

# IMPACTOS ECONÔMICOS DE CENÁRIOS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL\*

Jonathan Gonçalves da Silva\*\*

Angelo Costa Gurgel\*\*\*

O presente estudo objetiva estimar os impactos econômicos de cenários de políticas climáticas para o Brasil. Para tal, utiliza um modelo de equilíbrio geral dinâmico-recursivo da economia mundial. Os principais resultados indicam que metas setoriais de quedas progressivas de 3% a 30% em emissões no período de 2015 a 2050 levam a uma perda acumulada entre 1% e 2% em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) de 2004. Apesar das emissões, em 2050, caírem em 54% em relação a um cenário de referência, as perdas em bem-estar são apenas de 0,8% e não aumentam com a inclusão de metas de redução no desmatamento. Conclui-se que essas políticas geram impactos negativos pequenos, devido à disponibilidade de fontes de energia limpa na matriz brasileira.

Palavras-chave: Gases de efeito estufa, políticas climáticas, equilíbrio geral, economia brasileira.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima<sup>1</sup> – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007a) –, entre 1970 e 2004 as emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), ponderadas pelo seu potencial de aquecimento global, cresceram 70% (24% entre 1990 e 2004). Esse aumento das emissões de GEE tem sido apontado como uma das causas das alterações climáticas recentes. As informações técnicas, científicas e socioeconômicas disponíveis permitem compreender os riscos associados à alteração do clima no planeta, como a possível extinção acelerada de diversas espécies vegetais e animais, impactos negativos na produtividade agrícola, aumento de doenças, elevação dos níveis dos oceanos, redução da disponibilidade de água em algumas regiões e enchentes em outras (IPCC, 2007b).

Como exemplo, um estudo realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2008) indica que o aumento das temperaturas

---

\* Os autores agradecem o apoio financeiro e as bolsas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima), aos pareceristas anônimos pelas valiosas sugestões e à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEA-RP/USP), onde a pesquisa foi realizada.

\*\* Doutorando do Programa de Economia Aplicada da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). E-mail: jonathangsilva@hotmail.com

\*\*\* Professor adjunto e coordenador do Mestrado Profissional em Agronegócio da Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas (EESP/FGV).

1. O IPCC é o organismo de revisão da produção científica relativa à mudança global do clima e com atividade relacionada à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC).

em decorrência do aquecimento global pode provocar perdas nas safras de grãos da ordem de R\$ 7,4 bilhões já em 2020 no Brasil, número este que pode subir para R\$ 14 bilhões em 2070, e dessa forma, alterar consideravelmente a geografia da produção agrícola no Brasil. Neste contexto, não apenas a geografia do setor agrícola pode ser alterada, mas também a industrial, a populacional e a social, uma vez que muitos dos assentamentos humanos estão localizados em planícies de inundação costeira e de rios (normalmente áreas de rápida urbanização), ou seja, áreas propensas a eventos climáticos extremos.

O Brasil possui um papel relevante neste quadro, pois ao se considerar as emissões relacionadas às mudanças do uso da terra e das florestas (desmatamento, queimadas e abertura de pastos em áreas antes de florestas), salta da vigésima para a sexta posição no *ranking* dos países emissores, sendo tais mudanças sua principal fonte de emissões de GEE (DINIZ, 2007). Esse perfil singular das emissões brasileiras pode ser explicado pela disponibilidade de grandes extensões de terras e contínua expansão da agricultura para uso no cultivo e nas pastagens, permitindo que essas atividades se transformassem em setores importantes para o crescimento econômico do país.

Nesse contexto, Rocha (2003) destaca a pressão exercida pela comunidade internacional sobre o Brasil a fim de que este assumisse metas voluntárias de redução de emissão de GEE. Mas quais seriam os possíveis impactos econômicos se o Brasil adotasse políticas de redução de GEE? Como o Brasil pode reduzir os efeitos negativos da adoção dessas políticas sobre sua economia? Os efeitos de restrição às emissões de GEE sobre a economia brasileira foram pouco investigados até o momento e carecem de maior análise.

Alguns estudos têm procurado abordar essas questões através de exercícios de modelagem da economia brasileira. Guilhoto, Lopes e Motta (2002), por exemplo, utilizaram o Modelo Inter-regional da Economia Brasileira (Mibra) para estimar os impactos ambientais e regionais do crescimento econômico, identificando que uma desconcentração regional fora do eixo Sudeste-Sul permitiria aumentar o ganho de eficiência ambiental, por gerar taxas de crescimento menores nas razões da carga industrial poluidora ou do nível de uso de água e energia por unidade de valor produzido.

Já Lopes (2003), utilizando o modelo de equilíbrio geral computável (EGC) BR-Green, verificou que uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> provoca redução no nível de atividade da economia nacional. Segundo esse estudo, os setores que mais demandam derivados de petróleo são os mais afetados por restrições às emissões, devido ao aumento em seus custos de produção e aumentos em seus preços, o que por conseguinte afeta a demanda e reduz as exportações.

Tourinho, Motta e Alves (2003), por sua vez, utilizaram um modelo estático adaptado para a economia brasileira capaz de calcular o volume de emissões de

CO<sub>2</sub> para a economia no ano de 1998. Ao simular um choque de impostos ao carbono, encontraram uma redução no nível de recursos e aumento em preços nos setores mais intensivos em emissões, bem como queda na renda das famílias e redução no PIB.

Outro estudo sobre o tema foi conduzido por Rocha (2003), que utilizou o modelo *Carbon Emission Reduction Trade* (CERT) para estimar a oferta e a demanda do mercado potencial de comércio de emissões dentro do Protocolo de Quioto. Os resultados obtidos mostraram que no cenário de referência a participação brasileira no mercado de créditos de carbono foi de apenas 3,4% do total mundial, e que o lucro de todos os projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo no Brasil seria de US\$ 327,6 milhões.

Hilgemberg (2004) procurou quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do uso de gás natural, álcool e derivados de petróleo tanto no nível nacional quanto regional e avaliou os impactos de eventuais políticas de controle de emissões, através de um modelo inter-regional de insumo produto. De acordo com esse autor, o impacto das políticas em todos os setores é menor que o percentual da restrição e que os efeitos são geralmente maiores naqueles setores em que as ligações com o restante da economia são mais fortes. Como exemplo, se a restrição for imposta ao setor agropecuário, a demanda deste setor pelos insumos do setor comércio e serviços irá diminuir em cerca de R\$ 107 milhões.

Ferreira Filho e Rocha (2007) também buscaram avaliar os efeitos de restrições de emissões de GEE sobre a economia brasileira utilizando o modelo de equilíbrio geral Mosaico-GEE, um modelo estático e inter-regional que representa 27 estados brasileiros. Os resultados mostraram que taxar as emissões associadas ao nível de atividade dos setores é mais importante que taxar apenas aquelas originadas no uso de combustíveis, dada a importância das primeiras na matriz brasileira.

Já Feijó e Porto Jr. (2009) utilizaram um modelo de equilíbrio geral da economia mundial, conhecido como *Global Trade Analysis Project-Energia* (GTAP-E), para mensurar os impactos da implantação do Protocolo de Quioto sobre a economia brasileira. Os resultados evidenciaram que a política ambiental de redução de emissões, apesar de contribuir para a diminuição de CO<sub>2</sub> na atmosfera, afeta negativamente o bem-estar econômico, principalmente em virtude do encarecimento das *commodities* de energia e da redução do seu uso. O estudo verificou ainda o potencial brasileiro em reduzir emissões sem comprometer significativamente seu bem-estar e eficiência alocativa.

Em geral, os estudos considerados indicam uma realocação de recursos na economia de setores intensivos em emissões para setores menos intensivos, bem como perdas de bem-estar em decorrência da redução do nível de atividade econômica quando da adoção de políticas de restrição de emissões. Os impactos

sobre o nível de atividade da economia podem, ainda, variar de acordo com a interdependência entre os setores.

Apesar dos esforços desses trabalhos no sentido de avaliar as consequências econômicas de restrições às emissões, a literatura nacional que faz uso de modelos quantitativos ainda possui grande potencial de desenvolvimento. Isto porque a maioria dos trabalhos utiliza modelos estáticos de comércio, modificados para incorporar questões ambientais, alguns não representam outros países e suas relações com o Brasil, e nenhum considera a questão das mudanças no uso da terra e emissões de desmatamento, principal fonte emissora de GEE no país. Com isso, verifica-se um amplo espaço para o desenvolvimento de modelos mais avançados, que considerem ao mesmo tempo aspectos dinâmicos, a representação da economia mundial e a competição pelo uso da terra, quando da avaliação dos impactos de ações de mitigação das emissões de GEE pelo Brasil.

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo estimar os impactos econômicos de cenários de políticas climáticas para o Brasil, considerando a possibilidade de restrições às emissões provenientes do desmatamento.

Assim, este trabalho desenvolve um estudo quantitativo levando em consideração especificidades brasileiras como: uma matriz energética com grande participação de fontes de energia renováveis; os principais setores emissores de GEE; as emissões relacionadas às mudanças do uso da terra; os custos de políticas de redução das emissões; e a consideração de outros países e seus relacionamentos com o Brasil através dos mercados globais, entre outros. A abordagem de modelagem quantitativa para simulação de políticas de mitigação de mudanças climáticas pelo Brasil deve permitir avaliar como a economia brasileira será afetada por este tipo de política em uma perspectiva de custo-efetividade, fornecendo informações sobre o custo de se atingir metas predeterminadas de reduções em emissões.

O trabalho está organizado em mais três seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta a descrição do modelo utilizado, bem como a base de dados e as agregações usadas. A terceira seção é dedicada à aplicação do modelo por meio da adoção de políticas de redução de emissões de GEE e a última seção apresenta as conclusões sobre os principais resultados obtidos.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 O Modelo**

Para avaliar os impactos de políticas exógenas de mitigação das mudanças climáticas sobre a economia brasileira utiliza-se como instrumental analítico a modelagem computável de equilíbrio geral, que se mostra mais adequada por considerar diversos setores, agentes econômicos, países e regiões e as relações de interdependência

entre esses. Além disso, a utilização de modelos de EGC permite a obtenção das direções e magnitudes de choques exógenos, neste caso, a adoção de políticas de redução das emissões dos GEE, sob cenários alternativos.

Este instrumental analítico, conforme Shoven e Whalley (1984), remove a necessidade de se trabalhar com pequenas dimensões, pois, dada a tecnologia dos microcomputadores, um maior nível de detalhamento e complexidade pode ser incorporado quando comparados com os modelos analíticos simples. Ainda, Wing (2004) destaca que os modelos EGC são uma ferramenta-padrão utilizada na análise do bem-estar agregado e na mensuração dos impactos de políticas, que podem ser transmitidos através de múltiplos mercados, contendo uma ampla gama de tributos, subsídios, quotas ou instrumentos de transferência. Kydland e Prescott (1996) e Shoven e Whalley (1984) apresentam maiores detalhes sobre os modelos EGC.

Os modelos EGC têm sido amplamente utilizados em análises de políticas climáticas, como, por exemplo, nas análises dos impactos do Protocolo de Quioto sobre a economia europeia (VIRGUIER; BABIKER; REILLY, 2003), sobre a economia japonesa (PALTSEV *et al.*, 2004), sobre os países em desenvolvimento (BABIKER; REILLY; JACOBY, 2000), em análises a respeito dos custos de uma política climática nos Estados Unidos sob a gestão Obama (PALTSEV *et al.*, 2009), sobre o papel da Rússia no Protocolo de Quioto (BERNARD *et al.*, 2003), sobre abordagens alternativas para a redução do aquecimento global (NORDHAUS, 2007), entre outros.

No presente estudo, utiliza-se o modelo *Emissions Prediction and Policy Analysis* (EPPA), desenvolvido no *Massachusetts Institute Technology* (MIT), que é um modelo de equilíbrio geral multirregional, multissetorial, dinâmico-recursivo, designado para investigar trajetórias futuras de emissões de GEE pelas suas diferentes fontes e os impactos de políticas de reduções nessas emissões. O modelo EPPA foi construído a partir do conjunto de dados do GTAP (DIMARANAN; MCDUGALL, 2002) e de dados adicionais para as emissões de GEE. O modelo considera um horizonte de simulação de longo prazo (até o ano de 2100) e trata de forma abrangente os principais GEE, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), bem como outras substâncias que exercem impacto direto sobre o clima.<sup>2</sup>

---

2. Maiores detalhes sobre o modelo EPPA podem ser encontrados em Babiker *et al.* (2001), Paltsev *et al.* (2005) e Gurgel, Reilly e Paltsev (2008). A versão do modelo EPPA utilizada neste trabalho é a 5, que difere da 4, pela agregação de regiões, uma vez que o Brasil não estava desagregado da região "Resto da América Latina" na versão 4, bem como a Rússia estava agregada em uma região denominada Antiga União Soviética. Ainda, a versão 5 traz a Indonésia agregada à região Leste Asiático, enquanto na versão anterior essa região estava desagregada das demais. A subseção 2.2, sobre a base de dados, apresentará a agregação regional. Outras diferenças entre a versão utilizada no presente estudo e a versão anterior incluem o ano base do modelo, que é de 2004 na versão 5 e era de 1997 na versão 4. As demais relações, hipóteses e características estruturais do modelo, incluindo equações, elasticidades e hipóteses do comportamento dinâmico, permanecem a mesma das versão 4 do modelo, como em Paltsev *et al.* (2005).

Uma das grandes vantagens da utilização do modelo EPPA é a possibilidade de realizar simulações da economia mundial ao longo do tempo, produzindo cenários de emissões de GEE, aerossóis, bem como de outros poluentes do ar e seus precursores emitidos pelas atividades humanas. Outra contribuição do modelo para a análise econômica é sua capacidade de avaliar os impactos econômicos de políticas de mitigação de emissões, bem como suas implicações sobre a equidade e o bem-estar.

O EPPA é construído por meio de problemas de otimização convencional da teoria microeconômica, cujos objetivos são: maximizar a utilidade dos consumidores sujeita à restrição orçamentária e maximizar os lucros dos produtores sujeitos às tecnologias de produção, à dotação de fatores primários e à existência de tributos e outras distorções. Os problemas de otimização são abordados como Problemas de Complementaridade Mista – *Mixed Complementary Problem* (MCP) –, (RUTHERFORD, 1995) em decorrência da grande quantidade de agentes econômicos e distorções existentes. Conforme demonstrado por Mathiesen (1985), um modelo econômico de equilíbrio de Arrow-Debreu pode ser formulado como um MCP, onde três desigualdades devem ser satisfeitas: lucro zero, equilíbrio dos mercados e equilíbrio da renda. A utilização da abordagem MCP envolve três conjuntos de variáveis não negativas: preços, quantidades e níveis de renda, que satisfarão, respectivamente, às condições de lucro zero, de equilíbrio do mercado e de equilíbrio contábil da renda.

A condição de lucro zero requer que qualquer atividade em operação obtenha lucro zero, ou seja, o valor dos insumos deve ser igual (ou maior) ao valor da produção. A variável associada a essa condição é o nível de atividade  $y$  para os setores de produção com retornos constantes de escala. Isto significa que  $y > 0$  (uma quantidade positiva de  $y$  é produzida) e o lucro é zero, ou o lucro é negativo e  $y = 0$  (não ocorre atividade produtiva neste caso). Em termos da formulação em MCP, as seguintes condições devem ser satisfeitas para todos os setores de uma economia:

$$lucro_{ri} \geq 0, y_{ri} \geq 0, produto_{ri}^T (-lucro_{ri}) = 0 \quad (1)$$

em que  $r$  representa região e  $i$  representa o setor da economia.

Já a condição de equilíbrio dos mercados estabelece que qualquer bem com preço positivo deve manter o equilíbrio entre oferta e demanda, e qualquer bem com excesso de oferta deve ter preço igual a zero. O vetor preço é a variável associada. Utilizando a abordagem de MCP, a seguinte condição deve ser satisfeita para cada bem e cada fator de produção:

$$oferta_{ri} - demanda_{ri} \geq 0, p_{ri} \geq 0, p_{ri}^T (oferta_{ri} - demanda_{ri}) = 0 \quad (2)$$

condição de equilíbrio da renda requer que, para cada agente (incluindo entidades do governo), o valor da renda seja igual ao valor das dotações de fatores e das receitas dos impostos:

$$renda_r = dotações_r + receitas\ dos\ impostos_r \quad (3)$$

Em cada região  $r$  e em cada setor  $i$ , uma firma representativa escolhe o nível de produto  $y$ , a quantidade  $k$  dos  $f$  fatores primários e a quantidade  $x$  de insumos intermediários de outros setores ( $j$ ) para maximizar os lucros sujeito à sua restrição tecnológica. O problema da firma é dado por:

$$\max_{y_{ri}, x_{rji}, k_{rfi}} \pi_{ri} = p_{ri} y_{ri} - C_{ri}(p_{ri}, w_{rf}, y_{ri}) \text{ tal que } y_{ri} = \Phi_{ri}(x_{rji}, k_{rfi}) \quad (4)$$

onde  $\pi$  e  $C$  denotam as funções lucro e custo, respectivamente; e  $p$  e  $w$  são os preços dos bens e fatores, respectivamente.

No modelo EPPA assume-se que a produção é representada por tecnologias com elasticidade de substituição constante – *Constant Elasticity of Substitution* (CES) –, que apresentam retornos constantes de escala. O comportamento otimizador da firma implica a seguinte condição de equilíbrio:

$$p_{ri} = c_{ri}(p_{ri}, w_{rf}) \quad (5)$$

onde  $c$  é a função custo unitário.

Pelo Lema de Shephard, a demanda intermediária pelo bem  $j$  no setor  $i$  é:

$$x_{rji} = y_{ri} \frac{\partial c_{ri}}{\partial p_{rj}} \quad (6)$$

e a demanda pelo fator  $f$  é:

$$k_{rfi} = y_{ri} \frac{\partial c_{ri}}{\partial w_{rf}} \quad (7)$$

No que diz respeito ao comportamento das famílias, um agente representativo em cada região possui dotações de fatores de produção, cujos serviços podem ser

vendidos ou arrendados às firmas. Em cada período, o agente representativo escolhe os níveis de consumo e poupança que maximizam sua função de bem-estar sujeito à restrição orçamentária dada pelo nível de renda  $M$ :

$$\max_{d_{ri}, s_r} W_{ri}(d_{ri}, s_r) \text{ tal que } M_r = \sum_f w_{rf} K_{rf} = p_{rs} s_r + \sum_i p_{ri} d_{ri} \quad (8)$$

onde  $s$  é a poupança,  $d$  é a demanda final por mercadorias,  $K$  é a dotação agregada de fatores do agente representativo na região  $r$ .

Como a produção e as preferências são representadas por funções CES, pela dualidade e pela propriedade da homogeneidade linear, para cada região há uma função dispêndio unitária ou índice de preço do bem-estar dado por:

$$p_{rw} = E_r(p_{ri}, p_{rs}) \quad (9)$$

Pelo Lema de Shephard, a demanda final compensada por bens é dada por:

$$d_{ri} = \bar{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{rs}} \quad (10)$$

e para poupança é:

$$s_r = \bar{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{rs}} \quad (11)$$

onde  $\bar{m}_r$  é o nível inicial de gasto em cada região.

O sistema é fechado, com um conjunto de equações de equilíbrio de mercado que determina os preços de equilíbrio nos diferentes mercados de bens e fatores. Dessa forma, as equações de equilíbrio podem ser descritas da seguinte forma:<sup>3</sup>

$$y_{ri} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial p_{ri}} + \bar{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{ri}} \quad (12)$$

3. Suprimiu-se por simplicidade a demanda final das categorias investimento, governo e comércio exterior, uma vez que seguem a mesma formulação da demanda privada do agente representativo.



e

$$K_{rf} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial w_{rf}} \quad (13)$$

Ainda, um aspecto de grande importância na caracterização dos modelos de equilíbrio geral são as pressuposições a respeito da capacidade do modelo de captar a dinâmica da economia no tempo. Neste sentido, a evolução temporal do modelo EPPA está baseada em cenários de crescimento econômico resultantes do comportamento do consumo, da poupança, do investimento, bem como de pressuposições exógenas acerca do aumento da produtividade do trabalho, do uso de energia e da terra.

Como destacado anteriormente, o EPPA pertence à classe de modelos conhecidos como dinâmico-recursivos, cujas decisões econômicas de otimização são realizadas a cada período, considerando apenas preços e quantidades vigentes no mesmo (expectativas “míopes”). Os resultados do equilíbrio das variáveis gerado em um período são então utilizados como valores de referência para o processo de otimização no próximo período. Assim, em cada período o modelo possui um processo estático de solução, na medida em que os agentes não se preocupam com valores futuros esperados para as demais variáveis.

Outro aspecto importante do modelo está relacionado à sofisticação incorporada para representar o estoque de capital. Distingue-se capital maleável de não maleável, de forma a captar a dinâmica das economias no curto prazo quanto à dificuldade de se converter o capital de uma atividade em fator produtivo de uso alternativo. Apesar de ser geralmente ignorada nos modelos dinâmico-recursivos, essa representação da rigidez de curto prazo nas economias é um aspecto importante nesse tipo de modelagem, uma vez que a evolução da economia ano a ano não permite a flexibilidade de se converter máquinas, equipamentos e edifícios de uma atividade em outra em curtos espaços de tempo. A ausência dessa representação faz com que os modelos assumam completa flexibilidade em se converter qualquer investimento em capital físico para a produção de qualquer bem ou serviço no transcorrer de apenas um período do modelo.

Para representar a rigidez do estoque de capital, considera-se que a parcela maleável do estoque de capital em cada setor é descrita pelas funções CES. Isso significa que o capital pode substituir e ser substituído por outros insumos na função de produção. A parcela não maleável do capital é tratada por meio da função de Leontief, que não permite a substituição entre insumos. A parcela de capital não maleável e dos demais insumos na função de produção são definidas no momento em que tal capital é formado, refletindo a tecnologia utilizada no

momento de emprego daquele capital. Essa formulação permite ao modelo exibir respostas de curto e de longo prazo a partir de mudanças nos preços relativos. Ao longo do tempo, o capital não maleável gerado em um determinado período anterior sofrerá depreciação e será substituído por novas parcelas de capital não maleável que refletem as tecnologias em uso nos períodos mais recentes, oriundas das mudanças em preços relativos no tempo.

Além da acumulação de capital e das decisões de poupança e investimento, outros aspectos são importantes na representação dinâmico-recursiva, como o crescimento populacional e da força de trabalho. O crescimento da força de trabalho é definido exogenamente, sendo composto pelos efeitos separados do crescimento populacional e da produtividade do trabalho. O crescimento populacional está baseado na tendência de longo prazo dos dados das Nações Unidas (UN, 2000 e 2001). Já a produtividade do trabalho é especificada de forma a permitir a reprodução de níveis do PIB nas regiões do modelo conforme previsto pelo Fundo Monetário Internacional (IMF, 2000).

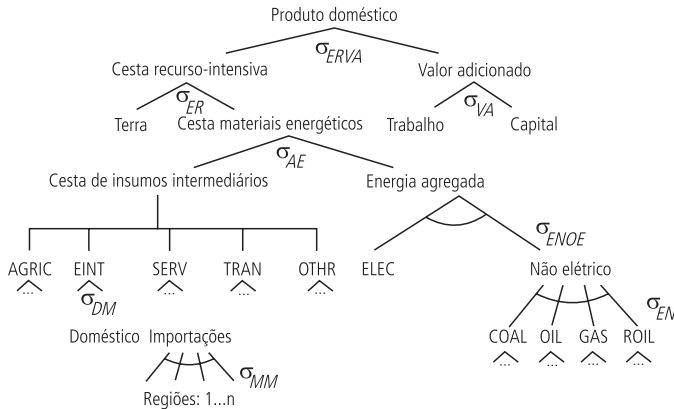
O modelo ainda considera o aumento exógeno na produtividade da terra de cerca de 1% ao ano (a.a.) e a redução no estoque de recursos naturais na medida em que estes são utilizados para a produção de energia. Outras formas de mudança tecnológica são representadas no modelo, quais sejam o aumento autônomo de eficiência energética, em acordo com a observação de que a utilização de energia por unidade do PIB entre os países tende a decrescer com o aumento dos níveis de atividade dos mesmos e a disponibilidades de tecnologias *backstop*, que representam fontes energéticas ainda não comercialmente disponíveis, ou utilizadas em pequena escala, mas que reconhecidamente possuem potencial de atuar como substitutas de fontes convencionais de energia no futuro.

Ainda, cabe ressaltar que a produção bem como o consumo são representados no modelo através de estruturas CES aninhadas. Tais estruturas permitem uma representação clara e sucinta das possibilidades tecnológicas dos setores produtivos e padrões de substituição. A figura 1, por exemplo, representa um dos diversos setores considerados pelo modelo, o setor agricultura. A árvore tecnológica deste setor inclui o fator terra como insumo e representa a possibilidade de substituição entre terra e uma cesta de materiais e insumos energéticos.

Uma sofisticação importante do modelo EPPA diz respeito à representação de mudanças no uso da terra. O uso da terra está dividido em cinco categorias: pastagens, culturas, silvicultura, florestas naturais e pastagens naturais. Cada categoria de terra é considerada um recurso renovável, que pode ser alterado pela sua conversão em outra categoria, ou abandonada em categoria não utilizada (vegetação secundária). A terra também está sujeita às melhorias exógenas de produtividade, estabelecidas em 1% a.a. para cada categoria, refletindo a tendência histórica de

avanço na produtividade agropecuária, bem como o rendimento histórico das safras, o qual tem apresentado um crescimento de 1% a 3% a.a., de acordo com Reilly e Fuglie (1998).

FIGURA 1

**Estrutura aninhada da agricultura**

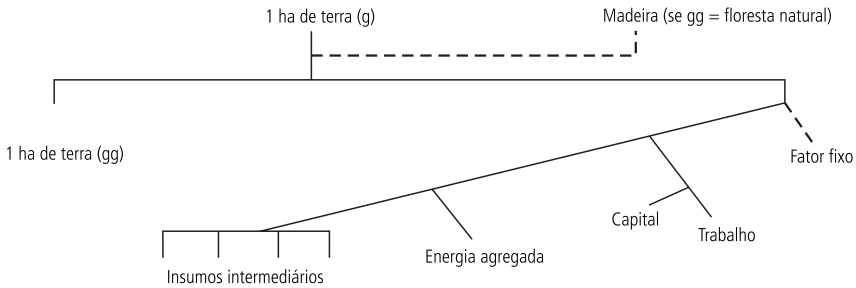
Fonte: Paltsev *et al.* (2005). Elaboração própria.

Com relação à transformação do uso da terra, a área sob determinada categoria pode ser expandida pela conversão de outras categorias de terras. Por exemplo, estradas e acessos para áreas de florestas podem ser criados, com isso, uma terra desmatada pode ser transformada em áreas destinadas à silvicultura, pastagens ou culturas. O sentido oposto também pode ser observado, ou seja, áreas destinadas às culturas podem ser abandonadas voltando a crescer florestas ou campos secundários.

A transformação do uso da terra é representada por equações de conversão de uma categoria de uso da terra em outra e de expansão da fronteira agrícola pela redução das áreas de vegetação natural. A figura 2 representa o funcionamento das relações de conversão de uso da terra. Nessas relações, um hectare de determinada categoria de terra pode ser convertido em um hectare de outra categoria. A terra convertida assume uma nova produtividade média de acordo com o tipo de terra que fora convertido e a região. Em equilíbrio, o custo da conversão marginal de um tipo de terra em outro deve ser igual à diferença entre o valor econômico dos dois tipos de terra. Esse procedimento permite manter a pressuposição de lucro econômico igual a zero nos modelos de equilíbrio geral, em que a atividade econômica só se torna viável se seus custos são compensados pela receita advinda da mesma. Além disso, exige-se que a conversão utilize insumos reais através de uma função de transformação da terra, como representada na figura 2.

FIGURA 2

## Estrutura das funções de conversão do uso da terra



Fonte: Gurgel, Reilly e Paltsev (2008).

A linha tracejada no topo indica uma função de elasticidade de produção de coeficiente fixo, multiproduto, a qual gera um produto florestal (madeira e produtos florestais) quando se converte áreas de florestas naturais, que atua como substituto perfeito da produção do setor florestal. Utiliza-se um fator de produção fixo para modelar a resposta observada da oferta de terra, em que a elasticidade de substituição entre o fator fixo e outros insumos são parametrizados para representar a resposta observada da oferta de terra em resposta a mudanças no preço da mesma nas últimas décadas.<sup>4</sup> O modelo assume que a resposta observada da conversão de terras nos últimos anos é uma representação da resposta de longo-prazo.<sup>5</sup>

O valor de uso da terra no modelo representa as transações monetárias reais, como inferido pelas agências de estatísticas econômicas de cada país, portanto, este valor deve ser consistente com os dados sobre receita, custos de insumos e retornos de outros fatores. A renda da terra para uso de culturas, pastagens e silvicultura é obtida a partir da base de dados do GTAP. Para obter o valor da renda por hectare, os dados acerca das rendas agregadas precisam ser divididos pela quantidade física de terra. Como as categorias florestas naturais e pastagens naturais não são

4. A elasticidade de oferta da terra varia de 0,05 (para países que têm observado crescimento líquido de áreas de vegetação natural) a 0,64 para a região ASI, sendo de 0,26 para o Brasil. A elasticidade de substituição entre o fator fixo e outros insumos varia de acordo com a parcela do fator fixo no total do valor da produção do setor de transformação do uso da terra. Foram utilizados dados de 1970 a 2000 de variações na área agropecuária em cada região do modelo.

5. Essa hipótese desconsidera a possibilidade de mudanças no comportamento dos agentes e da legislação dos países ao longo do tempo em direção a uma maior conservação e menor conversão de áreas naturais, ou mesmo na direção contrária. Contudo, a ausência de informações suficientes para definir a magnitude das elasticidades futuras sugere que o uso dos dados históricos para estimar tais elasticidades seja uma primeira aproximação razoável de representação do fenômeno. Os trabalhos de Gurgel, Reilly e Paltsev (2008) e Melillo *et al.* (2009) apresentam formas alternativas de considerar a mudança no uso da terra, e concluem que a representação das elasticidades da forma utilizada no presente estudo tende a gerar intensificação da pecuária e menor redução de áreas de vegetação natural diante da expansão do uso agrícola do solo.

utilizadas para produção econômica, pois não estão em uso corrente, é necessário um esforço para inferir um valor econômico para essas categorias. Os dados das áreas que não produzem fluxo de renda foram obtidos da base de dados de Hurtt *et al.* (2006). A partir deste conjunto de dados são obtidas as áreas de campos e savanas e florestas naturais, bem como outros tipos de cobertura do solo (tundra, terras alagadas, áreas urbanas e desertos), como discutido em Gurgel, Reilly e Paltsev (2008).

Quanto ao fechamento macroeconômico do modelo, a cada período considera-se que a oferta total de cada fator de produção é constante, os fatores são móveis entre setores dentro de uma mesma região, com exceção da parcela não maleável do capital, e não há movimento de fatores de uma região para outra. O fator terra é específico aos setores agropecuários enquanto recursos naturais são específicos aos setores que extraem os mesmos para produção de energia. Não há desemprego no modelo, portanto os preços dos fatores são flexíveis. Pelo lado da demanda, a propensão marginal a poupar é constante e específica a cada região de acordo com a sua parcela no total do consumo e poupança agregados na base de dados inicial. Os fluxos internacionais de capitais que compensam os desequilíbrios no comércio de bens e serviços no ano base do modelo são assumidos exógenos e declinantes com o tempo, reduzindo os déficits ou superávits nas transações correntes ao longo do horizonte do modelo. Dessa forma, mudanças na taxa real de câmbio devem ocorrer a cada período para acomodar alterações nos fluxos de exportações e importações. O consumo do governo pode alterar com mudanças nos preços dos bens, assim como a receita advinda dos impostos está sujeita a mudanças no nível de atividade e no consumo.

O modelo utiliza a sintaxe do algoritmo *Mathematical Programming System for General Equilibrium* (MPSGE) (RUTHERFORD, 1999). O MPSGE permite a representação de modelos complexos de equilíbrio geral em um formato tabular baseando-se em funções de utilidade e de produção CES aninhadas, o que torna a especificação do modelo mais compacta e menos sujeita a erros. Após a formulação do problema como um MCP, as informações são processadas no *Software General Algebraic Modeling System* (GAMS) (BROOKE *et al.*, 1998), o qual obtém a solução do problema de programação não linear (subconjunto dos problemas MCP).

## 2.2 Base de Dados

O modelo EPPA agrega o conjunto de dados econômicos do GTAP (DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002) em 16 regiões e diversos setores e fatores de produção, conforme apresenta a tabela 1. A representação setorial considera maiores desagregações além das fornecidas pelo conjunto de dados do GTAP, como por exemplo, para a oferta de tecnologias de energia e para o transporte, o que torna o modelo mais adequado ao estudo de políticas climáticas.

TABELA 1

**Regiões, setores e fatores produtivos no modelo EPPA**

Regiões	Setores	Fatores
Anexo B	Não energético	Capital
Estados Unidos (USA)	Culturas (CROP)	Trabalho
Canadá (CAN)	Pecuária (LIVE)	Áreas de culturas
União Europeia (EUR)	Silvicultura (FORS)	Pastagens
Japão (JPN)	Alimento (FOOD)	Áreas de silvicultura
Leste Europeu (ROE)	Serviços (SERV)	Florestas naturais
Austrália e Nova Zelândia (ANZ)	Intensivo em energia (EINT)	Pastagens naturais
Rússia (RUS)	Transportes (TRAN)	Petróleo cru
Não – Anexo B	Outras indústrias (OTHR)	Petróleo xisto
Brasil (BRA)	Energético	Carvão
Índia (IND)	Carvão (COAL)	Gás natural
África (AFR)	Petróleo cru convencional (OIL)	Hidráulica
China (CHN)	Petróleo refinado (ROIL)	Nuclear
Oriente Médio (MES)	Gás natural (GAS)	Eólica e solar
Resto da Ásia (REA)	Etanol (ETH)	
México (MEX)	Combustível líquido de biomassa (BOIL)	
Resto da América Latina (LAM)	Petróleo de xisto (SOIL)	
Leste Asiático (ASI) <sup>1</sup>	Elétric.: Fóssil (ELEC)	
	Elétric.: Hidráulica (H-ELE)	
	Elétric.: Nuclear (A-NUC)	
	Elétric.: Eólica (W-ELE)	
	Elétric.: Solar (S-ELE)	
	Elétric.: Biomassa (biELE)	
	Elétric.: NGCC	
	Elétric.: NGCC – CCS	
	Elétric.: IGCC – CCS	

Fonte: Paltsev *et al.* (2005). Elaboração própria.

Nota: <sup>1</sup> Coreia do Sul, Malásia, Filipinas, Cingapura, Taiwan, Tailândia e Indonésia.

Quanto aos dados sobre energia, estes estão em unidades físicas e foram baseados nos balanços da Agência Internacional de Energia – International Energy Agency (IEA, 2004, 2005) – e da Administração de Informação Energética norteamericana (EIA, 2004). Em decorrência da importância dessas informações para a realização do presente trabalho, os dados do GTAP para o Brasil foram comparados com bancos de dados nacionais, a partir de fontes como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e Ministério de Minas e Energia (MME), e corrigidos quando necessário. As estatísticas sobre as emissões de GEE foram obtidas a partir dos inventários mantidos pelo *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL)<sup>6</sup> (MARLAND; BONDEN; ANDRES, 2002) e pela base de dados EDGAR (OLIVIER; BERDOWSKI, 2001).

6. Os dados de emissões de GEE utilizados para as regiões consideradas pelo modelo têm como origem o inventário do ORNL, com exceção das emissões brasileiras, para as quais utilizaram-se dados do Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de GEE (Brasil, 2009).

### 3 POLÍTICAS, SIMULAÇÕES E RESULTADOS

#### 3.1 Cenários de políticas climáticas

No que se refere à redução das emissões de GEE, diversas alternativas têm sido discutidas nos debates internacionais, como a taxação de carbono, políticas *cap-and-trade*, o pleno funcionamento dos mercados de crédito de carbono, entre outros. Tais medidas podem ser eficientes no sentido de reduzir emissões e até mesmo favorecer a realocação de insumos por opções de baixo carbono e promover a inovação e o desenvolvimento de tecnologias não intensivas em carbono.

No presente trabalho optou-se por simular cortes em emissões de GEE na economia brasileira, através da imposição de restrições quantitativas setoriais (tabela 2). Os cortes visam a redução gradual nas emissões que seriam observadas em um cenário de referência livre de restrições, com início em 2015. Como nas discussões de políticas climáticas mundiais, os cortes iniciais seriam mais modestos e se intensificariam no decorrer do período analisado. O corte mais severo seria observado nas emissões provenientes do desmatamento, com redução inicial de 14% nas emissões do cenário de referência e aumentos graduais até atingir 100% de redução em 2050. Nos setores da agricultura, os cortes seriam inicialmente de 3%, aumentando gradualmente até atingir 24% de redução, enquanto os demais setores sofreriam cortes iniciais de 3,5% e se intensificariam até atingir 31% de redução em 2050. A escolha desses níveis de cortes em emissões, apesar de aleatória,<sup>7</sup> permite sinalizar os possíveis impactos da adoção de metas de redução de emissões aliadas ao esforço para zerar o desmatamento no Brasil.

Os cortes em emissões foram simulados em duas políticas diferentes, aqui chamadas de CP1 e CP2. A primeira (CP1) representa os cortes setoriais, conforme apresentado pela tabela 2, considerando o controle do desmatamento. Já a segunda política (CP2), faz o mesmo, porém, desconsidera as restrições sobre o desmatamento. Tais políticas foram escolhidas com o intuito de avaliar os possíveis impactos econômicos da transição para uma economia de baixa intensidade em emissões, considerando medidas setoriais com e sem o controle do desmatamento, uma vez que este último tem sido responsável por grande parte das emissões brasileiras.

---

7. A escolha dos níveis percentuais de redução dos GEE segue algumas impressões das discussões nacionais e internacionais sobre o assunto. Das discussões internacionais, considera-se a pressão para a redução do desmatamento e a proposta dos países do G8 para o período pós implementação do protocolo de Quioto em reduzir as emissões globais em 50% a.a. de 2050, alocando 70% de redução para os países desenvolvidos e 30% para os países em desenvolvimento, como discutido em Jacoby *et al.* (2008), o que justifica o nível de 31% de redução aplicado aos setores não agrícolas no presente estudo. Das discussões nacionais, considera-se o discurso do governo de zerar o desmatamento no longo prazo e os compromissos brasileiros assumidos na Conferência das Partes sobre o Clima (COP-15) em Copenhague no final de 2009 que atribuem um peso ligeiramente maior para as reduções de emissões no uso de energia do que nos setores agropecuários, motivo pelo qual consideram-se cortes ligeiramente menores nestes setores nos choques implementados.

TABELA 2

**Choques implementados de redução nas emissões de GEE em relação ao cenário de referência sem redução de emissões**

(Em %)

Setores	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Desmatamento	14,0	27,0	40,0	53,0	66,0	79,0	92,0	99,9
Culturas	3,0	6,1	9,2	12,2	15,3	18,3	21,4	24,4
Pecuária	3,0	6,1	9,2	12,2	15,3	18,3	21,4	24,4
Silvicultura	3,0	6,1	9,2	12,2	15,3	18,3	21,4	24,4
Indústria de alimentos	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Produção de carvão	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Petróleo	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Refino de petróleo	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Gás	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Eletricidade	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Setores intensivos em energia	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Outras indústrias	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Serviços	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8
Transportes	3,4	7,7	11,6	15,4	19,3	23,1	27,0	30,8

Fonte: Elaboração própria.

As políticas foram implementadas a partir do ano de 2015 com aumentos graduais nos cortes em emissões, até o ano de 2050, seguindo uma trajetória linear de queda das emissões no tempo. Os cortes em emissões foram implementados em relação a um cenário de referência sem controle de emissões, cobrem todos os GEE e consideram o controle não apenas das emissões relacionadas ao uso de combustíveis fósseis, mas também das emissões provenientes do nível de atividade dos setores (como as emissões da indústria de cimento, de aplicação de fertilizantes na agricultura, da fermentação entérica na pecuária e de dejetos e resíduos agrícolas e industriais).

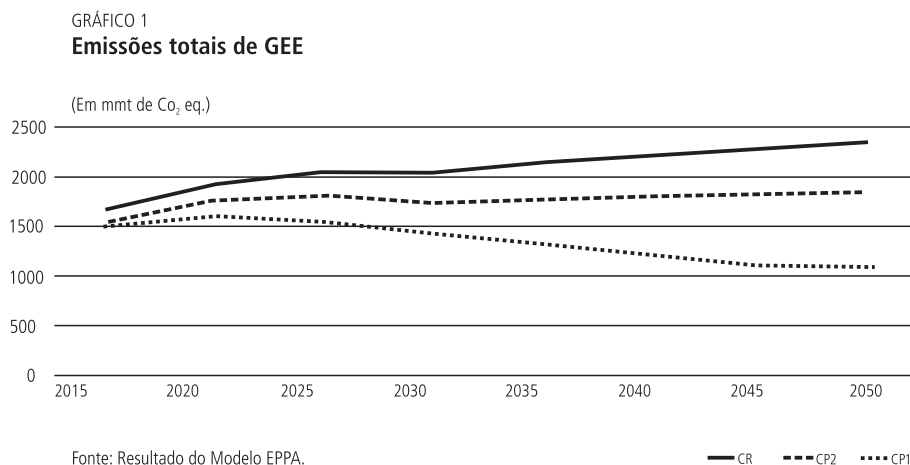
Cabe destacar que o modelo restringe as emissões através do fornecimento de créditos ou permissões de carbono aos agentes, gerando um preço-sombra para esses créditos que seria equivalente a uma alíquota de imposto às emissões de carbono suficiente para que se atinja a meta quantitativa de redução. Dessa forma, os cenários aqui simulados indicam qual seria a alíquota de imposto ao carbono, para cada setor, necessária para que os cortes de emissões sejam atingidos.

### 3.2 Resultados

A introdução de metas de redução de emissões a partir do ano de 2015 possibilitou uma mudança na trajetória das emissões brasileiras de GEE em relação ao cenário de referência (CR), principalmente quando se trata da política CPI1, a qual incorpora não apenas as metas de redução de emissões setoriais, mas também o controle do desmatamento. Essa política se mostrou mais eficaz em reduzir as emissões de



GEE em comparação à política CP2, que considera apenas as restrições setoriais de emissões e desconsidera reduções em emissões provenientes do desmatamento, conforme mostra o gráfico 1.<sup>8</sup>



Ao final do período considerado, a redução das emissões atingiu 50,89% e 53,73% em 2045 e 2050, respectivamente, de reduções em emissões agregadas em relação ao cenário de referência. Esse resultado revela que, se forem implementadas reduções graduais que atinjam até 30% das emissões setoriais do cenário de referência no ano de 2050, ao mesmo tempo em que há o controle do desmatamento, ao final desse período as emissões brasileiras podem ser reduzidas em um terço do que é esperado para 2015, em vez de seguirem a trajetória usual de crescimento.

A partir disso, torna-se importante verificar o quanto as restrições às emissões implementadas contribuem com o esforço global, através da participação do Brasil nas emissões mundiais. Os resultados do trabalho apontam que a introdução dos cortes em emissões, representados pelas políticas CP1 e CP2, seria eficaz em diminuir a participação brasileira nas emissões mundiais, conforme o gráfico 2.

A política CP1 apresenta as maiores reduções da participação brasileira nas emissões mundiais de GEE uma vez que restringe as emissões provenientes do desmatamento. Vale notar que o modelo EPPA prevê uma trajetória de redução da participação brasileira nas emissões mundiais em um cenário de referência sem

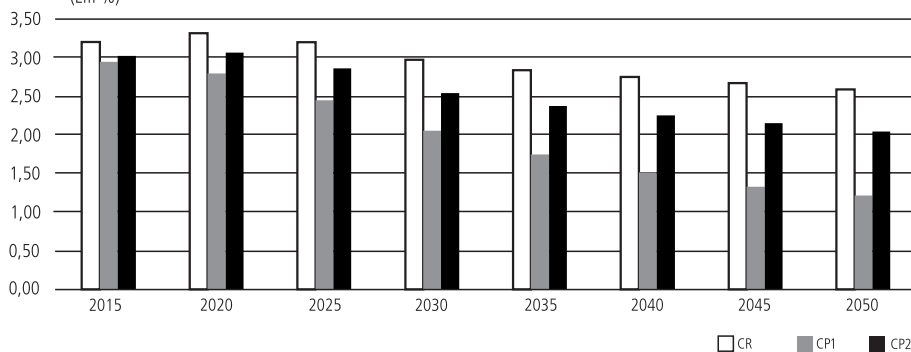
8. As emissões brasileiras em 2005, segundo o Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de GEE, foram estimadas em 2,2 bilhões de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>-e, dos quais 57% são provenientes de mudanças no uso da terra e florestas. O modelo EPPA estima para o mesmo ano emissões de 2,3 bilhões de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>-e, sendo 54% provenientes de mudanças no uso da terra e florestas. Contudo, o modelo projeta reduções no desmatamento até 2015, seguindo as tendências observadas entre 2005 e 2010, o que explica as emissões totais brasileiras menores em 2015 na tabela 10 do que as observadas em 2005. O EPPA prevê que as emissões provenientes do desmatamento reduzem em 29% em 2010 e em 58% em 2015, em relação ao observado em 2005.

políticas climáticas. Dois fatores contribuem para isso: a redução gradativa nas taxas de desmatamento conforme vem sendo observado na presente década e o aumento das emissões no resto do mundo, principalmente em economias emergentes, como a China e a Índia, que possuem matrizes energéticas mais intensivas em emissões e com tendência poluidora crescente.

GRÁFICO 2

**Participação do Brasil nas emissões mundiais de GEE**

(Em %)



Fonte: Resultado do Modelo EPPA.

A redução da participação brasileira nas emissões mundiais proporcionada pelos cenários simulados torna-se mais acentuada quando comparada ao cenário de referência. Em 2035, por exemplo, o Brasil responde por 2,84% das emissões mundiais no cenário de referência, porém, com a introdução da política CP1 esta participação cai para 1,75%. Já em 2050, a participação do país cai de 2,59%, no CR, para 1,21%, o que representa uma redução de 53,28%.

A aplicação de metas de redução em emissões de GEE por meio do EPPA permite estimar o preço do carbono (ou o nível de um imposto ao carbono) que seria necessário para que o corte em emissões fosse alcançado. Nesse sentido, com a introdução das políticas foi possível identificar um padrão de preços semelhante ao longo do horizonte de simulação. No período inicial os preços são pouco expressivos, uma vez que as metas são mais modestas, mantendo uma trajetória de crescimento até o último período da simulação devido ao aumento nas restrições às emissões ao longo do tempo (gráfico 3.A e 3.B).

Dentre os setores analisados, os de transportes, serviços, outras indústrias e setores intensivos em energia e culturas apresentaram os maiores valores de impostos às emissões, o que indica uma menor capacidade destes setores de utilizar fontes alternativas de energia. Como consequência, valores crescentes de impostos são necessários para induzir cortes em emissões de forma que as metas sejam atingidas. Os setores de serviços, transportes e intensivos em energia chegam a apresentar,

respectivamente, valores de impostos da ordem de US\$ 209, US\$151 e US\$ 142 por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente em 2050.

GRÁFICO 3.A  
**Imposto sobre o carbono com a política CP1**

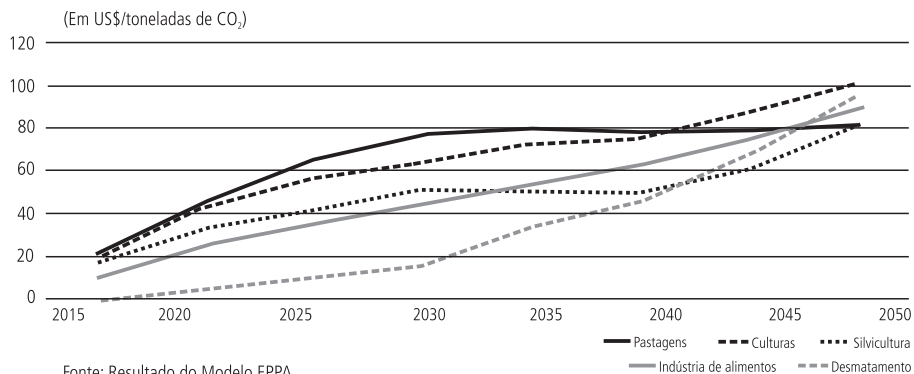
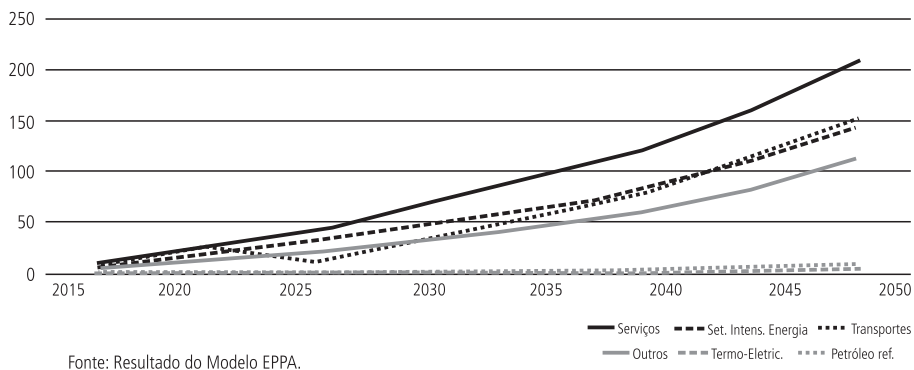


GRÁFICO 3.B  
**Imposto sobre o carbono com a política CP1**



Cabe ressaltar que culturas, pecuária, silvicultura e indústria de alimentos apresentaram um padrão muito semelhante na aplicação das duas políticas. A indústria de alimentos segue o desempenho de culturas e pecuária, pois se utiliza em larga escala de bens produzidos por estes como insumos intermediários em seu processo produtivo. Entre os setores não produtores de energia, o setor de silvicultura é o que requer menores valores de imposto para induzir as reduções de emissões esperadas. Isso se deve ao uso relativamente menor de energia e a quase ausência de emissões de outros GEE que não o CO<sub>2</sub> neste setor.

Outro aspecto importante está relacionado à capacidade dos setores de culturas e pecuária em manter os preços de créditos de carbono relativamente menores do que os dos demais setores, uma vez que a maior parte das emissões dos primeiros é

proveniente de GEE não relacionados ao uso de energia, como é o caso do metano na pecuária e do óxido nitroso na agricultura. Esses gases podem ser reduzidos através de melhores práticas de manejo, o que é captado no modelo através de elasticidades de substituição entre emissões e insumos.

Quanto ao imposto sobre as emissões provenientes do desmatamento, o qual só pode ser avaliado no âmbito da política CP1, os gráficos 3.A e 3.B permitem observar como o aumento na intensidade das reduções de emissões ao longo do tempo está relacionado ao aumento gradativo do valor do imposto às emissões. O imposto é relativamente baixo para os níveis iniciais de redução, apresentando os valores de US\$ 5, US\$ 11 e US\$ 16 por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente nos anos de 2020, 2025 e 2030, respectivamente. Porém, nos períodos finais do horizonte de simulação, verifica-se um aumento do custo para que as metas sejam atingidas, o que pode fazer com que o imposto atinja os valores de US\$ 68 e US\$95 nos anos de 2045 e 2050, respectivamente. Dessa forma, as emissões oriundas do desmatamento podem inicialmente ser reduzidas com o estabelecimento de um nível relativamente baixo de imposto sobre o carbono, valor abaixo dos US\$ 20 por tonelada de CO<sub>2</sub> até a metade do horizonte de simulação.

A análise das trajetórias de preços do carbono observadas para os diferentes setores da economia sugere que uma estratégia de maior eficiência econômica seria estabelecer uma única meta de redução para a economia como um todo, e permitir que os setores negociem créditos de carbono, o que faria surgir um único preço aos créditos de carbono na economia. Os setores que conseguem atingir as metas a menores custos são os mais eficientes em reduzir emissões, e seriam ofertantes potenciais de créditos de carbono. Já aqueles com menor flexibilidade em reduzir emissões poderiam adquirir tais créditos dos setores eficientes a preços mais baixos que os simulados no presente estudo, em que não existe a possibilidade de negociação de créditos de carbono entre os setores. Dessa forma, a política de metas diferenciadas de reduções em emissões setoriais, com imposto de carbono específico a cada setor, não é a melhor opção, ou a mais custo-efetiva.

Uma vez considerado o comportamento dos preços de carbono em nível setorial, pode-se avaliar como a produção dos setores foi afetada pelas políticas de redução de emissões. Foi possível verificar que nas simulações realizadas, a maior parte dos setores apresentou reduções percentuais de produção em relação ao cenário de referência, com destaque para os setores de refino de petróleo, gás, transportes e produção de carvão (tabela 3).<sup>9</sup>

---

9. Analisar-se-á aqui, por limitações de espaço, apenas a variação na produção no cenário CP1. Os resultados do cenário CP2 são similares em tendência e magnitude, com exceção dos resultados para o setor de silvicultura, que apresenta um aumento em produção bem mais modesto no cenário CP2, com ligeira queda na produção (-3%) no último ano de simulação do modelo.

TABELA 3

**Varição da produção com a introdução de CP1 em relação ao CR**  
(Em %)

Setores e consumo	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	-0,51	-1,21	-2,76	-5,09	-7,48	-10,10	-12,80	-15,55
Pecuária	-0,28	-0,67	-1,66	-3,51	-5,88	-8,69	-11,71	-14,81
Silvicultura	2,34	6,74	11,46	14,94	18,80	21,06	21,15	19,06
Indústria de alimentos	-0,20	-0,48	-1,24	-2,69	-4,55	-6,79	-9,24	-11,78
Produção de carvão	-2,56	-6,40	-8,38	-11,00	-12,72	-14,23	-15,79	-17,42
Petróleo	0,15	-1,82	-3,17	-3,25	-1,60	1,73	2,26	2,39
Refino de petróleo	-2,52	-4,60	-7,42	-9,48	-12,87	-18,04	-21,35	-24,48
Gás	-3,30	-7,85	-10,81	-15,18	-19,14	-22,34	-25,50	-28,48
Eletricidade	-0,26	-0,58	-0,94	-1,25	-1,75	-2,51	-3,37	-4,41
Setores intensivos em energia	-0,64	-1,35	-2,01	-2,55	-3,20	-3,96	-4,58	-5,16
Outras indústrias	0,11	0,28	0,38	0,63	0,82	1,03	1,34	1,67
Serviços	0,03	0,05	0,02	0,07	0,11	0,17	0,20	0,21
Transportes	-2,37	-5,20	-6,33	-8,89	-11,09	-13,33	-15,37	-17,21
Consumo das famílias	-0,02	-0,08	-0,15	-0,24	-0,32	-0,42	-0,59	-0,80

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Os setores de refino de petróleo, gás e produção de carvão têm em comum a característica de produzirem energia emissora de GEE. Como o consumo de energia fóssil fica mais caro com o imposto ao carbono, tais setores sofrem de forma mais intensa os impactos das políticas de redução de emissões, resultando em perdas que podem chegar a 24,48%, 28,48% e 17,42% em 2050, respectivamente. Essas quedas em produção implicam reduções em emissões do refino de petróleo e da produção de carvão em 30,82% e 30,80% no ano de 2050, respectivamente.<sup>10</sup>

Os setores de transportes e intensivos em energia também apresentaram reduções percentuais no valor da produção em relação ao cenário de referência. Deve-se destacar que estes setores têm seu comportamento atrelado ao desempenho do setor energético, o qual apresentou uma forte retração, principalmente quando se trata de fontes energéticas intensivas em carbono. Dessa forma, a redução da produção dos setores de transportes e intensivos em energia é consequência do aumento nos custos por conta da participação considerável de energia nos insumos intermediários. Esses resultados indicam uma perda de competitividade destes setores, ocasionada pela introdução das políticas simuladas, uma vez que apenas o Brasil está impondo restrições às emissões no cenário analisado.

Já os setores de culturas, pecuária e indústria de alimentos apresentam um padrão semelhante, de redução percentual da produção em relação ao cenário de

10. Tomando como exemplo o setor de refino de petróleo, um pequeno nível de imposto sobre as emissões deste setor, que incide diretamente sobre o conteúdo de carbono do seu principal insumo, o petróleo cru, permite atingir a meta de redução setorial em emissões. Como não há como substituir o petróleo cru como insumo, a meta setorial de redução em emissões é alcançada pela redução na produção.

referência. Cabe destacar que os dois primeiros representam a agricultura, segunda fonte que mais emite GEE no Brasil, perdendo apenas para as mudanças no uso da terra, enquanto o terceiro utiliza bens dos primeiros como insumos intermediários, o que explica a semelhança de comportamento. Esses setores sofrem maiores custos por terem que, principalmente, adquirir créditos de emissões de  $N_2O$  provenientes da aplicação de fertilizantes e  $CH_4$  da produção de arroz irrigado, no caso de culturas, pelas emissões de metano dos rebanhos, no caso da pecuária, e os consequentes aumentos em preços de matérias-primas agropecuárias, no caso do setor de alimentos. Contudo, observa-se que as quedas em produção nesses setores não são tão expressivas quanto as quedas na produção de energia fóssil, uma vez que existem possibilidades de reduzir emissões na agricultura através de manejo mais eficiente do ponto de vista ambiental, o que é captado pelas elasticidades do modelo EPPA.

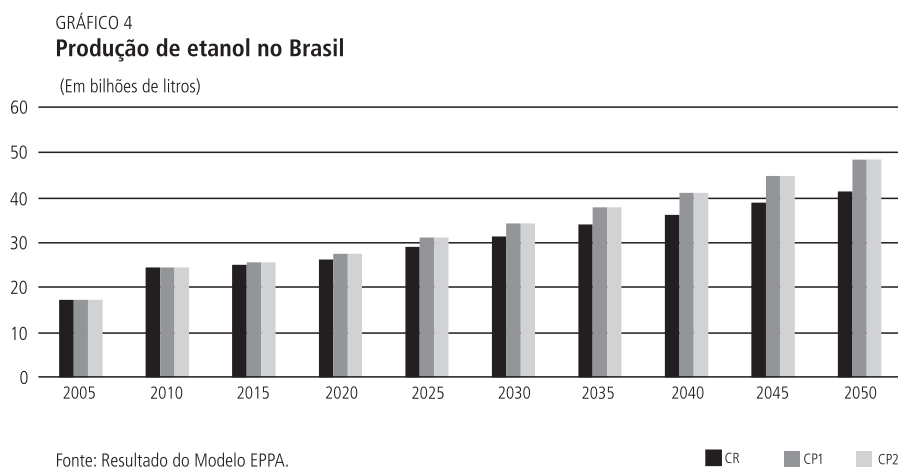
O consumo final das famílias e o setor de produção de energia elétrica também apresentaram variações negativas em relação ao cenário de referência. A produção de energia elétrica, por exemplo, pode ser reduzida em até 4,41% em 2050 com a introdução de CP1. O desempenho destes setores pode ser interpretado como uma consequência do efeito renda associado ao arrefecimento econômico ocasionado pelas políticas, o que pode ser corroborado pela redução dos preços e da demanda dos bens e serviços dos mesmos. Vale notar que, como uma parcela considerável da energia elétrica no Brasil é proveniente de fontes renováveis, com destaque para a energia hidroelétrica, a queda na produção desse setor não é tão expressiva quanto nos setores de energia fóssil.

Ainda, a introdução de políticas de redução de emissões permite que outros setores se tornem relativamente mais competitivos, apresentando aumento da produção, das exportações e redução das importações. Este é o caso da silvicultura, o setor de outras indústrias e o setor de serviços. Tais setores, para ambas as políticas, apresentaram ganhos percentuais na produção em relação ao cenário de referência, com destaque para o setor silvícola, o qual apresentou a maior variação percentual de produção, com ganhos da ordem de 21,15% e 19,06% nos anos de 2045 e 2050, respectivamente. Parte desse resultado se deve à realocação de fatores produtivos (terra, capital e trabalho) dos setores em queda e mais afetados pela política, para esses setores que experimentam menores impactos, seja pela menor dependência de energia derivada de combustíveis fósseis, seja pela menor dependência da demanda doméstica. Ainda a oferta de fatores produtivos desempregados dos demais setores tende a reduzir as remunerações desses fatores, o que diminui os custos de produção e favorece as exportações dos mesmos.

A produção de petróleo cru, por sua vez, apresenta um ligeiro aumento com a entrada em vigor das políticas. Esse resultado é reflexo de características particulares deste setor, que produz uma *commodity* de grande importância nos mercados

mundiais (bem homogêneo) e que tem sua demanda doméstica reduzida, já que o setor de refino do petróleo é atingido pela política de redução de emissões. Com excesso de oferta no Brasil, o preço do petróleo brasileiro fica relativamente mais barato, e o mercado mundial, que não possui restrições às emissões, absorve o excedente brasileiro.

Outro setor cuja produção precisa ser considerada pela sua importância para a economia brasileira é o de produção de etanol de cana-de-açúcar. Como esperado, a adoção de políticas de restrição de emissões incentivou a utilização de fontes alternativas de energia. No Brasil, a fonte alternativa de energia mais beneficiada pela introdução das políticas foi a produção de etanol, conforme o gráfico 4.



A intensificação da produção de etanol pode ser explicada pelas décadas de experiência adquirida na sua produção e utilização, desde o lançamento do Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool) em meados dos anos 1970. Como o Brasil é autossuficiente no abastecimento de petróleo desde 2006, a ampliação da produção de etanol está relacionada ao desenvolvimento e expansão dos automóveis *flex-fuel* no país, bem como à discussão internacional sobre a mudança do clima e às tentativas do aumento da produção de energias renováveis com consequente diminuição das emissões de GEE, como os obtidos com a introdução das políticas CP1 e CP2.<sup>11</sup>

11. Ressalta-se que o modelo não considera a possibilidade de crescimento das exportações de etanol, ou seja, adota-se como pressuposição que as restrições comerciais às exportações desse produto devem persistir nas próximas décadas. Ainda, o crescimento da produção de etanol no modelo acaba sendo limitado por dois aspectos importantes: o fato de uma parcela do etanol brasileiro ser consumido de forma complementar à gasolina (petróleo refinado) e o uso de uma elasticidade de substituição relativamente modesta, de 3, entre o etanol e a gasolina. A falta de estudos que estimem tal elasticidade levou à adoção de um valor relativamente baixo para a mesma, se considerarmos que esses combustíveis são substitutos perfeitos para a frota de automóveis *flex-fuel*.

O modelo EPPA permite analisar as variações de áreas por categoria de uso da terra, conforme apresentado pelas tabelas 4 e 5. Os resultados obtidos indicam um aumento considerável das áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar para produção de etanol, aumento este que pode chegar a 403 e 449 mil de hectares nos anos de 2045 e 2050, respectivamente. Mas não apenas a produção do etanol fora beneficiada pela introdução da política CP1. Outros setores, como o silvícola, e as áreas de pastagens e florestas naturais, receberam os benefícios desta política. Os aumentos em área de acordo com o cenário de referência podem chegar a 1.599, 8.709 e 17.675 mil hectares em 2050, respectivamente. Portanto, a introdução da política CP1 se mostrou eficaz na preservação de áreas nativas de florestas e pastagens naturais, bem como em incentivar o desenvolvimento de atividades relacionadas ao manejo sustentável como as implementadas pelo setor silvícola.

TABELA 4

**Varição em áreas (mil HA) com a introdução de CP1 em relação ao CR<sup>1</sup>**

Uso da terra	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	-402	-1.046	-2.395	-4.399	-6.743	-9.404	-13.001	-17.583
Pastagens	-465	-1.233	-2.232	-3.420	-3.992	-4.731	-7.460	-10.843
Silvicultura	562	1.172	2.154	3.455	3.758	3.904	2.881	1.599
Pastagens naturais	0	0	0	0	0	0	3.553	8.709
Floresta natural	256	999	2.310	4.165	6.716	9.892	13.626	17.675
Bioeletricidade	0	0	-3	-5	-16	-23	0	0
Cana-de-açúcar (etanol)	49	109	166	204	271	348	403	449
Eólica	0	0	0	0	6	13	-2	-4

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Nota: <sup>1</sup> Para os valores do cenário de referência, ver Apêndice C.

TABELA 5

**Varição em áreas (mil HA) com a introdução de CP2 em relação ao CR**

Uso da terra	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	-383	-951	-2.215	-4.131	-6.191	-8.546	-11.554	-15.327
Pastagens	-308	-476	-696	-1.015	-406	892	272	-1.440
Silvicultura	528	1.033	2.162	3.868	4.706	5.137	4.689	3.926
Pastagens naturais	0	0	0	0	0	0	3.553	9.371
Floresta natural	113	281	576	1.063	1.599	2.135	2.586	2.949
Bioeletricidade	0	1	-1	-1	-5	-3	0	0
Cana-de-açúcar (etanol)	50	112	174	215	294	381	455	522
Eólica	0	0	0	0	4	3	0	-1

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Ainda, as perdas de áreas de atividades relacionadas aos setores de culturas e pastagens, quando comparadas ao cenário de referência, podem ser explicadas pela perda de competitividade destes setores, o que indica redução da produção e exportações dos mesmos, bem como aumento de suas importações.



Já com a introdução da política CP2, as áreas destinadas às florestas naturais são menos preservadas em relação ao cenário de referência. A não consideração das metas para o desmatamento permite uma retração menor nas áreas agrícolas do que a observada no cenário CP1, uma vez que a única restrição à expansão da fronteira agrícola passa a ser o limite imposto às emissões das culturas e da pecuária.

Ainda, as áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar para etanol, silvicultura e pastagens naturais apresentaram expansões mais pronunciadas com a política CP2. O aumento de áreas para o cultivo de cana-de-açúcar está relacionado ao crescimento da produção de etanol, o qual surge como uma opção de combustível de baixa intensidade em emissões utilizado em larga escala pelo setor de transportes. Já o setor de silvicultura, que entre os setores agrícolas fora o menos afetado pela política, pôde tirar vantagem das perdas de produção e áreas apresentadas pelos setores de culturas e pecuária, aumentando sua produção e conseqüentemente sua área.

As pastagens naturais, por sua vez, exibem um comportamento distinto das demais áreas, pois apresentam perdas no cenário de referência devido à pressão da expansão contínua da fronteira agrícola sobre áreas de vegetação natural na ausência de metas de redução em emissões. Como esse setor sofre os impactos das políticas de carbono de forma mais intensa, ocorre menor expansão das áreas de cultura e pastagens sob esses cenários, possibilitando a preservação de mais áreas de pastagens naturais.<sup>12</sup> Deve-se ressaltar ainda que em CP2 as pastagens naturais são ligeiramente mais preservadas que em CP1, uma vez que as emissões de desmatamento não são consideradas naquele cenário, permitindo que áreas de florestas naturais supram a necessidade de expansão da área agrícola impulsionada pela expansão da cana-de-açúcar e da silvicultura, sem a necessidade de converter áreas de pastagens naturais para a agricultura.

A redução no desmatamento de florestas naturais com a política CP1, que em 2050 poderá representar a preservação de 17.675 mil hectares em relação ao CR, com a introdução de CP2 se reduzem para ganhos de apenas 2.949 mil hectares, também em 2050. Este quadro revela a importância do estabelecimento de políticas que levem em consideração o controle do desmatamento como forma efetiva de preservar áreas de florestas e campos naturais, e que estimulem o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, conforme expresso pela variação das áreas destinadas à cana-de-açúcar para produção de etanol, produção de energia eólica, entre outros.

---

12. Na verdade, as áreas de pastagens naturais não estão aumentando nos cenários de políticas, mas sim diminuindo no cenário de referência. Como essas áreas são mais preservadas nos cenários de políticas, estas apresentam mudança positiva em relação ao cenário de referência.

A introdução de metas setoriais de redução das emissões e controle do desmatamento, expressa pela política CP1 ou apenas o estabelecimento de metas setoriais como representado por CP2, gera quedas no nível agregado de atividade da economia, porém com diferenças pouco expressivas entre os dois cenários, conforme a tabela 6.

TABELA 6  
**PIB brasileiro em US\$ bilhões (de 2004) e variação em relação ao CR**

Anos	Em termos absolutos			Em termos percentuais	
	CR	CP1	CP2	CP1	CP2
2015	1.004	1.002	1.002	-0,12	-0,12
2020	1.152	1.148	1.148	-0,30	-0,30
2025	1.333	1.327	1.327	-0,47	-0,47
2030	1.539	1.529	1.529	-0,69	-0,69
2035	1.778	1.762	1.762	-0,92	-0,92
2040	2.045	2.021	2.021	-1,17	-1,17
2045	2.358	2.323	2.323	-1,49	-1,48
2050	2.720	2.669	2.670	-1,84	-1,82

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

A partir do primeiro ano da vigência das políticas até o último período analisado, o PIB brasileiro apresentou ligeiras reduções percentuais em relação ao cenário de referência, podendo atingir perdas da ordem de 1,49% e 1,84% nos anos de 2045 e 2050, respectivamente. Essas perdas podem ser explicadas, como destacado anteriormente, pela redução da produção e perda de competitividade de setores importantes para a economia como a agropecuária, bem como pela queda na renda das famílias.

Ainda, a maior parte das atividades relacionadas aos setores de combustíveis fósseis ou fontes energéticas intensivas em emissões apresentou perdas significativas com a introdução das políticas simuladas contribuindo com o desempenho apresentado pelo PIB brasileiro.

Foram calculadas também as perdas anuais do PIB acumuladas até 2050 em valor presente. Para isso, utilizaram-se três taxas de desconto distintas: 0,5%; 1% e 3% a.a. Deste modo, foi possível verificar que a introdução da política CP1 gera perdas de 0,81% a 1,99% do PIB de 2004, ao passo que as perdas com CP2 variam entre 0,81% e 1,98% em relação ao PIB do mesmo período. Assim, se os custos com a introdução da política CP1 até 2050 fossem antecipados para hoje, a uma taxa de desconto intertemporal de 1% a.a., por exemplo, as perdas em termos do PIB ficariam em US\$ 10,12 bilhões de 2004, o que representaria 1,65% do PIB

daquele ano. Com CP2, o montante seria de US\$ 10,06 bilhões, ou seja, 1,64% do PIB de 2004.

Dessa forma, o sacrifício a ser realizado pelo país para zerar o desmatamento até 2050, bem como reduzir as emissões setoriais no Brasil em até 30%, em termos de perdas no PIB não se revela expressivo, ou seja, a introdução de medidas de redução de emissões pouco altera a trajetória de crescimento da economia. Esse resultado é consequência das poucas perdas econômicas no caso de uma redução no desmatamento, ao contrário do que ocorre com o estabelecimento de metas setoriais, uma vez que existe um grande potencial de intensificação da pecuária e melhorias de produtividades na agricultura, bem como de uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis de energia, com potencial de expansão da produção de biocombustíveis.<sup>13</sup>

Cabe destacar que a adoção de uma política explícita de controle das emissões de mudanças no uso da terra, assumida aqui como uma cobrança de um imposto pelo carbono emitido com o desmatamento, praticamente não altera o resultado do PIB.

Ainda, conforme destacado anteriormente, os resultados obtidos mostram que a introdução de metas de redução de emissões poderá implicar redução dos níveis de bem-estar<sup>14</sup> econômico, em relação ao cenário de referência, como evidenciado pelo gráfico 5. A inclusão de metas de redução do desmatamento não altera os resultados, ou seja, o esforço no sentido de enquadramento com as metas de redução de emissões geram perdas em termos de bem-estar na ordem de 0,80% no final do horizonte de simulação.

Observa-se que a inclusão de metas de redução do desmatamento, como as representadas por CP1, trouxeram perdas modestas em bem-estar para o Brasil, ou seja, uma vez que as maiores perdas em termos de bem-estar podem atingir valores da ordem de 0,59% e 0,80% em 2045 e 2050, respectivamente, o que representa um custo relativamente pequeno ao país. Dessa forma, os resultados do modelo apontam que a adoção de metas de redução das emissões de GEE não deve implicar grandes perdas econômicas e sociais para o Brasil, em comparação à redução em emissões que se espera a partir dessas metas – cerca de 51% a 54% em relação ao

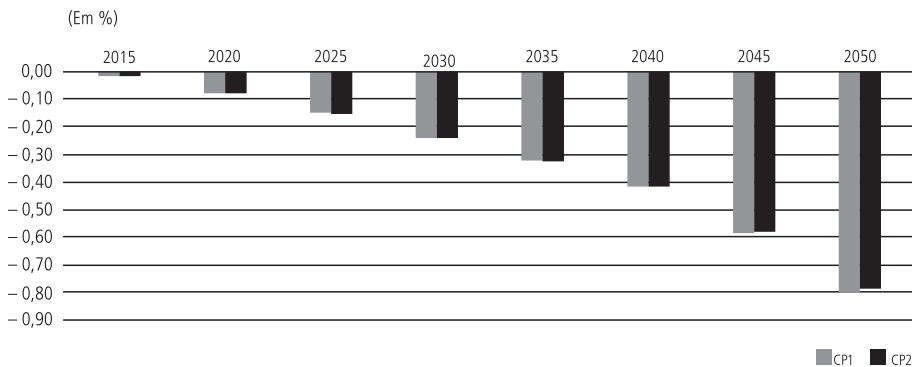
---

13. Deve-se destacar que o modelo não permite estimar os impactos regionais das políticas simuladas. Dessa forma, apesar do custo econômico das metas de reduções em emissões para o país ser modesto, é possível que os impactos regionais sejam bem mais expressivos para algumas regiões, como seria esperado, por exemplo, os efeitos da redução do desmatamento sobre os estados da região Norte.

14. O bem-estar econômico está expresso em termos de variação equivalente. Tal medida, em termos menos técnicos, procura indicar o aumento na utilidade dos consumidores domésticos, em termos de aumento do consumo. Mais formalmente, a variação equivalente hicksiana expressa a mudança na renda necessária para que se mantenha o mesmo nível de utilidade, aos preços de equilíbrio parcial, quando o consumidor enfrenta um novo conjunto de preços. Portanto, observam-se aumentos de bem-estar para valores positivos e redução de bem-estar para valores negativos.

cenário de referência. Este quadro pode ser explicado pelo desempenho de alguns setores, como o de energia renováveis, os quais ajudaram a compensar os resultados negativos apresentados por setores intensivos em combustíveis fósseis. Cabe ressaltar que outros fatores foram decisivos para que o impacto das políticas sobre o bem-estar fosse reduzido, como o barateamento dos preços de bens e serviços de setores para os quais a economia brasileira se mostrou mais competitiva com a introdução das políticas, como os setores de serviços, outras indústrias e silvícola.

GRÁFICO 5  
Variação do bem-estar em relação ao CR



Fonte: Resultado do Modelo EPPA.

As pequenas diferenças em mudanças no PIB e no bem-estar quando se compara os cenários CP1 e CP2 sugerem um importante resultado do modelo: o controle do desmatamento é a opção mais barata, ou mais custo-efetiva, para a redução em emissões de GEE no Brasil. Deve-se considerar que a política simulada, que estabelece um imposto ao carbono emitido pelo desmatamento, é uma política fictícia, de aplicação difícil ou mesmo impossível na prática. Dessa forma, os custos efetivos de implementação de medidas de controle e fiscalização do desmatamento são subestimados pelo modelo. Contudo, o resultado do modelo sugere que o sacrifício econômico de reduzir emissões de mudanças no uso da terra é baixo, uma vez que o país possui condições de aumentar sua produção agrícola pela recuperação e melhor utilização de áreas de pastagens e áreas já desmatadas.

Os resultados do Modelo EPPA podem ser comparados com os de outros estudos sobre o tema. A análise do nível de atividade econômica (PIB) aponta uma ligeira redução do dinamismo econômico do país pela aplicação de políticas climáticas, podendo atingir reduções de 1,49% e 1,84% nos anos de 2045 e 2050, relativamente a um cenário sem as políticas. Este desempenho da economia brasileira está atrelado à perda de competitividade de setores importantes para o país como a agricultura, transportes e intensivos em energia. Destarte, os resultados

obtidos corroboram as conclusões de diversos trabalhos como os de Tourinho, Da Motta e Alves (2003), Lopes (2003), Feijó e Porto Jr. (2009) e Moraes (2010). Este último, por exemplo, indica uma queda líquida de 0,28% do PIB real em relação a 2005 com a introdução de um de seus cenários, o que pode ser explicado pelos impactos das políticas consideradas sobre as culturas agrícolas de diversas regiões do país como Nordeste e Centro-Oeste.

Já o estudo *Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades* (MARGULIS; DUBEAUX, 2010) indica que as maiores reduções de emissões de GEE são provenientes de setores que apresentam as maiores quedas do nível de atividade como os de derivados do uso de carvão, GLP, petróleo e gasolina (setores intensivos em emissões), ao passo que setores de alimentos, pecuária e serviços foram relativamente beneficiados com a imposição de uma taxa sobre o carbono. Estes resultados não estão em consonância com os obtidos pelo presente trabalho, o qual observa a perda de dinamismo do agronegócio, pois os setores de culturas, alimentos e pecuária não foram beneficiados pelas políticas introduzidas, pelo contrário, apresentaram perda de competitividade e até mesmo de áreas, como expresso pela variação das áreas de pastagens. A diferença nos resultados pode estar relacionada a não consideração de reduções em emissões provenientes do desmatamento no primeiro trabalho, o que indiretamente limitaria a expansão da agropecuária.

A ocupação das terras foi aqui representada de acordo com as atividades desenvolvidas, o que permitiu observar que a introdução das políticas favoreceu a preservação de extensas áreas de florestas e pastagens naturais. Além disso, constatou-se um aumento considerável de áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar para etanol, o que é corroborado pelo crescimento expressivo da produção de etanol. Este resultado está em conformidade com as avaliações do estudo *Economia da Mudança do Clima no Brasil: custos e oportunidades*, de Margulis e Dubeaux (2010), o qual estima um crescimento da área de cana no Brasil em aproximadamente 19 milhões de hectares no cenário A2-BR e de 17,8 milhões de hectares em B2-BR, partindo dos 4,2 milhões de hectares.

Ainda, os resultados obtidos com a implementação do Modelo EPPA indicam aumento dos preços de gêneros alimentícios (não apresentados aqui), da mesma forma que os trabalhos de Ferreira Filho e Rocha (2007) e Moraes (2010). Os aumentos de preços de produtos da indústria de alimentos e do setor de culturas, verificados por meio do EPPA, podem chegar a 8,66% e 7,44% em 2050, respectivamente, tendo um impacto direto sobre o orçamento dos consumidores.

Portanto, de forma geral, os resultados obtidos com a simulação das metas de redução das emissões de GEE para o Brasil corroboram os resultados dos demais trabalhos avaliados, pois indicam: ligeira redução do nível de atividade e do bem-estar econômico, ganhos de competitividade de setores intensivos em fontes renováveis

de energia, bem como a perda de competitividade de atividades intensivas em combustíveis fósseis, o que evidencia uma realocação de fatores na economia. Ainda, os resultados mostraram que o país pode reduzir suas emissões de GEE de forma mais expressiva com o estabelecimento de políticas que levem em consideração o controle do desmatamento, o que não implicará maiores custos. Em relação aos estudos acima citados, o presente estudo avança na análise por ser capaz de considerar restrições às emissões provenientes do desmatamento e de outros GEE que impactam a agricultura, bem como representar as mudanças no uso da terra ao longo do tempo.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho analisa os impactos econômicos de cenários de políticas climáticas para o Brasil. Mais especificamente, utiliza um modelo aplicado de equilíbrio geral, incorporando as especificidades da economia brasileira, para verificar como algumas variáveis econômicas respondem à simulação de algumas políticas de mitigação de mudanças climáticas por parte do Brasil.

Os principais resultados mostraram que os custos de controlar as emissões de GEE no país são relativamente modestos diante do potencial de redução de emissões, devido, em parte, à disponibilidade de fontes de energia renovável no país como o etanol de cana-de-açúcar. Tais custos poderiam ser ainda menores, caso fosse definida uma única meta de redução para a economia como um todo e os setores pudessem comercializar permissões de emissões entre si, uma vez que os setores emitem em diferentes intensidades. Ainda, os resultados indicam que o controle das emissões provenientes do desmatamento é a opção mais barata para reduzir emissões, bem como é fundamental para atingir uma redução considerável em emissões, sendo que expressivos cortes em emissões poderiam ser atingidos com um imposto relativamente baixo sobre o desmatamento, valor inferior a US\$ 20 por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente até a metade do horizonte de simulação. Considerando o potencial de redução nas emissões de desmatamento e de produção de combustíveis renováveis, ao mesmo tempo em que o país possui um grande potencial na produção de petróleo com a exploração do pré-sal, é preciso considerar o possível conflito entre a manutenção de uma matriz energética limpa e a possibilidade de ser um grande fornecedor mundial de combustível fóssil. Ainda, torna-se necessário uma definição e um discurso mais afinado entre os diferentes setores do governo e da sociedade quanto à melhor estratégia de desenvolvimento para o país.

Estes resultados não são conclusivos. Extensões do presente trabalho devem considerar a simulação de uma meta única de redução para a economia brasileira como um todo através de um mercado de créditos de emissões, bem como a consideração de questões relativas às políticas climáticas que estão em andamento na União Europeia, nos Estados Unidos e nos países em desenvolvimento. Ainda, o comércio de emissões pode ser incorporado, seja pela via do mecanismo de Redução

de Emissões do Desmatamento e da Degradação (REDD) ou do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), e tais questões são de grande relevância quando se pretende considerar os esforços de mitigação das mudanças climáticas.

## ABSTRACT

This paper aims to estimate the economic impacts of climate policy scenarios in Brazil. We use a dynamic-recursive general equilibrium model of the world economy. The main results indicate that the increasing sectorial reduction in emissions from 3% to 30% from 2015 to 2050 produces a cumulative loss between 1% and 2% in terms of the GDP observed in 2004. Although emissions in 2050 drop by 54% in comparison with a reference scenario, the welfare loss is only about 0.8% and does not increase if deforestation reduction goals are considered. We conclude that the policies generate small negative impacts due to the availability of clean energy sources in the Brazilian energy system.

Keywords: Greenhouse gases, climate policies, general equilibrium, Brazilian economy.

## REFERÊNCIAS

- BABIKER, M.; REILLY, J.; JACOBY, H. The Kyoto Protocol and developing countries. **Energy Policy**, v. 28, p. 525-536, 2000.
- \_\_\_\_\_. *et al.* **The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: revisions, sensitivities, and comparisons of results.** Cambridge, MA: MIT, 2001 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 71).
- BERNARD, A. *et al.* **Russia's role in the Kyoto Protocol.** Cambridge, MA: MIT, 2003 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 98).
- BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa.** 2009.
- BROOKE, A. *et al.* **GAMS: a user's guide.** GAMS Development Corporation, 1998. p. 262.
- DIMARANAN, B.; MCDOUGALL, R. **Global trade, assistance, and production: the GTAP5 data base.** West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, 2002.
- DINIZ, E. M. Lessons from the Kyoto Protocol. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, n. 1, p. 27-38, 2007.
- MARGULIS, S.; DUBAUX, C. (Ed.). **Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades.** São Paulo: IBEP, p. 82, 2010. Disponível em: <<http://www.economiadoclima.org.br>> Acessado em: 12 fev. 2010.
- EMBRAPA. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil.** São Paulo, 2008.
- EIA. Energy Information Administration. Department of Energy. **Annual Energy Review, 2003/** Washington, DC, 2004.
- FEIJÓ, F. T.; PÔRTO JÚNIOR, S. S. Protocolo de Quioto e o bem-estar econômico no Brasil: uma análise utilizando equilíbrio geral computável. **Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 51, p. 127-154, 2009.
- FERREIRA FILHO, J. B. S.; ROCHA, M. T. Avaliação econômica de políticas públicas visando redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 45. 2007. **Anais ...** Londrina: Sober, 2007. p. 1-27.

GUILHOTO, J. J.; LOPES, R.; SEROA DA MOTTA, R. **Impactos ambientais e regionais de cenários de crescimento da economia brasileira, 2002-12**. Rio de Janeiro: Ipea, 2002 (Texto para Discussão, n. 892).

GURGEL, A. C.; REILLY, J. M.; PALTSEV, S. Potential land use implications of a global biofuels industry. **Journal of Agricultural & Food Industrial Organization**, v. 6, Article 9, 2008.

HILGEMBERG, E. M. **Quantificação e efeitos econômicos do controle de emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do uso de gás natural, álcool e derivados de petróleo no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto**. 151 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

HURTT, G. C. *et al.* The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. **Global Change Biology**, v. 12, p. 1.208-1.229, 2006.

IEA. International Energy Agency. **World energy outlook: 2004**. Paris: OECD/IEA, 2004.

\_\_\_\_\_. **Energy balances of non-OECD countries**. Paris: OECD/IEA, 2005.

IMF. International Monetary Fund. **World Economic Outlook** (September), Washington, DC: International Monetary Fund, 2000.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007a. 851 p. Disponível em: <<http://www.ipcc-wg3.de/publications/assessment-reports/ar4/working-group-iii-fourth-assessment-report>> Acessado em: 12 out. 2009.

\_\_\_\_\_. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b. 976 p. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm)> Acessado em: 12 out. 2009.

JACOBY, H. D. *et al.* **Sharing the burden of GHG reductions**. Cambridge, MA: MIT, 2008 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 167) Disponível em: <[http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJSPGC\\_Rpt167.pdf](http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJSPGC_Rpt167.pdf)> Acessado em: 13 set. 2009.

KYNDLAND, F. E.; PRESCOTT, E. C. The computational experiment: an econometric tool. **Journal of Economic Perspectives**, v.10, n. 1, p. 69-85, 1996.

LOPES, R. L. **Efeitos de uma restrição na emissão de CO na economia brasileira**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. 170 p.

MARLAND, G.; BONDEN, T. A.; ANDRES, R. J. Global, regional and national CO<sub>2</sub> emissions. In: **Trends: a compendium of data on global change**. Oak Ridge, Tenn.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2002.

MATHIESEN, L. **Computation of economic equilibrium by a sequence of linear-complementarity problems**. Amsterdam, 1985 (Mathematical Programming Study, n. 23).

MELILLO, J. M. *et al.* Indirect emissions from biofuels: how important? **Science**, Washington, v. 326, p. 1.397-1.399, 2009.

MORAES, G. I. **Efeitos econômicos de cenários de mudança climática na agricultura brasileira: um exercício a partir de um modelo de equilíbrio geral computável**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. 103 p.

NORDHAUS, W. **The challenge of global warming: economic models and environmental policy in the DICE-2007 model**. Manuscript, May 2007.



OLIVIER, J. G. J.; BERDOWSKI, J. J. M. Global emission sources and sinks. In: BERDOWSKI, J.; GUICHERIT, R.; HEIJ, B. J. (Ed.). **The climate system**. Lisse: Swets and Zeitlinger Publishers, 2001. p. 33-78.

PALTSEV, S. *et al.* **The cost of Kyoto Protocol targets: the case of Japan**. Cambridge, MA: MIT, 2004. (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 112).

\_\_\_\_\_. **The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4**. Cambridge, MA: MIT, 2005 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 125) Disponível em: <[http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication\\_id=697](http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=697)> Acessado em: 12 de set. de 2009.

\_\_\_\_\_. **The cost of climate policy in the United States**. Cambridge, MA: MIT, 2009. (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 173). Disponível em: <[http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC\\_Rpt173.pdf](http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt173.pdf)> Acessado em: 15 set. 2009.

REILLY, J.; FUGLIE, K. Future yield growth in field crops: what evidence exists? **Soil and Tillage Research**, v. 47, p. 275-290, 1998.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, jan. 2003. 196 p.

RUTHERFORD, T. F. Extensions of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 19, n. 8, p. 1.299-1.324, 1995.

\_\_\_\_\_. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. **Computational Economics**, v. 14, n. 1, p. 1-46, 1999.

\_\_\_\_\_. **Lecture notes on constant elasticity functions**. University of Colorado, Nov. 2002. Disponível em: <<http://www.gamsworld.org/mpsge/debreu/ces.pdf>>

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. L. Applied general equilibrium models of taxation and international trade: an introduction and survey. **Journal of Economic Literature**, v. 22, p. 1.007-1.051, 1984.

TOURINHO, O. A. F.; DA MOTTA, R. S.; ALVES, Y. L. B. **Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral**. Rio de Janeiro: Ipea, 2003 (Texto para Discussão, n. 976). Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/pub/td/2003/td\\_0976.pdf](http://www.ipea.gov.br/pub/td/2003/td_0976.pdf)> Acessado em: 10 out. 2009.

UN. United Nations. **Long-run world population projections: based on the 1998 revision**. New York, 2000.

\_\_\_\_\_. **World population prospects: the 2000 revision, Data in digital form**. New York: Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 2001.

VIGUIER, L.; BABIKER, M.; REILLY, J. The costs of the Kyoto Protocol in the European Union. **Energy Policy**, v. 31, n. 5, p. 393-483, 2003.

WING, I. S. **Computable general equilibrium models and their use in economy-wide policy analysis**. Cambridge, MA: MIT, 2004 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2004. Technical Note, n. 6).

(Original submetido em fevereiro de 2011. Última versão recebida em fevereiro de 2012. Aprovado em fevereiro de 2012.)

## APÊNDICE A

### FORMULAÇÃO ALGÉBRICA DO MODELO

O modelo EPPA foi construído a partir do subprograma MPSGE (RUTHERFORD, 1999), que é uma linguagem de programação desenvolvida no início dos anos 1980 para solucionar modelos econômicos de equilíbrio ao estilo Arrow-Debreu. O MPSGE usa como interface a linguagem de programação do GAMS e foi desenvolvido para criar modelos computáveis de equilíbrio geral de forma simples e com menores chances de erro de programação, aumentando a produtividade do pesquisador. Isso é possível uma vez que o MPSGE cria automaticamente a formulação matemática do modelo na forma de um MCP, uma vez escolhidas as formas funcionais desejadas para as funções de produção, de transformação e de utilidade, as possibilidades de substituição entre bens e insumos e os dados iniciais de fluxos econômicos da matriz de contabilidade social em equilíbrio. O MPSGE utiliza essas informações para construir algebricamente as funções de custo e demanda relacionadas e ainda confere automaticamente todas as condições de equilíbrio dos mercados e de lucro zero.

A formulação do MCP pelo MPSGE considera que três desigualdades devem ser satisfeitas: condição de lucro zero (ou custo unitário igual ao preço do bem), condição de equilíbrio nos mercados (oferta igual à demanda) e condição de balanço da renda (despesas iguais às receitas). Um conjunto de três variáveis não negativas deve ser determinado na solução de um problema em MCP: preços, quantidades (níveis de atividades em MPSGE) e níveis de renda. Pretende-se aqui exemplificar algumas das equações construídas pelo MPSGE para o modelo EPPA. Contudo, não serão apresentadas todas as equações do modelo, uma vez que a seção de metodologia apresenta as informações necessárias para o entendimento das tecnologias e possibilidades de substituição na produção e consumo. A mecânica de construção das equações pelo MPSGE pode ser entendida a partir de alguns poucos exemplos e a grande variedade de formas funcionais diferentes e com muitas ramificações adotadas pelo EPPA (setores produtivos, consumo, tecnologias *backstop*, mudança no uso da terra) requer um espaço excessivo para a descrição matemática das mesmas.<sup>15</sup>

Os quadros A.1, A.2 e A.3 apresentam os conjuntos, as variáveis e os parâmetros necessários para entender algumas das equações do modelo.

---

15. Para o leitor interessado, Paltsev *et al.* (2005) apresenta a descrição detalhada do modelo. Vale ressaltar que o modelo EPPA não é ainda um modelo *open source*, ou seja, seu código e dados não estão disponíveis a pesquisadores interessados em replicar os resultados do modelo. A instituição responsável pela construção e desenvolvimento do modelo, o *MIT Joint Program on the Science and Policy of Climate Change*, pretende permitir o livre acesso em breve a uma versão do código do modelo aos pesquisadores interessados, através do site da web: <<http://globalchange.mit.edu/>>.

QUADRO A.1

**Conjuntos**


---

$k, i, j$	Setores e bens
$r, s$	Regiões
$ELE$	Setor de eletricidade (subsetor de $k$ )
$ENOE$	Setores de energia não elétricos: carvão, gás natural, petróleo e petróleo refinado (subsetores de $k$ )

---

Fonte: Elaboração própria.

QUADRO A.2

**Setores de atividades e níveis de preços (variáveis endógenas)**


---

$Y_{rk}$	Produção do setor $k$ na região $r$
$N_{rk}$	Insumo energético agregado na região utilizado no setor $k$ na região $r$
$M_{rk}$	Importações agregadas do setor $k$ na região $r$
$A_{rk}$	Agregação Armington de bens domésticos e importados no setor $k$ na região $r$
$\pi_{rk}^Y$	Preço de produção do bem $k$ produzido na região $r$
$\pi_{rk}^A$	Preço do bem agregado $k$ de Armington na região $r$
$\pi_{rk}^N$	Preço do agregado energético na região $r$ e setor $k$
$\pi_{rk}^M$	Preço das importações agregadas do bem $k$ importados pela região $r$
$\pi^T$	Preço do transporte internacional
$W_r$	Salário na região $r$
$r_r$	Preço dos serviços de capital na região $r$
$\pi_{rk}^E$	Preço das permissões de GEE no setor $k$ na região $r$

---

Fonte: Elaboração própria.

QUADRO A.3

**Parâmetros iniciais de parcelas de custos, dotações de fatores e coeficientes técnicos**


---

$\theta_{jk}$	Parcela de custos do bem intermediário $j$ nos custos totais do setor $k$ na região $r$
$\theta_{rk}^{KLE}$	Parcela de custos da cesta $KLE$ nos custos totais do setor $k$ na região $r$
$\theta_{rk}^N$	Parcela do custo com energia na cesta $KLE$ do setor $k$ na região $r$
$\alpha_{rk}$	Parcela de custo com mão de obra no total do valor adicionado do setor $k$ na região $r$
$\theta_{rk}^{ELE}$	Parcela de custo da eletricidade na demanda de energia pelo setor $k$ na região $r$
$\theta_{rk}^{ENOE}$	Parcela de custo do insumo $j \in ENOE$ na demanda por energia não elétrica do setor $k$ na região $r$
$\theta_{rk}^D$	Parcela de custo do bem doméstico $k$ no total do Agregado de Armington na região $r$
$\theta_{srk}^M$	Parcela de custo das importações do bem $k$ provenientes da região $s$ no total das importações da região $r$
$\varepsilon_{rk}^j$	Coefficiente de emissões de carbono pelo combustível fóssil $j \in ENOE$ no setor $k$ na região $r$
$\mu_{rsk}$	Coefficiente de custo unitário de transporte internacional do bem $k$ da região $s$ para a região $r$

---

Fonte: Elaboração própria.

A condição de lucro zero determina os níveis de atividades dos setores, enquanto a condição de equilíbrio dos mercados determina os preços. Na notação algébrica a seguir, o símbolo  $\Pi_{rk}^u$  denota a função de lucro na região  $r$  e setor  $k$  para a atividade de produção  $u$ .

Dessa forma, a condição de lucro zero na produção dos setores de serviços, transportes, bens intensivos em energia e outras indústrias pode ser representada por:

$$\begin{aligned} \Pi_{rk}^Y = \pi_{rk}^Y - \sum_j \theta_{rjk} \pi_{rj}^A - \theta_{rk}^{KLE} \left[ \theta_{rk}^N (\pi_{rk}^N)^{1-\sigma_{EVA}} + \right. \\ \left. + (1 - \theta_{rk}^N) (\omega_r^{\alpha_{rk}} r_r^{1-\alpha_{rk}})^{1-\sigma_{EVA}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{EVA}}} = 0 \end{aligned} \quad (A.1)$$

Já a condição de lucro zero para a produção do agregado energético utilizado como insumo nos demais setores da economia (correspondente à ramificação da “energia agregada” da árvore tecnológica da figura 1) pode ser representada por:

$$\begin{aligned} \Pi_{rk}^N = \pi_{rk}^N - \left[ \theta_{rk}^{ELE} (\pi_{ELE,i}^A)^{1-\sigma_{ENOE}} + \right. \\ \left. + (1 - \theta_{rk}^{ELE}) \left( \sum_{j \in ENOE} \theta_{rjk}^{ENOE} (\pi_{rj}^A + \pi_{rk}^E \varepsilon_{rk}^j)^{1-\sigma_{EN}} \right)^{\frac{1-\sigma_{ENOE}}{1-\sigma_{EN}}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{ENOE}}} = 0 \end{aligned} \quad (A.2)$$

A condição de lucro zero para o agregado Armington de bens domésticos e importados pode ser representada por:

$$\Pi_{rk}^A = \pi_{rk}^A - \left[ \theta_{rk}^D (\pi_{rk}^Y)^{1-\sigma_{DM}} + (1 - \theta_{rk}^D) (\pi_{rk}^M)^{1-\sigma_{DM}} \right]^{1/(1-\sigma_{DM})} = 0 \quad (A.3)$$

A condição de lucro zero para o agregado Armington de importações de diferentes regiões é dada por:

$$\Pi_{rk}^M = \pi_{rk}^M - \left( \sum_s \theta_{srk}^M (\pi_{sk}^Y + \mu_{srk} \pi^T)^{1-\sigma_{MM}} \right)^{1/(1-\sigma_{MM})} = 0 \quad (A.4)$$

As equações de lucro zero representadas acima denotam as estruturas tecnológicas de cada setor e atividade da economia. A construção dessas equações utiliza as funções de custo unitário e as funções de demanda na sua forma calibra-

da pela proporção (*calibrated share form*), como descrito em Rutherford (2002). As condições de lucro zero para as demais atividades representadas no modelo EPPA, descritas na seção 2, seguem o mesmo padrão das apresentadas acima, ou seja, consideram que o preço unitário de cada atividade deve ser igual aos custos dos insumos e fatores para produção da mesma, considerando as possibilidades de substituição descritas na metodologia.

A diferenciação da função de lucro em relação aos preços dos insumos e produtos gera as demandas compensadas e de oferta (Lema de Shepard), que serão utilizadas nas condições de equilíbrio de mercado. As condições de equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados podem ser ilustradas pelas equações a seguir, que representam o equilíbrio para os mercados de fatores trabalho e capital, de produção setorial de bens, de demanda setorial de energia e da oferta de importados, respectivamente.

$$w_r^L = \sum_k Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial w_r} \quad (\text{A.5})$$

$$w_r^K = \sum_k Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial r_r} \quad (\text{A.6})$$

$$Y_{rk} = A_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^A}{\partial \pi_{rk}^Y} + \sum_{s \neq r} M_{sk} \frac{\partial \Pi_{sk}^M}{\partial \pi_{rk}^Y} \quad (\text{A.7})$$

$$N_{rk} = Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial \pi_{rk}^N} \quad (\text{A.8})$$

$$M_{rk} = A_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^A}{\partial \pi_{rk}^M} \quad (\text{A.9})$$

É importante notar que a condição de lucro zero para a produção do agregado energético explicita como as políticas de restrições de emissões são introduzidas no modelo. Tal equação mostra uma combinação fixa (Leontief) entre o preço do insumo energético de origem fóssil ( $\pi_{rj}^A$ ) e o preço das permissões de emissões

$(\pi_{rk}^E \varepsilon_{rk}^j)$ , considerando o coeficiente físico de emissões específico de cada combustível. Dessa forma, quando a política é implementada, ativa-se a necessidade de utilizar para cada unidade monetária de energia o equivalente, em unidades físicas, de permissões de emissões correspondentes ao que seria emitido pelo setor ao consumir aquele valor de energia. O preço das permissões pode ser especificado por setor emissor ( $k$ ) como representado na equação, ou ainda, como um preço único para a economia ( $\pi_r^E$ ) no caso de mercados nacionais de carbono, ou ainda como um preço único para o mundo ou grupo de regiões ( $\pi^E$ ) no caso de mercados internacionais de emissões.

Por fim, é interessante ilustrar como é feita a programação do MPSGE, uma vez que a representação algébrica descrita anteriormente não precisa ser digitada pelo modelador e é construída automaticamente pelo *software*. Abaixo se representa o bloco de produção dos setores de serviços, transportes, bens intensivos em energia e outras indústrias na linguagem de programação do MPSGE.

\$PROD: Y (k, r)	s:0	ee: sigmaEVA (r, k)	va(ee): sigmaVA (r, k)
O: PY(k,r)		Q: XP0 (r, k)	
I: PA(ne,r)		Q: XDP0 (r, ne, k)	
I: PL(r)		Q: LABD (r, k)	va:
I: PK(r)		Q: KAPD (r, k)	va:
I: PEN(k,r)		Q: ENE (k, r)	ee:

O bloco de produção acima indica que o setor  $Y(k,r)$  produz um bem cujo preço é  $PY(k,r)$ , a partir da combinação de insumos intermediários com preços  $PA(ne,r)$ , provenientes da oferta de bens agregados de Armington não energéticos (subconjunto  $ne$ ); trabalho (preço  $PL$ ); capital (preço  $PK$ ); e um agregado de insumos energéticos de preço  $PEN(k,r)$ . O nível de  $Y$  e dos diversos preços são variáveis endógenas no modelo. Os parâmetros especificados após os campos  $Q$  indicam os valores na base de dados inicial do modelo relacionado com cada um dos preços, ou seja, o valor inicial da produção do setor ( $XP0$ ), o valor dos insumos intermediários ( $XDP0$ ), o valor dos serviços de trabalho ( $LABD$ ) e capital ( $KAPD$ ) e o valor do agregado de insumos energéticos ( $ENE$ ). Para que a condição de lucro zero seja satisfeita, a soma dos valores dos insumos deve ser igual ao valor da produção. Por último, o código após a especificação dos parâmetros da base de dados ( $va$ : e  $ee$ :) indica as possibilidades de substituição na árvore tecnológica. O valor das elasticidades de substituição é especificado na primeira linha do código, logo após a definição do bloco de produção  $\$PROD:Y(k,r)$ . A especificação “s:” indica o nível de substituição mais alto na árvore tecnológica e não precisa ser colocada na linha dos insumos. O valor zero na frente deste símbolo indica que a função assume proporções fixas de insumos intermediários e do agregado dos demais

insumos (cesta KLE). A especificação  $\sigma_{EVA}$  define a elasticidade  $\sigma_{EVA}$  entre o agregado de insumos energéticos e o valor adicionado, enquanto a especificação  $\sigma_{VA}$  determina a elasticidade  $\sigma_{VA}$  entre os componentes do valor adicionado. Maiores detalhes sobre a formulação do modelo EPPA podem ser encontrados em Paltsev *et al.* (2005), enquanto maiores informações sobre a álgebra criada pelo MPSGE podem ser obtidas em Rutherford (1995, 1999).

## APÊNDICE B

### ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Uma questão primordial, que surge com a utilização do instrumental de modelos EGC, é a análise da influência dos parâmetros utilizados nos resultados obtidos, ou seja, a robustez dos resultados diante de diferentes conjuntos de parâmetros. Nesse sentido, procura-se neste apêndice fazer uma breve e simples análise de sensibilidade, pela variação de alguns parâmetros-chave e choques em variáveis exógenas, para verificar o quanto estes elementos influenciam os resultados endógenos. Ressalta-se que a intenção aqui não é empreender uma análise sistemática, apenas considerar valores máximos e mínimos de parâmetros e variáveis exógenas-chave de forma a captar como os resultados seriam afetados diante de valores extremos nesses parâmetros.

Para isso, para a realização da análise de sensibilidade foram consideradas quatro situações diferentes, todas apenas em relação à política CP1. Na situação 1 (S1) aumentaram-se todas as elasticidades do modelo em 50%, enquanto na situação 2 (S2) tais elasticidades foram reduzidas na mesma proporção. Nas situações 3 e 4 realizou-se uma análise de sensibilidade a partir das taxas de crescimento dos países/regiões do modelo. Na primeira (S3), aumentaram-se os parâmetros que definem o crescimento da produtividade do trabalho e do crescimento populacional do Brasil e demais países em 10, o que implica maiores crescimentos no PIB (entre 10,12% e 12,78% no cenário de referência). Ao passo que na segunda (S4), reduziu-se em 10% o crescimento da produtividade do trabalho e populacional, de forma que as taxas de crescimento das regiões sofreram reduções médias entre 10,06% e 12,34%. Portanto, foram realizados dois tipos de análise de sensibilidade, uma para as elasticidades e outra para as taxas de crescimento.

Foram escolhidas quatro variáveis-chave para a análise de sensibilidade: o nível de bem-estar, o PIB, emissões nacionais totais e a participação brasileira nas emissões mundiais de GEE.

A tabela B.1 apresenta os resultados do bem-estar para o Brasil a partir das diferentes situações descritas para as elasticidades e taxas de crescimento, bem como os resultados de bem-estar obtidos no modelo original representado pela política CP1, apresentada ao longo do trabalho.

TABELA B.1

**Análise de sensibilidade dos impactos em bem-estar para o Brasil**

(Em %)

Anos	S1	S2	S3	S4	CP1
2015	-0,04	0,05	-0,02	-0,02	-0,02
2020	-0,11	0,06	-0,08	-0,07	-0,08
2025	-0,18	0,01	-0,15	-0,15	-0,15
2030	-0,28	-0,10	-0,24	-0,24	-0,25
2035	-0,35	-0,30	-0,30	-0,34	-0,32
2040	-0,39	-0,61	-0,39	-0,46	-0,42
2045	-0,46	-0,98	-0,56	-0,63	-0,59
2050	-0,61	-1,51	-0,77	-0,84	-0,80

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Os resultados para os níveis de bem-estar em S3 e S4 mantêm-se praticamente inalterados quando comparados aos da política original (CP1), o que revela a robustez do modelo às mudanças nas taxas de crescimento. Entretanto, quando são alteradas as elasticidades do modelo este quadro se altera consideravelmente. As perdas de bem-estar se acentuam nos primeiros períodos quando as elasticidades são aumentadas (S1), porém reduzem-se nos períodos posteriores, sendo próximas às perdas observadas sob as elasticidades originais do EPPA (CP1), ao passo que a redução das elasticidades (S2) desencadeia uma reversão de sinal inicial e em seguida uma intensificação considerável das perdas de bem-estar. Os resultados associados à situação 2 podem ser compreendidos pela maior rigidez da economia, com a redução das elasticidades, que a torna menos flexível aos choques exógenos. Isso significa que as possibilidades de substituição entre combustíveis, entre insumos e entre produtos são comprometidas ao se reduzir todas as elasticidades do modelo pela metade, afetando os resultados expressivamente. Dessa forma, os resultados são sensíveis a reduções nas elasticidades, o que indica a necessidade de estimar e escolher elasticidades que reflitam as reais possibilidades de substituição entre insumos e produtos nas árvores tecnológicas e funções de demanda, sob o risco de subestimação dos custos de políticas climáticas no caso de uso de elasticidades mais flexíveis que o esperado.

A tabela B.2 apresenta os resultados do PIB a partir das diferentes situações consideradas. Verificou-se que alterações nas taxas de crescimento dos países/regiões, pouco alteram os resultados do PIB brasileiro nos períodos considerados, ou seja, o modelo novamente se mostrou robusto à alterações nas taxas de crescimento dos países, conforme representado por S3 e S4. A mesma conclusão pode ser obtida quando se considera um aumento de 50% em cada elasticidade do modelo (S1). Entretanto, reduções nas elasticidades implicam maiores perdas em termos de PIB, fato este também explicado pelo aumento da rigidez da economia na alocação de seus recursos.



TABELA B.2

**Análise de sensibilidade dos impactos sobre o PIB do Brasil**  
(Em %)

Anos	S1	S2	S3	S4	CP1
2015	-0,11	-0,19	-0,12	-0,12	-0,12
2020	-0,26	-0,42	-0,29	-0,30	-0,30
2025	-0,38	-0,84	-0,46	-0,47	-0,47
2030	-0,58	-1,35	-0,70	-0,69	-0,69
2035	-0,72	-2,03	-0,92	-0,94	-0,92
2040	-0,85	-2,79	-1,17	-1,20	-1,17
2045	-1,02	-3,67	-1,49	-1,52	-1,49
2050	-1,26	-4,66	-1,85	-1,86	-1,84

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Quanto às emissões nacionais de GEE, a tabela B.3 apresenta as variações percentuais das emissões diante das diferentes situações. Os resultados revelam que as mudanças desencadeadas por alterações nas taxas de crescimento, representadas pelas situações 3 e 4, foram relativamente pequenas em relação à política original (CP1), o que pode ser entendido como uma robustez do modelo a alterações deste parâmetro (taxa de crescimento dos países). Ainda, a mudança mais significativa ocorreu na situação 1, que representa um aumento nas elasticidades, propiciando reduções em emissões mais pronunciadas quando comparada ao modelo original. Este fato pode ser explicado pela maior flexibilidade da economia em alocar seus recursos, como por exemplo, pela substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis, o que permite intensificar as reduções de emissões nacionais de GEE.

TABELA B.3

**Análise de sensibilidade dos impactos sobre as emissões nacionais totais de GEE**  
(Em %)

Anos	S1	S2	S3	S4	CP1
2015	-35,70	-9,23	-8,87	-7,41	-8,21
2020	-40,79	-16,26	-16,96	-14,51	-16,16
2025	-42,50	-23,59	-24,91	-22,47	-24,08
2030	-49,41	-30,68	-32,47	-29,59	-31,57
2035	-55,43	-38,06	-39,41	-37,34	-39,14
2040	-60,53	-44,90	-45,12	-44,57	-45,58
2045	-65,84	-51,18	-49,89	-50,86	-50,89
2050	-69,58	-55,36	-52,32	-54,64	-53,73

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

Por fim, a tabela B.4 apresenta os resultados da participação brasileira nas emissões mundiais diante das diferentes situações consideradas, bem como os resultados obtidos a partir do modelo original representado pela política CP1.

TABELA B.4

**Análise de sensibilidade dos impactos sobre a participação nacional nas emissões mundiais de GEE**

(Em %)

Anos	S1	S2	S3	S4	CP1
2004	4,99	4,97	4,98	4,98	4,98
2005	5,61	5,57	5,58	5,60	5,59
2010	4,23	4,43	4,17	4,29	4,23
2015	2,49	3,56	3,27	2,63	2,95
2020	2,28	3,10	2,94	2,50	2,79
2025	2,00	2,83	2,51	2,31	2,45
2030	1,62	2,52	2,09	1,97	2,05
2035	1,34	2,24	1,74	1,70	1,75
2040	1,15	1,98	1,51	1,50	1,51
2045	0,98	1,76	1,35	1,32	1,33
2050	0,86	1,60	1,25	1,19	1,21

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

A análise de sensibilidade revela que alterações das taxas de crescimento dos países, como expresso pelas situações 3 e 4, não provocam mudanças significativas nos resultados da participação do Brasil nas emissões mundiais, indicando uma robustez do modelo a alterações do parâmetro taxa de crescimento dos países/regiões. Já em relação às elasticidades, são observadas modificações mais expressivas em relação aos resultados do modelo original. Elasticidades maiores em 50% (S1) podem tornar a economia mais flexível na alocação de seus fatores, como destacado anteriormente, favorecendo uma redução mais expressiva da participação brasileira nas emissões mundiais. Já a redução das elasticidades em 50% (S2) torna a economia brasileira mais rígida na utilização de seus recursos tornando mais difícil a redução das emissões nacionais e, portanto, a redução da participação brasileira nas emissões globais. Dessa forma, os parâmetros de elasticidades devem ser considerados com maior cautela, uma vez que alterações em suas magnitudes podem desencadear mudanças expressivas nos resultados do modelo. Esses resultados indicam a necessidade de considerar com cuidado as possibilidades de substituição do modelo, uma vez que uma redução nas elasticidades utilizadas no modelo original implicam mudanças consideráveis nos custos da política simulada.

## APÊNDICE C

TABELA C.1

### Tipos de áreas (mil ha) no cenário de referência

Uso da terra	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	70.432	74.093	76.594	78.789	86.050	94.430	105.248	118.784
Pastagens	135.561	139.064	142.661	145.448	146.020	144.722	143.386	141.129
Silvicultura	41.163	36.743	33.699	32.083	28.087	25.266	23.474	22.082
Pastagens naturais	92.859	92.859	92.859	92.859	92.859	92.859	89.306	83.488
Floresta natural	456.766	454.015	450.737	447.237	443.372	439.352	435.293	431.240
Bioeletricidade	993	1.026	1.072	1.115	954	320	0	0
Cana-de-açúcar (etanol)	3.574	3.547	3.725	3.817	3.881	3.855	3.852	3.794
Eólica	0	0	0	0	124	544	788	829

Fonte: Resultado do modelo EPPA.

