como o de uma geração, de sorte que no fim de cada t a geração corrente é completamente substituída pela sua sucessora); n = população; $c(t)$ = consumo *per capita*; $C(t)$ = consumo agregado.

Por enquanto, o modelo ainda é estático, no sentido de que agregou as utilidades de indivíduos numa mesma geração. Para que ele se torne dinâmico, o bem-estar das gerações futuras deve ser estimado e trazido a valor presente, para que possa ser agregado numa função de bem-estar intertemporal. Supondo que $V(0)$ seja o bem-estar da geração presente, $V(1)$ o da próxima, e $V(2)$ o da geração seguinte, a agregação é feita da seguinte maneira:

$$W_0 = \frac{V(0)}{(1+\rho)^0} + \frac{V(1)}{(1+\rho)^1} + \frac{V(2)}{(1+\rho)^2} \quad (23)$$

Onde: W_t = bem-estar intergeracional agregado; ρ (rô) = taxa pura de desconto do tempo, ou taxa de preferência pelo consumo presente.

W_0 representa o bem-estar intergeracional da geração 0, e depende de um fluxo descontado de bem-estares. Para cada sequência Θ_0 de possíveis fluxos de consumo agregado se obtêm diferentes valores de $V(t)$ e, conseqüentemente, diferentes valores de W_0 . Supondo que $(\hat{C}(0), \hat{C}(1), \hat{C}(2))$ seja aquele membro de Θ_0 que maximiza W_0 , o modelo de RCK determina que a geração 0 consuma $\hat{C}(0)$. Essa decisão produz um determinado nível de investimento agregado, que determina as possibilidades tecnológicas abertas à geração 1. Esta, por sua vez, tem à disposição um conjunto Θ_1 de fluxos de consumo, e deve escolher aquele que maximize W_1 . O modelo de RCK determina, pois, que para t infinito, a geração 1 escolherá o consumo agregado $\hat{C}(1)$, a geração 2 $\hat{C}(2)$, e assim por diante (DASGUPTA, 2004: 91).

A generalização de (23) é simples:

$$W_t = \sum_{t=0}^T \frac{V(t)}{(1+\rho)^t} \quad (24)$$

Onde: T = horizonte de tempo considerado pelo estudo.

O setor produtiva dessa economia é representando por uma função de produção neoclássica, do tipo Cobb-Douglas, em que capital e trabalho determinam o produto – $Q(t)$ – com retornos constantes de escala, num mercado perfeitamente competitivo (walrasiano) e sem externalidades:

$$Q(t) = A(t) K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (25)$$

Onde: $A(t)$ = produtividade total dos fatores; $K(t)$ = estoque de capital; $L(t)$ = população; α = elasticidade do produto em relação ao capital.

No agregado, esses fatos estilizados são executados por um planejador social que maximiza a função de bem-estar intertemporal (Equação 24), sujeito à restrição da variação do estoque total de capital da economia (RAMSEY, 1928):

$$\dot{K}(t) = r - \delta K(t) - c(t) \quad (26)$$

Onde: r = taxa de remuneração do capital, taxa de desconto do consumo ou taxa social de desconto; δ = taxa de depreciação do capital.

Disso decorre o seguinte resultado, conhecido como *relação de equilíbrio de Ramsey*:

$$g = \frac{(r - \rho)}{\eta} \rightarrow r = \rho + \eta g ; \quad g = \dot{c}(t) \quad (27)$$

Onde: g = taxa de crescimento do consumo *per capita*.

A taxa ótima de crescimento do consumo *per capita* (g) é dada pela razão entre o incentivo à poupança ($r - \rho$) e a elasticidade da utilidade marginal do consumo (η). O incentivo à poupança será tão maior quanto maior for a taxa de remuneração do capital (r) relativamente à preferência pelo consumo presente (ρ). Retornando à Equação (24), é fácil notar que ρ afeta negativamente o valor presente do bem-estar social agregado, pois quando ele cresce relativamente a r , desestimula a poupança. No longo prazo, ρ tem um efeito muito forte sobre a função objetiva de bem-estar, pois o seu exponencial é o número de períodos do modelo. A maneira como se determinam esses parâmetros é discutida nos Capítulos 2, 3 e 4 desta dissertação.

APÊNDICE 2 - raízes do enfoque gradualista: crescimento, tecnologia e energia.

William Nordhaus transitou pelas áreas de crescimento econômico, inovação tecnológica e economia da energia, e trabalhou com modelagem de sistemas de recursos naturais e energéticos. A sua obra do final dos anos 1960 foram contribuições à teoria do crescimento ligadas à incorporação do fator tecnologia. Era o início de sua carreira (tornou-se membro da *Cowles Foundation* em 1967), e a época em que surgia a discussão em torno da problemática ambiental – cujo foco, em decorrência das crises do petróleo, era a escassez de recursos, e não a escassez de sumidouros.

Nordhaus rapidamente se inseriu nesse debate. Por exemplo, em *Resources as a constraint on growth* (1974), ele afirmou que, com a tecnologia de então, e considerando somente combustíveis fósseis e energia nuclear, haveria energia disponível para 8.400 anos. A oferta de recursos não era problema, apesar de que os sumidouros poderiam vir a ser, no longo prazo; no entanto, as estimativas mais seguras indicavam que mesmo essa era uma hipótese bastante remota (“*our limited supply of fossil fuels limits the production of CO₂ to acceptable levels*”, *ibidem*: 25 – 26).

Desde o começo de sua carreira, Nordhaus foi adepto do otimismo tecnológico e crítico do “pessimismo” ambientalista: “[t]his new and pessimistic view about economic growth holds that growth is limited by a finite amount of essential, depletable natural resources. In the process of consuming finite resources, the world standard of living descends inexorably toward that of Neanderthal man” (NORDHAUS, 1973: 529, grifo nosso). A principal consequência disso foi a idéia de uma *backstop technology*: “a set of processes that (1) is capable of meeting the demand requirements, and (2) has a virtually infinite resource base (...) In some sense, the current stage of history is a transitory phase between dependence on cheap but scarce resources and dependence on more costly but abundant resources” (*ibidem*: 547 – 548, grifo nosso).

A justificativa para a premissa de que uma tecnologia desse tipo viria a existir um dia era a seguinte: (i) os recursos para produzir automóveis operando com a tecnologia

(então) existente durariam 70 anos, mas no caso de automóveis movidos a reatores nucleares de fissão autoferlizantes, os recursos durariam 100 milhões de anos; (ii) a pergunta fundamental, então, seria: o sistema tecno-socioeconômico é viável (no exemplo, a sociedade do automóvel)? Caso a resposta fosse negativa, o problema da determinação de uma solução eficiente não faria sentido, pois numa plataforma de programação, a inviabilidade do sistema leva os preços ao infinito; (iii) como o exercício proposto no artigo era o de se buscar uma solução eficiente, devia-se presumir que o sistema era viável; e (iv) para que ele fosse viável, devia-se presumir a possibilidade de uma *backstop technology*.

“In the following analysis, a simplification is made that avoids complications associated with time horizons or global exhaustion. The simplification is the concept of backstop technology (...) Ultimately, if and when the transition is completed to an economy based in resources present in superabundant quantities – whether this be nuclear fission or fusion, solar, geothermal, or some as yet undiscovered technology – the economic importance of exhaustible resources will disappear, and capital and labor costs alone will determine prices” (idem, 1979: 11, grifo nosso).

A argumentação não se encaixa na tipologia hipotético-dedutiva nem na categoria indutiva. Para ser do primeiro tipo, deveria ter partido de princípios gerais e indiscutíveis para chegar a conclusões específicas; para ser do segundo, deveria ter generalizado a validade de observações empíricas específicas. Nordhaus não fez nenhum dos dois. É tautológico o raciocínio que o levou a justificar a imposição no modelo do (futuro) surgimento de um *deus-ex-machina* tecnológico, na medida em que decorre da necessidade que tem o próprio modelo da existência dessa tecnologia. Em outras palavras: ele se pergunta se faz sentido que o modelo suponha o surgimento de determinada coisa no futuro, e responde que sem essa suposição o modelo fica inviável, de forma que faz sentido.

É possível que tal raciocínio tenha sido visto como “elegante” e “rigoroso”, dois critérios da mais alta importância para a economia convencional. Só isso explicaria o

fato de que a imensa maioria das análises posteriores do problema ambiental e da economia das mudanças climáticas se tenham apoiado sobre a hipótese panglossiana. O próprio Nordhaus se absteve de justificar a *backstop technology* dali em diante.

Em *The ecology of markets* (1992), Nordhaus atacou a ecologia industrial e a economia ecológica, dizendo que faziam a pergunta equivocada. Argumentou que o fluxo circular da renda, de Quesnay, chegava a conclusões erradas, mas mostrava uma propriedade de muito interessante da economia, que é a interconexão entre as partes – a economia, portanto, já conheceria havia muito as idéias de complexidade e de conectividade. A versão moderna do *Tableau Economique* seria a análise de insumo-produto, que corresponderia à ecologia industrial da economia.

Lembrou que mercados livres são Pareto-eficientes, e que isso mostra que o livre-mercado é desejável. Mas uma alocação de mercado só é Pareto-eficiente na ausência de externalidades, segundo o modelo original de Arrow-Debreu. Quando há externalidades, (todas) elas devem ser internalizadas por meio de preços-sombra⁵⁶ – apesar de a precificação ser complicada, pois não há mercado para esses recursos. Feito isso, o mecanismo de mercado volta a ser eficiente (exceto em termos de justiça distributiva), sempre e quando se adotar a premissa da *backstop technology*. Conclusão normativa: coloca-se um imposto e deixa-se que o mercado resolva (excluindo-se a incerteza).

Essa foi uma argumentação hipotético-dedutiva. Que levou à conclusão de que toda a tentativa de incorporar a física à economia é inócua, uma vez que o mercado competitivo aloca de maneira eficiente: “[o]ne concern that has arisen about this set of assumptions is whether it is consistent with fundamental laws of physics. Is it possible, in other words, to have an indefinite decline in emissions-output ration? In principle, the answer is clearly yes because output is measure in 'utils' (...), not in physical terms” (idem, 1993a: 30). A relação entre emissões e produto poderia cair *indefinidamente*.

Mas o produto não é medido em termos de utilidade; a utilidade é que se mede

⁵⁶ O preço que vigoraria no mercado, segundo um determinado conjunto de premissas e hipóteses, se esse mercado existisse sem distorções. O preço-sombra do CO₂ é aquele que iguala custos marginais a benefícios marginais.

em termos de produto *per capita*, que, por sua vez, é igual a preço (adicionado) multiplicado por *quantidade* de produtos e serviços transacionados na economia. O crescimento da utilidade ou do PIB não pode acontecer na ausência de uma base material. Pois, como lembrou Georgescu-Roegen, há uma diferença entre o mundo real e o jardim do Éden.

Herman Daly (1996) esclareceu o assunto por meio da parábola da cozinha, segundo a qual a receita de Solow para a sustentabilidade (manutenção do estoque total de capital da economia, em que serviços ecossistêmicos e capital financeiro são substituíveis)⁵⁷ corresponde ao cozimento de um bolo por um cozinheiro que só dispõe da cozinha e de seus equipamentos. Ele não precisa de farinha, ovos, açúcar, eletricidade, gás natural ou lenha. Caso queira um bolo maior, o cozinheiro precisa apenas mexer mais rapidamente o conteúdo vazio de uma panela maior num fogão maior, que de alguma maneira se auto-aquece. Não há sequer a necessidade de limpeza, pois a produção do bolo não gera dejetos. E os possíveis menus são infinitos: galinhada, feijoada, rabada, canjica, sagu, etc.

Mais além das ironias reside o inalienável processo de aumento da desordem dos sistemas físicos⁵⁸, durante décadas defendido por Georgescu-Roegen como verdadeiro ponto de partida do estudo do processo de produção. Toda transformação está sujeita à entropia (segunda Lei da termodinâmica). Sempre que fundos de capital (construído ou natural) são acionados para transformar estoques de baixa entropia em bens e serviços, geram-se poluição e lixo. A alta entropia devolvida à natureza é nociva ao ser humano (contaminação do solo, por exemplo), e sua absorção é limitada pela oferta de baixa entropia da luz solar, pois os processos biogeoquímicos de regeneração requerem energia.

Assim, se o despejo de dejetos superar os limites da capacidade absorptiva dos ecossistemas, se estará numa rota insustentável, na medida em que diminuirá o potencial de

⁵⁷ A possibilidade de desestruturação das funções ecossistêmicas, com rebatimento direto no bem-estar humano e indireto no sistema produtivo, não faz parte do conjunto de problemas tradicionalmente analisados pela economia.

⁵⁸ Transformações energéticas envolvem produção de calor, a forma mais degradada de energia, pois embora parte dele possa ser recuperada para algum propósito útil, não é possível aproveitá-lo totalmente por causa de sua tendência à dissipação (tende a se distribuir uniformemente pelo sistema, não podendo, portanto, ser aproveitado para gerar trabalho). E não é possível reverter esse processo. Energia e matéria aproveitáveis são de baixa entropia e, quando utilizadas na manutenção da organização do próprio sistema, são dissipadas, tornando-se de alta entropia. Os organismos vivos existem, crescem e se organizam importando energia e matéria de qualidade de fora de seus corpos, e exportando a entropia.

despejo futuro de resíduos (a ameaça à sustentabilidade está menos na oferta de matérias-primas do que na capacidade de absorção dos dejetos)⁵⁹.

O melhor exemplo disso é a absorção de CO₂ por florestas e oceanos. Como se viu no item 4.1, estima-se que esses sumidouros percam 85% do seu potencial absoritivo nos próximos duzentos anos, devido ao desflorestamento e ao próprio aquecimento.

Os artigos Nordhaus & Tobin (1973), e Nordhaus (1973, 1973a, 1974, 1992b), são marcos do debate entre críticos da *growthmania* e economistas convencionais. Nordhaus é, possivelmente, o economista que mais e melhor defendeu a visão convencional, de que por meio do crescimento econômico o progresso da humanidade é inevitável e ilimitado. Ele pode ser apontado como um dos principais responsáveis pelo descrédito das teses do livro *The Limits to growth*, que foi e ainda é o grande símbolo da defesa do desenvolvimento sustentável em contraposição ao crescimento sustentado.

*

A economia está inserida num todo maior, a biosfera, e existem fluxos de energia e matéria entre ambas, mas não há fluxos de matéria entre a esfera maior e seu exterior. Sendo o planeta finito e não crescente materialmente, é certo que há limites de matéria e energia para a expansão do subsistema econômico. Não pode ser negada a sujeição do sistema produtivo às Leis da termodinâmica, reforçando a idéia de que o crescimento exponencial do PIB já encontrou, está encontrando ou encontrará limites na oferta de estoques de recursos naturais e de fundos de serviços ecossistêmicos. Por isso, as demandas por regeneração de *inputs* e por absorção de *outputs* devem ser mantidas em níveis ecologicamente sustentáveis.

Em *Reflections on the concept of sustainable growth* (1994), Nordhaus se contrapôs à economia ecológica. Mas falhou ao argumentar que ela tem um conceito de “crescimento sustentável”. Não tem. É desenvolvimento sustentável. Além disso, a maior parte

⁵⁹ Esta capacidade é um bem rival, de modo que, quanto mais resíduos se despejam nos ecossistemas, menos capacidade de absorção fica disponível. No limite, caso se ultrapasse a escala sustentável de despejo, a absorção pode entrar em colapso, e ficar parcial ou totalmente comprometida. E o sistema produtivo depende diretamente dessa função ecossistêmica.

dos contrapontos é pura retórica, talvez elegante, mas sem conteúdo empírico ou lógico⁶⁰.

Toda essa discussão é importante porque demarca a principal característica da aplicação do ferramental econômico convencional aos problemas ambientais, a visão pré-analítica de que são inevitáveis, ilimitados e benéficos o crescimento econômico, o avanço tecnológico e o aumento da opulência material.

As derivações da micro e macroeconomia convencionais desconsideram os limitantes biofísicos que se impõem à economia, e seu otimismo fica evidente numa passagem de Solow (1974: 11): “(...) *technical progress can relieve and perhaps eliminate the drag on economic welfare exercised by natural-resource scarcity (...) The world can, in effect, get along without natural resources, so exhaustion is just an event, not a catastrophe*”. E na correspondente mensagem de Grossman & Krueger (1995: 354), conhecidos pela derivação da curva de Kuznets ambiental: “(...) *in principle, the forces leading to change in the composition and techniques of production may be sufficiently strong to more than offset the adverse effects of increased economic activity on the environment*”.

As duas menções elucidam a ausência de consideração de limites e a crença de que o progresso tecnológico pode superar quaisquer restrições, inclusive as físicas. É como se a espetacular “domesticação” dos ecossistemas pela espécie humana pudesse continuar indefinida e exponencialmente. Além do mais, seria inevitável.

O otimismo tecnológico se baseia no fato de que as inovações não são apenas o principal *driver* do crescimento, mas também um de seus resultados. Assim, espera-se que aumentos de escala venham acompanhados de aumentos de eficiência, e que estes últimos superem aqueles (*decoupling* absoluto). O problema é que não há comprovação empírica de que, no agregado, tal resultado seja possível, pois aumentos de eficiência costumam vir acompanhados de crescimento mais do que proporcional da demanda pelos produtos em questão: “*rebound effects push consumption even higher*” (JACKSON, 2009: 76).

Uma perspectiva mais realista procuraria saber como manter estável o nível de bem-estar dados os limitantes ecossistêmicos, entendendo o processo de *transformação* de

⁶⁰ Acemoglu *et. al.* (2009) utilizam argumentação hipotético-dedutiva, elegante, e rigorosa, e chegam a resultados alinhados com as teses da economia ecológica.

matérias-primas em bens com valor de uso, e de *transformação* desses em dejetos. Se há um limite para a escala da economia, e se já se está próximo dele, ulteriores ganhos de bem-estar só poderão ser obtidos por meio de redistribuição. Interessa, portanto, estudar a escala ótima e a distribuição justa, além da alocação eficiente (DALY, 1996).

QUADRO 2 - curva de Kuznets ambiental.

Grossman & Krueger (1995) publicaram no *Quarterly Journal of Economics* um artigo que se tornou altamente influente, apresentando dados empíricos favoráveis a uma possível versão ambiental da curva de Kuznets, em que aumentos da renda *per capita*, a partir de um certo ponto (US\$ 8.000 de 1985), melhorariam as condições do meio ambiente. A solução para a degradação ambiental seria, então, o próprio crescimento econômico. A relação entre renda *per capita* e emissões de alguns poluentes teria, para uma amostra de países, o formato de U invertido (a modelagem é tipicamente feita entre o logaritmo do indicador e o logaritmo da renda *per capita* numa forma quadrática). Os indicadores de poluição adotados foram quatro: em relação ao ar, o nível de poluição em centros urbanos (Dióxido Sulfúrico – SO₂ –, fumaça e partículas pesadas); em relação à água, o nível de oxigenação de bacias hidrográficas, a contaminação fecal e a contaminação por metais pesados. O número de países das diferentes amostras variou entre 13 e 58, e o escopo da análise, tanto em termos espaciais quanto de indicadores, não foi maior pela pura indisponibilidade de dados. A mesma razão que levou Simon Kuznets a formular, em 1955, uma hipótese que mais tarde viria a ser derrubada.

Uma crítica sistemática aos fundamentos da curva de Kuznets ambiental é feita por Stern (2003). Mesmo sem entrar nos detalhes econométricos da relação de U invertido, entretanto, é possível supor que são tão diversos os estilos de crescimento econômico e as circunstâncias históricas, culturais e institucionais em que ele ocorre, que o estudo de dados relativos a mais países e mais indicadores ambientais levará à refutação da hipótese otimista. Exatamente como aconteceu com a versão original da curva de Kuznets.

Quando, pelo contrário, o foco analítico se resume às óticas da produção e do consumo, implicitamente é aceito o fluxo circular da renda, segundo o qual produtos e insumos circulam entre empresas e famílias, intermediados pelo mercado, sem nenhuma perda ou ganho de matéria / energia para com o exterior, uma vez que não há exterior (a economia é o o todo). Nesse arcabouço, o que importa é entender como se movimenta o dinheiro na economia, pois dele deriva o poder de compra (consequentemente, o bem-estar). Daí o foco na eficiência alocativa.

Nordhaus (1973) admitiu que, se a opção pré-analítica fosse a inviabilidade do atual sistema, mesmo que apenas no longo prazo, uma alta taxa de desconto não se justificaria, pois faria sentido que os preços dos recursos tendessem ao infinito antes da exaustão. Sob essa hipótese, os modelos de otimização seriam inadequados.

Mas Nordhaus foi corresponsável pelo desenvolvimento do modelo de Ramsey-Cass-Koopmans e da teoria da otimização do consumo – era colaborador de Tjalling Koopmans na *Brookings Institution*. Como era especialista nesses modelos, e não em outros, preferiu mudar a hipótese. Daí o uso ortodoxo da otimização, e a pioneira adaptação desses instrumentos à problemática ambiental. Estava plantada a semente do DICE.

APÊNDICE 3 – primeiros modelos econômico-climáticos.

Nordhaus publicou o seu primeiro trabalho sobre economia das mudanças climáticas em 1975 (*Can we control carbon dioxide?*), quando os cientistas físicos ainda discutiam se a trajetória da temperatura realmente era ascendente. Foi pioneiro por duas razões: (i) enxergou no então incipiente problema do aquecimento antropogênico o potencial para se tornar uma das principais preocupações ambientais do planeta⁶¹, e uma importante restrição ao crescimento econômico; e (ii) construiu uma metodologia para analisar as implicações desse fenômeno sobre o sistema econômico.

Uma importante categorização feita nesse artigo foi dividir as equações de um modelo econômico-climática em quatro categorias: (i) equações de emissões, que ligam o nível de emissões ao nível de atividade das fontes; (ii) equações de difusão, que indicam quanto das emissões vai parar em cada um dos sumidouros (oceanos, florestas, atmosfera, etc); (iii) equações de efeitos climáticos, que indicam como as variáveis climáticas estão ligadas ao estoque de GHG nos diferentes sumidouros; e (iv) relação entre variáveis climáticas e variáveis antrópicas.

Nordhaus (1973) acabava de produzir um modelo completo para determinar a alocação ótima de recursos energéticos num prazo de 200 anos, que tornou-se um livro em 1979 (*The efficient use of energy resources*). O modelo era de otimização, e concluía que em algum momento deveria ser feita uma transição de energias fósseis para outras formas, e que o *timeline* dependia em grande medida da taxa de desconto adotada.

Concluía, também, que o *laissez-faire* não daria conta, e que seria necessária intervenção governamental, provavelmente fixando padrões mínimos de eficiência para o uso de automóveis e para a produção de energia (idéia que ele combateria logo em seguida, no livro de 1979, quando passaria a defender os mecanismos de mercado). A principal contri-

⁶¹ “One persistent concern has been that man’s economic activities would reach a scale where the global climate would be significantly affected. Unlike many of the wolf cries, this one, in my opinion, should be taken very seriously” (NORDHAUS, 1977a: 341).

buição do livro era metodológica: “*as indicating a technique by which economic and engineering tools can be used to analyze trends in markets and the contributions of new technologies*” (idem, 1979: xix).

O artigo de 1975 já chegava à rampa: concluiu que não era interessante, do ponto de vista da análise de custo-benefício, começar a mitigar as emissões até aproximadamente 2020, dez anos antes de a concentração dobrar, o que, segundo o modelo, aconteceria em 2030. Já Nordhaus (1977)⁶² concluiu que medidas brandas seriam necessárias entre 1990 e 2010, e medidas severas a partir de 2010, resultado que coincide com as conclusões do relatório Stern, trinta anos depois. Utilizou a literatura que trata de externalidades (Pigou), fazendo a ligação entre o estudos de otimização de crescimento (macro) e o de poluição ótima (micro). Os resultados de ambos os artigos foram resumidos e publicados na *American Economic Review* (idem, 1977a).

O trabalho de 1980, *Thinking about carbon dioxide* apresenta o consumo *per capita* (c) como função de emissões e de concentração, de forma que, dependendo da trajetória das emissões, obtém-se uma determinada trajetória de c . Presume que o objetivo da atividade econômica seja o consumo (teoricamente definido de maneira ampla, para incluir cultura e lazer, entre outros, mas na prática não), e que o objetivo da política pública é maximizá-lo, para o que se deve escolher uma regra de distribuição intertemporal. Propõe que se maximize a soma da utilidade esperada descontada do consumo. O mesmo trabalho foi publicado em 1982 na *American Economic Review*, com o título de *How fast should we graze the global commons?*

Nordhaus & Yohe (1983) desenvolveram um modelo probabilístico, cuja especificação contém variáveis exógenas (x_t), variáveis endógenas (z_t), parâmetros (k), e funções (G) que ligam as variáveis exógenas aos parâmetros e às variáveis endógenas. Ou seja, $x_t = G(z_t, k)$. As trajetórias futuras das variáveis exógenas (crescimento populacional, reservas de combustíveis fósseis, entre outras) são projetadas com base em dados passados, e a distribuição de probabilidades é determinada pelo julgamento de especialistas; as funções G

⁶² Onde há uma longa apresentação do debate entre os que previam aquecimento e os que previam resfriamento.

vêm da literatura; os parâmetros vêm da literatura e do julgamento de especialistas (no caso da sua distribuição de probabilidades).

Assim, $g(z_t)$ e $h(k)$ são as distribuições de probabilidades determinadas pelos especialistas, de forma que $G: [g(z_t) \text{ e } h(k)] \rightarrow f(x_t)$. A distribuição de probabilidades das variáveis endógenas é obtida pelo mapeamento que as funções G fazem das distribuições subjetivas $g(z_t)$ e $h(k)$. Essa é a estrutura geral de qualquer modelo econômico-climático.

Em relação aos retornos constantes de escala da função de produção, eles defenderam que “[i]mposing it on our production schedule did not drive us afieid of conventional economic modeling” (ibidem: 103). A especificação das funções é feita de forma a garantir conformidade com o modelo de equilíbrio geral. Há um esforço para manter os procedimentos analíticos dentro daquilo que é uso comum na profissão, o que torna muito difícil a aceitação de modelos alternativos e mais adequados para o estudo da sustentabilidade. Essa inércia é garantida pelo procedimento padrão da ciência normal: o *peer-review*.

Origem do DICE

Nos anos 1980, Nordhaus foi provavelmente o único economista que trabalhou com a economia das mudanças climáticas. Introduziu o conceito chave de externalidade global, a determinação dos preços-sombra do CO_2 a partir da otimização de um modelo de crescimento econômico intertemporal, e a proposição de um imposto sobre as emissões de carbono como alternativa economicamente eficiente para manter a concentração atmosférica desse gás em níveis aceitáveis (idem, 1980, 1982).

Em trabalhos subsequentes se propôs a estimar a trajetória futura das emissões de CO_2 (NORDHAUS & AUSUBEL, 1983; NORDHAUS & YOHE, 1983), a calcular os custos do aquecimento previsto tanto para os Estados Unidos quanto para o resto do mundo, e a listar as diferentes maneiras disponíveis para que os tomadores de decisão enfrentassem a ameaça do aquecimento global (NORDHAUS, 1990b).

O DICE foi formulado por primeira vez em 1990, no artigo *An intertemporal general-equilibrium model of economic growth and climate change*. Foi um refinamento do

trabalho que Nordhaus vinha desenvolvendo desde 1974, com a diferença de que tinha menos foco na energia e mais nas relações físicas que regulam o processo das mudanças climáticas. Além disso, era um modelo dinâmico, em que havia relação endógena entre a economia e o clima, ao invés de estimativas exógenas das variáveis econômicas.

Em 1992 o DICE foi publicado na revista *Science*, no artigo *An optimal transition path for controlling greenhouse gases*. Nordhaus interpretou a trajetória ótima calculada como um equilíbrio competitivo de mercado em que as externalidades foram internalizadas. Nesse ponto, o DICE já era muito parecido ao que é hoje; os resultados foram sempre os mesmos – o gradualismo; e foi definitivamente abandonada a modelagem probabilística.

O modelo foi rodado em intervalos de dez anos, e os parâmetros foram *calibrados* de acordo com os dados das três décadas que antecederam a publicação do artigo – esse é um procedimento distinto da determinação dos parâmetros por regressões econométricas.

A primeira versão do RICE (*Regional Dynamic Integrated Climate-Economy model*) é de 1996, no artigo *A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies*, em coautoria com Zili Yang. O modelo incorpora *insights* de teoria dos jogos e de economia política, permitindo que os países tenha estratégias não cooperativas (o DICE-2007 tem uma variável para a taxa de participação dos países). Um esforço matemático é feito para produzir resultados de equilíbrio competitivo, ou seja, para que oferta e demanda sejam iguais em todos os períodos (NORDHAUS & YANG, 1996: 745 – 748). Central nesse esforço é a ponderação de Negishi, que dá o mesmo peso a custos e benefícios em todas as regiões – funciona como uma ponderação para desigualdade.

O RICE inclui um modelo energético desagregado, enquanto o DICE trata isso exogenamente, na função de produção.

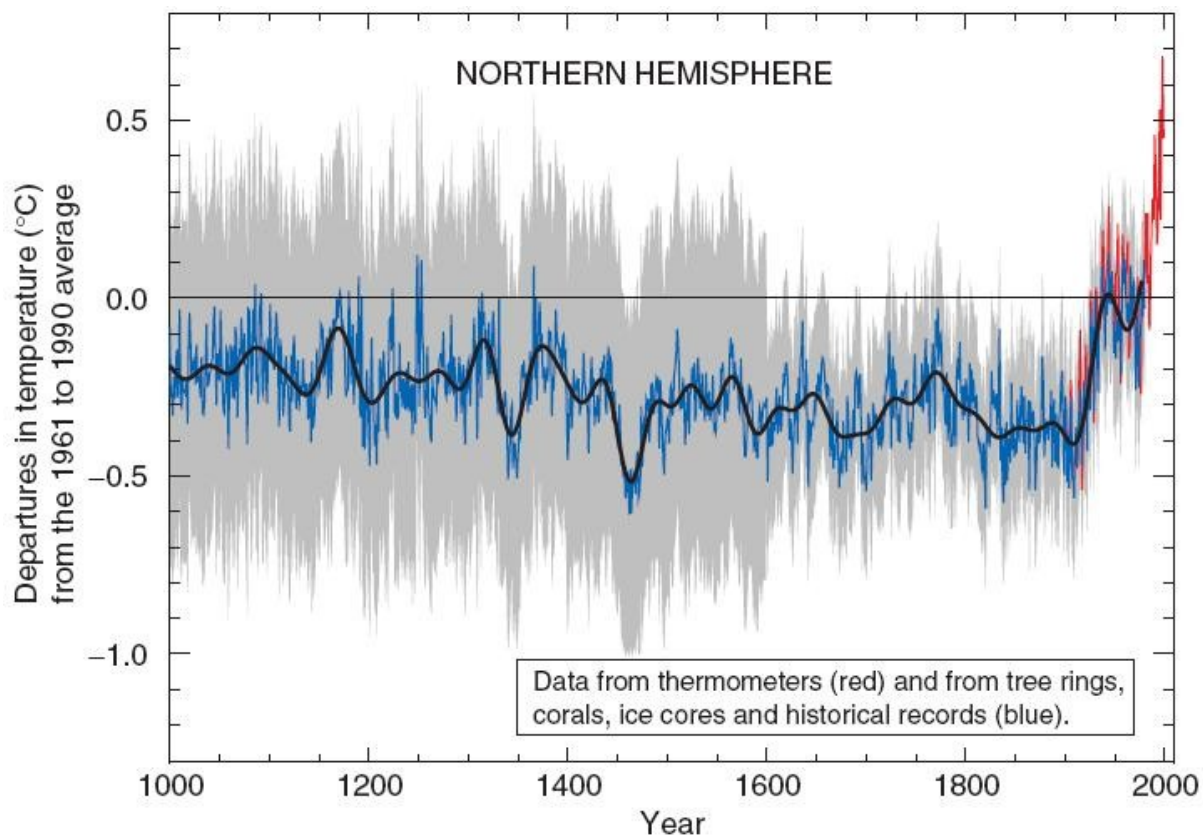
Nordhaus defende o elevado grau de agregação de seus modelos com base em quatro argumentos: transparência, não convergência de modelos muito grandes, incerteza sobre as relações funcionais, e capacidade computacional (modelos de otimização requerem muito mais capacidade de processamento do que modelos de simulação). E conclui: “[i]n modeling, small is genuinely beautiful (...) Apologies are extended to those who feel that their discipline has been violated; along with the apologies goes an invitation to help im-

prove our understanding by providing better parsimonious representations of the crucial geophysical or economic processes” (NORDHAUS, 1999a: 49 – 50).

Nordhaus (1999a) considerou sete tipos de impacto: agricultura, aumento do nível do mar, outros setores de mercado, saúde, impactos fora do mercado, ecossistemas e assentamentos humanos, e catástrofe. E concluiu que o mais representativo são as catástrofes, que, além do mais, adicionam altos níveis de incerteza às estimativas. O modelo inclui os Sulfatos na categoria GHG exógenos.

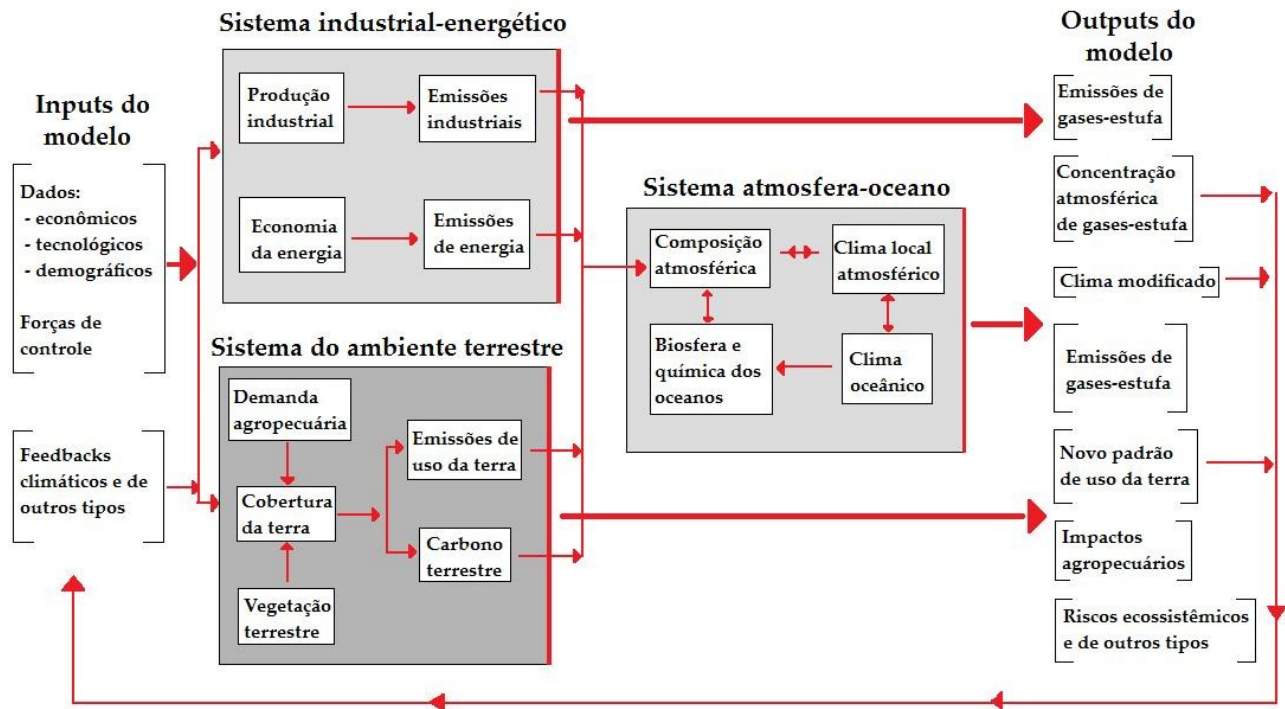
Nordhaus (1999) enumerou os procedimentos possíveis para se estimarem os impactos de eventos climáticos catastróficos: (i) opinião de especialistas (distribuição de probabilidades subjetiva); (ii) série de tempo (procedimento muito restritivo, pois não há variação climática suficiente para informar o modelo econométrico); (iii) modelos setoriais, que incluam descrições detalhadas das relações existentes dentro de cada setor (procedimento com muito potencial); (iv) estoques de capital – estimar quanto determinado fenômeno, por exemplo, o aumento do nível do mar, pode afetar o estoque de capital existente (humano, físico, natural, etc); e (v) análise de limiares, que seria a aplicação de um modelo como o DICE para o cálculo dos custos. Este último é aplicado pelo autor, que conclui que a maior parte dos custos esperados vem da inclusão da possibilidade de catástrofes.

ANEXO 1 – *hockey stick*: temperatura do hemisfério Norte dos anos 1000 a 2000.



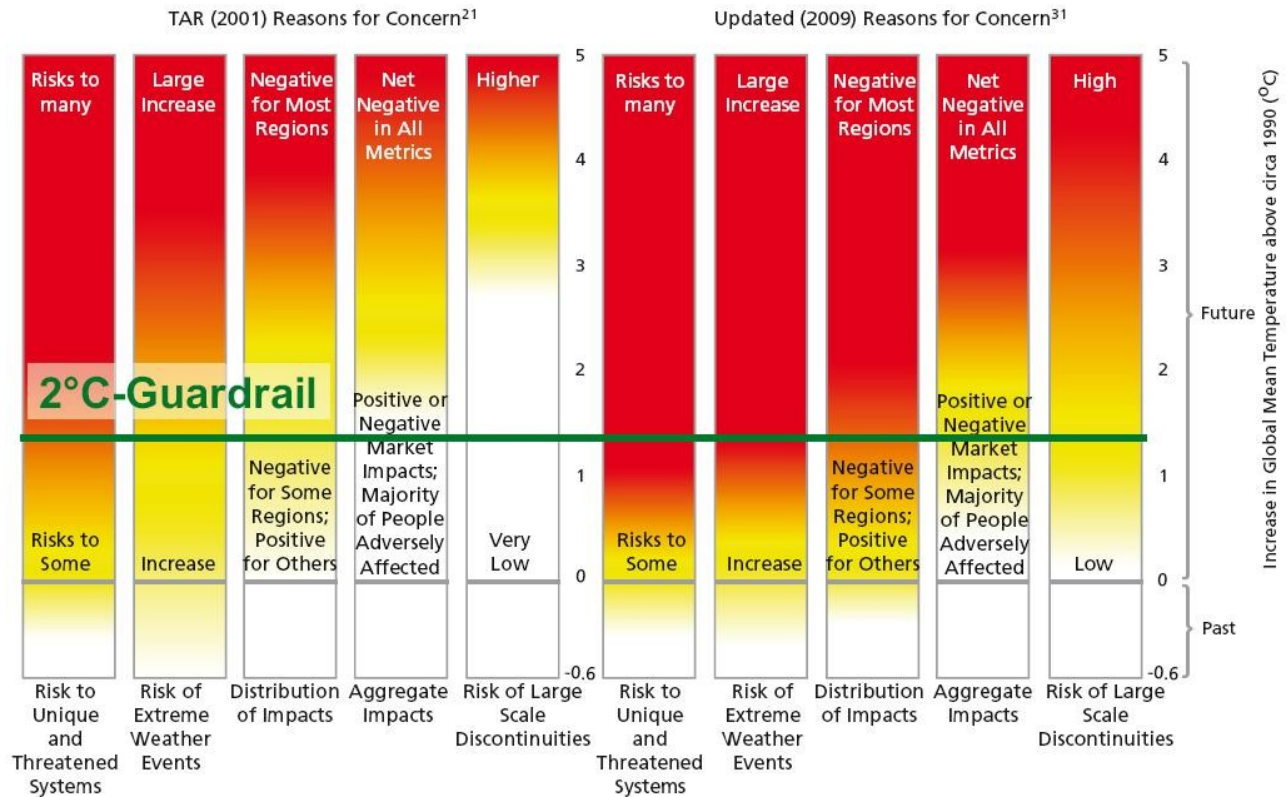
Fonte: IPCC (2001: 3).

ANEXO 2 - cadeias de causalidade do modelo IMAGE 2.0.



Fonte: adaptado de Van der Sluijs (1996: 3).

ANEXO 3 – impactos potenciais do aquecimento global por “motivo para preocupação” (*reason for concern*)¹.



1 – zero na escala vertical corresponde aproximadamente à temperatura de 1990, e a base do quadro corresponde à temperatura do ano 1900; o nível de risco ou severidade dos impactos potenciais aumenta com a intensidade da cor vermelha. Os cinco motivos para preocupação foram descritos pelo terceiro relatório do IPCC com o intuito de mostrar os impactos das mudanças climáticas que podem ser considerados antropogênicos. Cada motivo para preocupação categoriza impactos de um mesmo tipo e provê um conjunto de métricas que indicam a severidade do risco; ²¹ – IPCC, 2001, WG2; ³¹ – Smith *et. al.* (2009).

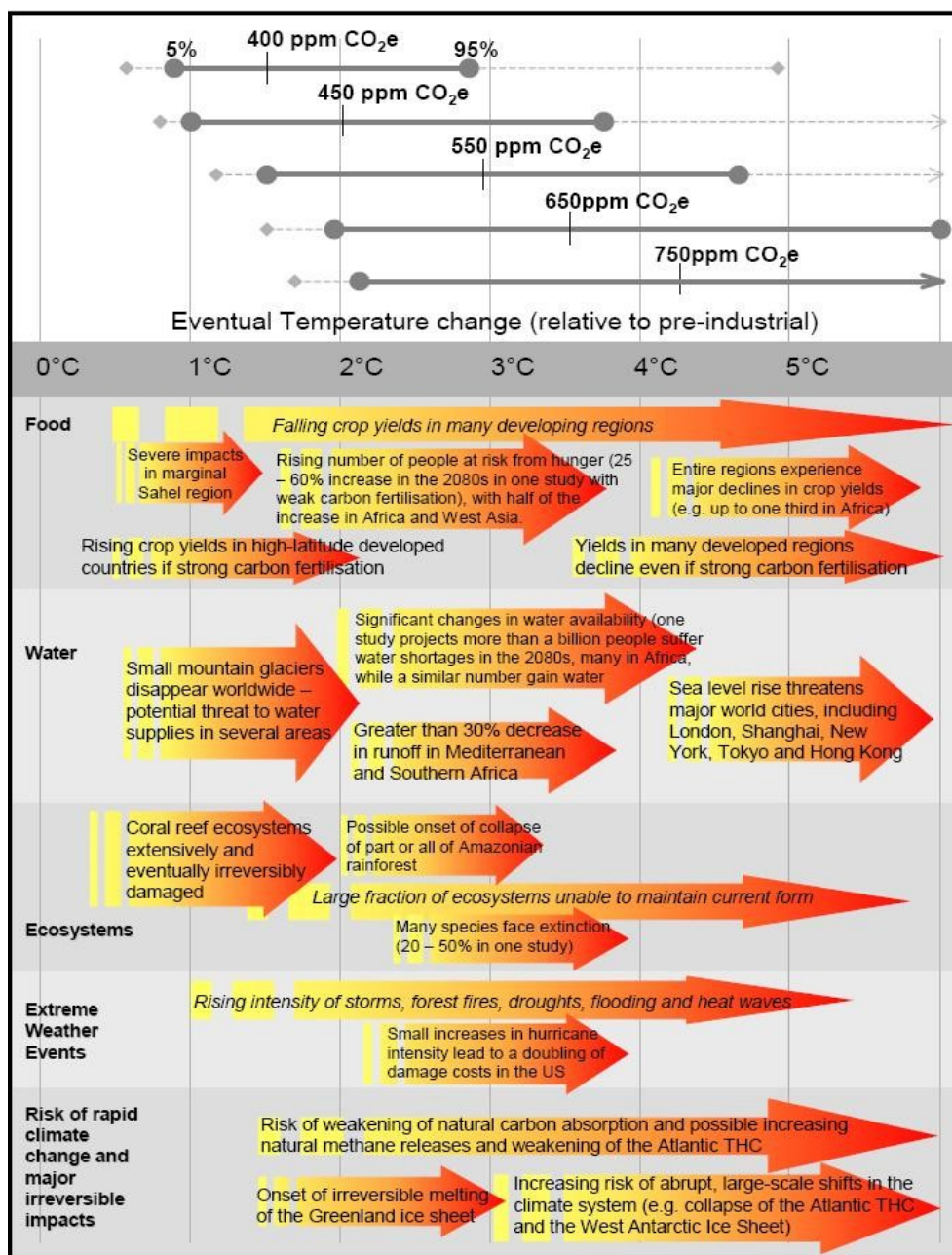
Fonte: Richardson *et. al.* (2009: 16).

ANEXO 4 – principais impactos discutidos pelo relatório Stern¹.

Temp rise (°C)	Water	Food	Health	Land	Environment	Abrupt and Large-Scale Impacts
1°C	Small glaciers in the Andes disappear completely, threatening water supplies for 50 million people	Modest increases in cereal yields in temperate regions	At least 300,000 people each year die from climate-related diseases (predominantly diarrhoea, malaria, and malnutrition) Reduction in winter mortality in higher latitudes (Northern Europe, USA)	Permafrost thawing damages buildings and roads in parts of Canada and Russia	At least 10% of land species facing extinction (according to one estimate) 80% bleaching of coral reefs, including Great Barrier Reef	Atlantic Thermohaline Circulation starts to weaken
2°C	Potentially 20 - 30% decrease in water availability in some vulnerable regions, e.g. Southern Africa and Mediterranean	Sharp declines in crop yield in tropical regions (5 - 10% in Africa)	40 - 60 million more people exposed to malaria in Africa	Up to 10 million more people affected by coastal flooding each year	15 - 40% of species facing extinction (according to one estimate) High risk of extinction of Arctic species, including polar bear and caribou	Potential for Greenland ice sheet to begin melting irreversibly, accelerating sea level rise and committing world to an eventual 7 m sea level rise
3°C	In Southern Europe, serious droughts occur once every 10 years 1 - 4 billion more people suffer water shortages, while 1 - 5 billion gain water, which may increase flood risk	150 - 550 additional millions at risk of hunger (if carbon fertilisation weak) Agricultural yields in higher latitudes likely to peak	1 - 3 million more people die from malnutrition (if carbon fertilisation weak)	1 - 170 million more people affected by coastal flooding each year	20 - 50% of species facing extinction (according to one estimate), including 25 - 60% mammals, 30 - 40% birds and 15 - 70% butterflies in South Africa Collapse of Amazon rainforest (according to some models)	Rising risk of abrupt changes to atmospheric circulations, e.g. the monsoon Rising risk of collapse of West Antarctic Ice Sheet Rising risk of collapse of Atlantic Thermohaline Circulation
4°C	Potentially 30 - 50% decrease in water availability in Southern Africa and Mediterranean	Agricultural yields decline by 15 - 35% in Africa, and entire regions out of production (e.g. parts of Australia)	Up to 80 million more people exposed to malaria in Africa	7 - 300 million more people affected by coastal flooding each year	Loss of around half Arctic tundra Around half of all the world's nature reserves cannot fulfill objectives	
5°C	Possible disappearance of large glaciers in Himalayas, affecting one-quarter of China's population and hundreds of millions in India	Continued increase in ocean acidity seriously disrupting marine ecosystems and possibly fish stocks		Sea level rise threatens small islands, low-lying coastal areas (Florida) and major world cities such as New York, London, and Tokyo		
More than 5°C	The latest science suggests that the Earth's average temperature will rise by even more than 5 or 6°C if emissions continue to grow and positive feedbacks amplify the warming effect of greenhouse gases (e.g. release of carbon dioxide from soils or methane from permafrost). This level of global temperature rise would be equivalent to the amount of warming that occurred between the last age and today – and is likely to lead to major disruption and large-scale movement of population. Such “socially contingent” effects could be catastrophic, but are currently very hard to capture with current models as temperatures would be so far outside human experience.					

1 – parte da incerteza relativa aos impactos potenciais é captada pelas variações de cores mostradas, mas existem incertezas adicionais sobre a medida exata dos danos. A escala de temperatura representa o aquecimento relativo à era pré-industrial. Para cada temperatura, os impactos representam um intervalo de 1 °C ao redor da temperatura mostrada, ou seja, a linha de 1 °C corresponde ao intervalo 0,5 °C a 1 °C, etc. Os números de pessoas afetadas em diferentes temperaturas se baseiam nos cenários para população e PIB para 2080 do terceiro relatório do IPCC. Além disso, a figura admite adaptação aos níveis de indivíduos e firmas, mas não na escala mais ampla da macroeconomia e das políticas públicas. **Fonte: Stern (2007: 66 – 67).**

ANEXO 5 – níveis de estabilização e faixas de probabilidade para aumentos de temperatura e impactos¹.



1 – As linhas horizontais no topo da figura apresentam as faixas de temperatura de equilíbrio projetadas pelo terceiro relatório do IPCC para diferentes níveis de estabilização da concentração atmosférica de GHG, cobrindo o intervalo de 5% a 95% da distribuição de probabilidades. A linha vertical representa o 50º percentil. As linhas pontilhadas representam o intervalo de 5% a 95% de 11 estudos mais recentes compilados no relatório Stern. **Fonte: Stern (2007: 330).**

ANEXO 6 – equações mais importantes do PAGE-2002 (HOPE, 2006: 35 – 48).

1 – Emissões naturais:

$$NtE = \frac{STIM_g \times \sum_r (RT_r(t-1) \times AREA_r)}{\sum_r (AREA_r)} \quad (28)$$

Onde: NtE = emissões naturais de CO_2 , CH_4 e SF_6 estimuladas pelo aumento de temperatura global (Mt); $STIM_g$ = parâmetro incerto que determina o *feedback* biosférico das emissões naturais (Mt / °C) para o gás g ; $RT_r(t-1)$ = temperatura da região r na data $t-1$; $AREA_r$ = área da região r (Km²).

2 – Fluxo de Sulfatos:

$$FS_r(t) = D \times SFX_r(t) + \frac{IND}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{NF_r + SFX_r(t)}{NF_r}\right) \quad (29)$$

Onde: $FS_r(t)$ = forçamento radiativo de Sulfatos (W / m²); D = parâmetro incerto que determina o aumento do forçamento radiativo direto por unidade de Sulfato (MW x ano / Kg); $SFX_r(t)$ = fluxo de Sulfatos (Tg / km² x ano); IND = parâmetro incerto que representa o aumento do *forcing* indireto para um aumento de 100% do fluxo natural de Sulfatos (W / m²); NF_r = fluxo natural de Sulfatos (Tg / Km² / ano).

3 – Variações regionais da temperatura:

$$GRT(t) = \frac{\sum_r RT_r(t) \times AREA_r}{\sum_r AREA_r} \quad (30)$$

Onde: $GRT(t)$ = temperatura média global (°C); $RT_r(t)$ = temperatura da região r (°C).

4 – Patamar tolerável de temperatura, que varia de acordo com as políticas de adaptação:

$$TR_{d,r} = TR_{d,0} \times TM_r ; \quad TP_{d,r} = TP_{d,0} \times TM_r \quad (31)$$

Onde: $TR_{d,r}$ = faixa tolerável de mudança de temperatura para o setor d (0 = mercado, 1 = não mercado) e a região r ($^{\circ}\text{C}$ / ano); TM_r = parâmetro incerto para definir as peculiaridades de cada região; $TP_{d,r}$ = platô tolerável de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$ATP_{d,r}(t) = TP_{d,r} + PLAT_{d,r}(t) ; \quad ATR_{d,r}(t) = TR_{d,r} + SLOPE_{d,r}(t) \quad (32)$$

Onde: $ATP_{d,r}(t)$ = platô tolerável de temperatura ajustado depois da adaptação ($^{\circ}\text{C}$); $PLAT_{d,r}(t)$ = aumento no platô tolerável de temperatura devido à adaptação ($^{\circ}\text{C}$); $ATR_{d,r}(t)$ = faixa tolerável de mudança de temperatura ajustada depois da adaptação ($^{\circ}\text{C}$ / ano); $SLOPE_{d,r}(t)$ = aumento na faixa tolerável de temperatura devido à adaptação ($^{\circ}\text{C}$ / ano).

$$ATL_{d,r}(0) = 0 ; \quad ATL_{d,r}(t) = \min[ATL_{d,r}(t), ATL_{d,r}(t-1) + ATR_{d,r}(t)] \quad (33)$$

Onde $ATL_{d,r}(t)$ = nível tolerável de temperatura ajustado depois da adaptação.

5 – Possibilidade de descontinuidade climática:

$$WIDIS_r(t) = IDIS(t) \times \left(\frac{PDIS}{100}\right) \times WDIS_r \times Q_r(t) ; \quad IDIS_i = \max[0, GRT_i - TDIS] \quad (34)$$

Onde: $WIDIS_r(t)$ = impacto ponderado de descontinuidade climática (milhões de \$); $IDIS(t)$ = impacto de descontinuidade ($^{\circ}\text{C}$); $PDIS$ = probabilidade de descontinuidade (% / $^{\circ}\text{C}$); $WDIS_r$ = perda de PIB se a descontinuidade acontecer (%); $Q_r(t)$ = PIB; $TDIS$ = aumento de temperatura tolerável antes de risco de descontinuidade ($^{\circ}\text{C}$).

6 – Danos climáticos:

A agregação dos diferentes tipo de danos calculados para as oito regiões do globo, para os setores de mercado e de fora do mercado, e para os dez períodos analisados no modelo, é feita da seguinte maneira: calcula-se, em primeiro lugar, o nível tolerável de temperatura em cada região do globo (ATL). Subtrai-se, em seguida, o valor medido da temperatura (RT) para se obter o aquecimento acima do nível tolerável (I , em °C):

$$I_{d,r}(t) = RT_r(t) - ATL_{d,r}(t) ; I_{d,r}(t) \geq 0 \quad (35)$$

Essa é a variável que determina a magnitude dos danos. Quando multiplicada pelo parâmetro (Y) que determina o quanto cada grau de aquecimento acima do tolerável causa de custos, ela dará uma medida dos custos monetários das mudanças climáticas. Y é específico de cada região e setor, e representa quanto do PIB será perdido caso haja um aquecimento 2,5 graus Celsius superior ao nível tolerável. É obtido pela multiplicação de um parâmetro específico de cada região pelo impacto da região base, que é a União Europeia (Equação 36). Por exemplo, o valor estimado por IPCC (2001) para a União Europeia é uma perda de 0,5% do PIB, no setor mercado, para um aquecimento 2,5 graus Celsius acima do nível tolerável. Para se obter o Y da América Latina para o mesmo setor, basta multiplicar 0,5% por 1,83, que dá 0,915%, de onde se conclui que a América Latina terá quase o dobro dos custos da União Europeia se houver um aquecimento superior ao nível tolerável. Mais informações na Tabela 12.

$$Y_{d,r} = Y_{d,0} \times \frac{WF_r}{100} \quad (36)$$

Onde: $Y_{d,r}$ = danos climáticos (% de PIB por 2,5 °C); WF_r = fator de ponderação.

TABELA 12 – impactos monetários do aquecimento global na União Europeia (% do PIB para um aumento da temperatura de 2,5 °C) – setores mercado e não mercado –, e ponderações usadas para o cálculo dos danos das demais regiões do PAGE-2002¹.

	Média*	Mínimo*	Moda*	Máximo*
Impacto econômico, União Européia, setor mercado	0,50%	-0,10%	0,60%	1,00%
Impacto econômico, União Européia, setor não mercado	0,73%	0,00%	0,70%	1,50%
Fator de ponderação, Estados Unidos	0,25	0	0,25	0,5
Fator de ponderação, outros OCDE	0,25	0	0,25	0,5
Fator de ponderação, África e Oriente Médio	1,83	1	1,5	3
Fator de ponderação, China e Ásia centralmente planejada	0,2	0	1	0,5
Fator de ponderação, Índia e Sudeste da Ásia	2,5	1,5	2	4
Fator de ponderação, América Latina	1,83	1	1,5	3
Fator de ponderação, Leste europeu e ex-União Soviética	-0,35	-1	-0,25	0,2

* IPCC (2001); **1** – multiplica-se o impacto da União Européia pelo fator de ponderação de cada região para se obter o impacto da região. Valores negativos representam ganhos.

Fonte: adaptado de Hope (2006: 24).

Nota-se uma grande assimetria de vulnerabilidade, sendo a região Índia e Sudeste Asiático a mais vulnerável, seguida de perto por África, Oriente Médio, e América Latina. Os Estados Unidos e demais países da OCDE terão menos impactos do que a União Européia, e os países do Leste europeu terão, com grande probabilidade, ganhos líquidos.

O parâmetro Y deve ser multiplicado pelo aquecimento que se verificou acima do nível tolerável (I) e dividido por 2,5 para que se obtenha o percentual de PIB perdido em decorrência do aquecimento. Além disso, devem-se considerar possíveis reduções de impacto (IMP) devido às políticas de adaptação. O impacto ponderado ($\mathcal{Q}_{d,r}(t)$, em milhões de \$) fica, então:

$$\Omega_{d,r}(t) = \left(\frac{I_{d,r}(t)}{2,5} \right)^{\beta} \times Y_{d,r} \times \left(1 - \frac{IMP_{d,r}(t)}{100} \right) \times Q_r(t) \quad (37)$$

Onde: β = expoente da função de danos (1 para função linear; 3 para função cúbica); $IMP_{d,r}(t)$ = redução de impactos devido à adaptação (%); $Q_r(t)$ = PIB.

Finalmente, calcula-se o impacto total ponderado das mudanças climáticas ($WIT_r(t)$, em milhões de \$) pela soma dos impactos decorrentes do aumento linear da temperatura com os impactos derivados de uma descontinuidade climática, em cada um dos setores, regiões e períodos:

$$WIT_r(t) = \sum_d \Omega_{d,r}(t) + WIDIS_r(t) \quad (38)$$

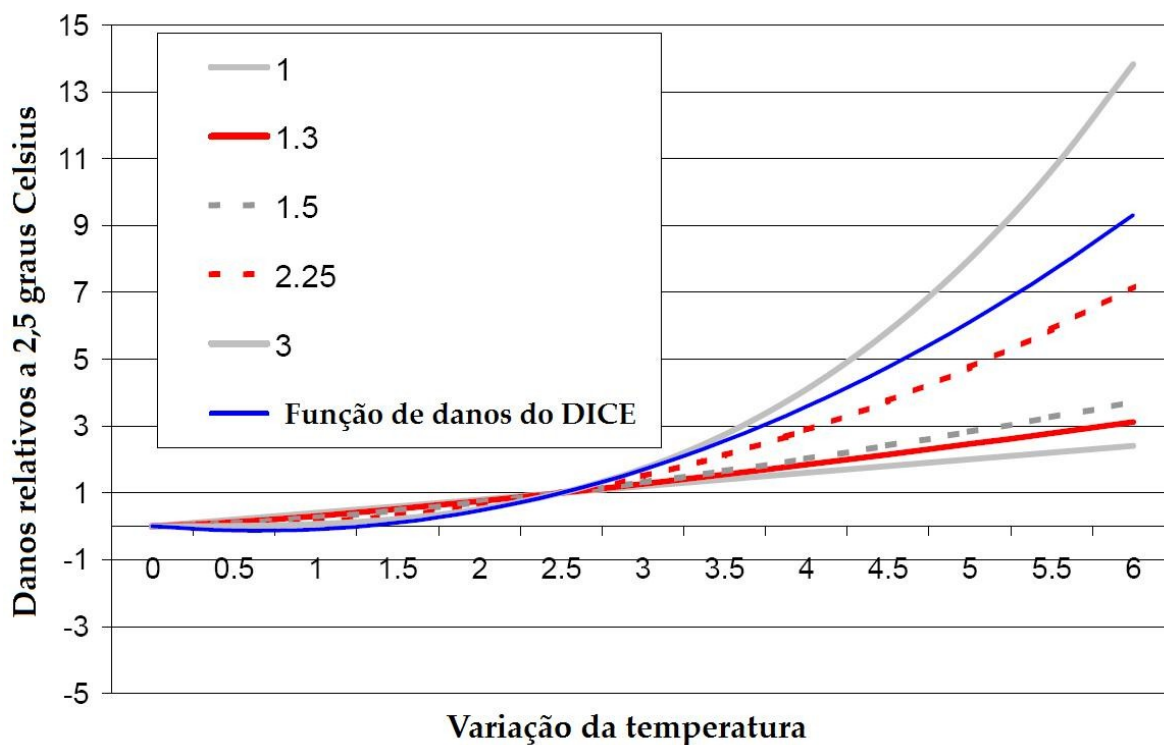
Onde: $WIDIS_r(t)$ = impacto ponderado de descontinuidade climática (milhões de \$).

7 – Custos de adaptação:

$$AC_{i,d,r} = (CS_{d,r} \times SLOPE_{i,d,r}) + (CP_{d,r} \times PLAT_{i,d,r}) + (CI_{d,r} \times IMP_{i,d,r}) \quad (39)$$

Onde: $AC_{d,r}(t)$ = custos de adaptação (milhões de \$); $CS_{d,r}$ = custo do aumento na variação tolerável de temperatura devido à adaptação (milhões de \$ x década / °C); $CP_{d,r}$ = custo do aumento no nível tolerável de temperatura devido à adaptação (milhões de \$ / °C); $CI_{d,r}$ = custo das reduções de impactos devido à adaptação (milhões de \$ / %); $IMP_{d,r}(t)$ = redução de impactos devido à adaptação (%).

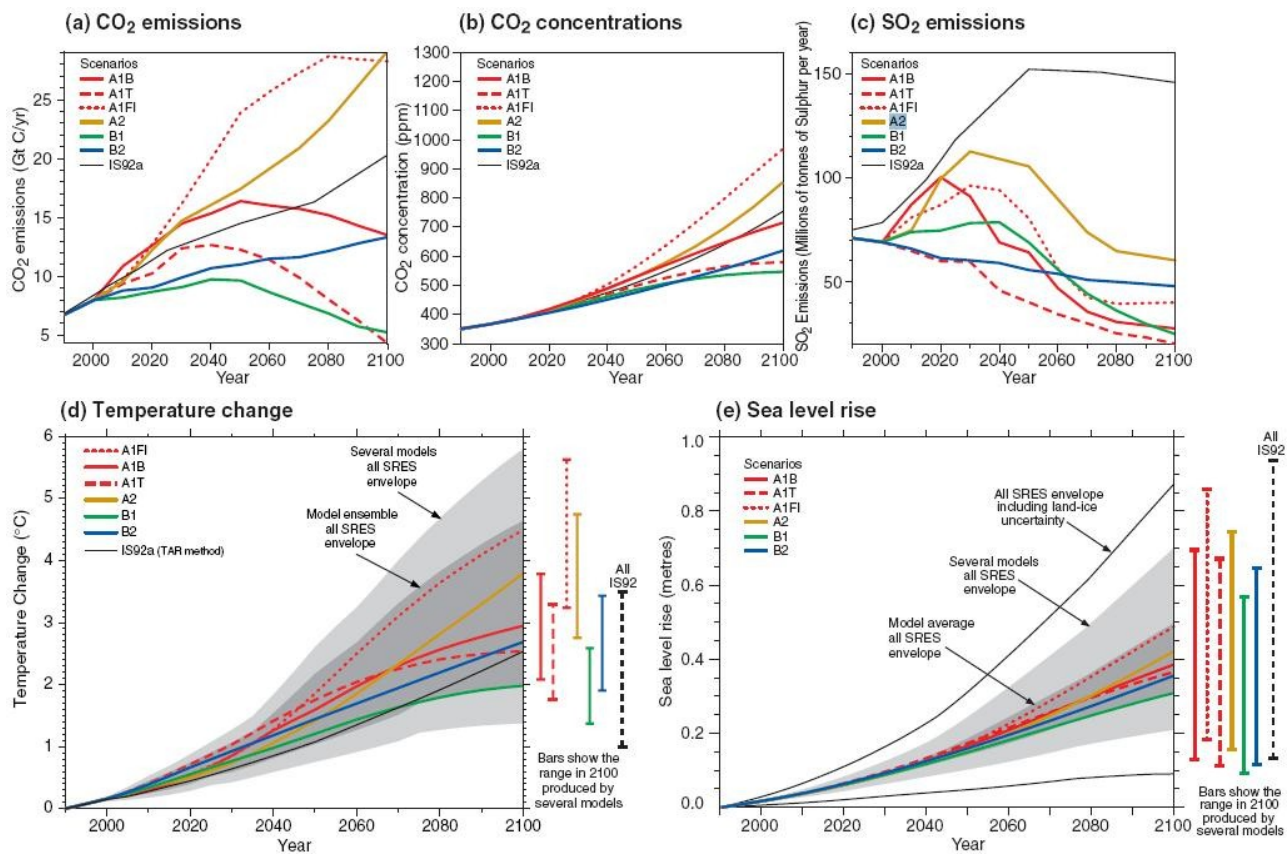
ANEXO 7 – sensibilidade dos danos estimados à temperatura no relatório Stern, para diferentes valores do expoente da função de danos¹.



* DICE é o modelo de William Nordhaus (1990, 2008), *Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy*; **1** – No gráfico, as curvas em que β é igual a 1, 1,3 e 3 pertencem ao conjunto original de simulações do relatório Stern, em que a distribuição triangular tem esses valores como mínimo, moda e máximo. Já as curvas em que β é igual a 1,5, 2,25 e 3 representam um novo conjunto de simulações, desenvolvido no pós-escrito, em que esses valores são escolhidos como mínimo, moda e máximo.

Fonte: Stern (2007: 661).

ANEXO 8 – cenários do terceiro relatório do IPCC para variáveis relevantes dos modelos econômico-climáticos – emissões de CO₂; concentração atmosférica de CO₂; emissões de SO₂; aumento da temperatura; e aumento do nível do mar –, 2000 a 2100.



Fonte: IPCC (2001: 14).