

Resumo - O presente estudo utiliza um modelo aplicado de equilíbrio geral para estimar os impactos econômicos da adoção de uma política de mitigação das mudanças climáticas pelo Brasil. O modelo é dinâmico-recursivo e multiregional representando a economia mundial e as especificidades da economia brasileira. Ainda, o modelo permite considerar as possibilidades de diferentes países e regiões adotarem políticas de redução de gases de efeito estufa (GEE). Assim, permite avaliar se tais políticas justificam os esforços no sentido do enquadramento com os compromissos estabelecidos pelo Protocolo de Quioto e os discutidos em Copenhague, na perspectiva de uma análise de custo-efetividade das políticas em questão. Os principais resultados revelaram uma redução do PIB brasileiro relativamente pequena com a adoção de uma taxa de carbono, quando considerada a efetividade da política na redução das emissões de GEE, bem como a intensificação da matriz energética brasileira em fontes de energia limpas como biocombustíveis e energia eólica, em detrimento de fontes de energia intensivas em carbono.

Palavras-chave: equilíbrio geral, mudanças climática, políticas de mitigação.

Classificação JEL: C68, D58 Q52, Q54

Abstract - This paper employs an applied general equilibrium model to estimate the economic impacts of Brazil adopting a climate change mitigation policy. The model is dynamic-recursive and multi-regional representing the world economy and the specificities of the Brazilian economy. The model also allows the implementation of greenhouse gases (GHG) policies in different countries and regions. In this way, it allows the evaluation of efforts to comply with targets assumed in the Kyoto Protocol or envisioned in Copenhagen, under a cost-effectiveness approach. The main results suggest a reduction in Brazil's GDP and GHG emissions by adopting a carbon tax, as well as the strengthening of the Brazilian energy matrix in clean sources as biofuels and wind instead of carbon intensive energy.

Key-words: general equilibrium, climate changes, mitigation policies.

Área ANPEC 10: Economia Agrícola e do Meio Ambiente

1. INTRODUÇÃO

As ações decorrentes de atividades econômicas e industriais têm gerado uma alteração na composição da atmosfera, que por sua vez, tem contribuído com a intensificação das mudanças climáticas verificadas nos últimos anos. De acordo com o relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima¹ (IPCC, 2007a), as emissões globais de gases de efeito estufa relacionadas às atividades humanas apresentaram um aumento de 70% entre 1970 e 2004.

O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e consequentemente, a elevação média da temperatura global podem interferir nas condições de vida no planeta de diversas formas como: no aumento do risco de extinção de diversas espécies vegetais e animais, redução da produtividade agrícola de regiões localizadas em latitudes baixas, aumento de doenças relacionadas a eventos climáticos extremos (cólera, dengue, malária, problemas respiratórios, entre outros), elevação dos níveis dos oceanos, redução da disponibilidade de água em algumas regiões e enchentes em outras. (IPCC, 2007b).

* Bolsista Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (DTI) do CNPq, aluno do Programa de Mestrado em Economia Aplicada da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, jonathangsilva@hotmail.com.

** Professor do Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, angelocg@usp.br.

¹ *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), 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.

Como consequência, as discussões relativas ao aumento das emissões de GEE e demais questões relacionadas às mudanças do clima passam a ocupar um papel de destaque nos debates internacionais, com a elaboração de políticas e até mesmo implementação destas por parte de empresas, estados e países. Um dos marcos dessas discussões foi a “Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Humano e Meio Ambiente”, realizada em 1992 no Rio de Janeiro, em que diversas nações se comprometeram a reduzir suas emissões.

O ano de 1997 pode ser considerado outro marco nas discussões sobre mudanças do clima, em decorrência do encontro ocorrido em Quioto no Japão, em que foi adotado um protocolo à Convenção sobre Mudança do Clima, denominado de Protocolo de Quioto, que estabeleceu compromissos quantificados de redução ou limitação das emissões antrópicas combinadas de GEE para os países industrializados. Mais especificamente, foi estabelecido que tais países deveriam reduzir seus níveis de emissões em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de compromisso de 2008 a 2012, bem como fomentar o desenvolvimento de políticas de redução de emissões dos GEE nos países em desenvolvimento.

Diante deste quadro, de empenho internacional na busca de alternativas para reduzir as emissões de GEE e amenizar seus efeitos negativos sobre os ecossistemas, economias e sociedades, as responsabilidades das Partes (países) foram consideradas e suas possíveis contribuições estão sendo avaliadas, a fim de que medidas adequadas sejam tomadas no sentido de reverter o quadro de emissões que tem sido associado a eventos climáticos extremos e futuros aumentos na temperatura média da superfície terrestre. A princípio, verificam-se diferentes desafios e oportunidades às Partes envolvidas, como: a criação de mercados de carbono e sua consolidação onde estes já existem, mudança das matrizes energéticas nacionais, imposição de tributos sobre as emissões, estímulo aos países que não fazem parte do Anexo I e à iniciativa privada no sentido da adoção de projetos eficientes no uso de energia, e redução das emissões oriundas do uso da terra e mudanças do uso desta.

O Brasil neste contexto tem um papel relevante, pois, ao considerar as emissões relacionadas às mudanças do uso da terra e florestas (desmatamento, queimadas e abertura de pastos em áreas antes de florestas) salta da vigésima posição para a sexta posição no ranking dos países emissores, sendo esta, sua principal fonte de emissões de GEE. Além disso, apresenta um grande potencial de exportação de créditos de carbono, pois de acordo com dados da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2010), ocupa a terceira posição em número de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) em atividade, 450 projetos (7%), só perdendo para a China com 2.331 projetos (38%) e para a Índia com 1.653 projetos (27%). Ainda, deve-se considerar que o Brasil possui o exemplo mais bem sucedido na produção de biocombustíveis, bem como a descoberta de grandes reservas petrolíferas, as quais poderão contribuir para que o país se torne um grande emissor de GEE. Rocha (2003) destaca as pressões internacionais sobre o Brasil a fim de que este adotasse metas voluntárias de redução de emissões, o que veio a se concretizar no final de 2009 com a reunião da Convenção do Clima em Copenhague. Porém, os impactos de políticas de restrição às emissões de GEE sobre a economia brasileira ainda são controversos, podendo ser significativos sobre alguns setores e repercutir sobre a economia brasileira de diversas formas como: pelo recebimento de recursos destinados a implementação de projetos de MDL, pela adoção por parte das empresas de programas de eficiência energética e de captura de carbono visando a redução de custos ou puramente por estratégia de marketing, entre outros.

A partir dessas considerações, alguns questionamentos podem ser feitos como: quais os impactos econômicos do Brasil adotar políticas de redução de gases do efeito estufa? Como o Brasil pode reduzir os efeitos negativos da adoção dessas políticas sobre sua economia?

Com o intuito de investigar tais questões torna-se útil a modelagem da economia brasileira, levando-se em consideração os principais aspectos acerca das mudanças climáticas. Embora existam trabalhos que tenham feito este esforço como: Rocha (2003), Lopes (2003); Tourinho, Motta e Alves (2003), Feijó e Porto Jr. (2009), Estudo das Mudanças Climáticas no Brasil - EMCB (2010), entre outros, poucos são os que avaliam de forma quantitativa os impactos sobre a economia brasileira da adoção de políticas de redução das emissões de GEE. Ainda, a maior parte desses trabalhos utiliza modelos estáticos modificados para incorporar questões ambientais. Com isso, surge espaço para abordagens mais avançadas ou mesmo alternativas para o caso brasileiro. Dessa forma, o presente trabalho faz um esforço

para desenvolver 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; os custos de políticas de redução das emissões; a consideração de outros países e seus relacionamentos com o Brasil através dos mercados globais, entre outros. Pretende-se abordar essas questões através de um modelo criado para o estudo das emissões de GEE e de políticas ambientais.

Diante das questões desenvolvidas anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo: estimar os impactos da adoção de uma política de mitigação das mudanças climáticas por parte do Brasil através da aplicação de um modelo de equilíbrio geral. Mais especificamente, pretende-se através do modelo verificar como algumas variáveis econômicas respondem à simulação da taxa de emissões de GEE por parte do Brasil.

Para tal propósito, será utilizado um modelo aplicado de equilíbrio geral, dinâmico-recursivo, multiregional que representa a economia mundial e que possibilita apontar se existem diferenças consideráveis, em termos qualitativos e quantitativos, da adoção ou não de políticas de redução de GEE sobre as economias representadas. O uso do modelo 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 determinado nível de redução 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 utilizadas. A terceira seção é dedicada à aplicação do modelo por meio da adoção de uma política de redução de emissões de GEE e a última seção apresenta as conclusões sobre os principais resultados obtidos.

2. METODOLOGIA

2.1 O Modelo

A adoção de políticas de redução de GEE envolve diversos setores, agentes econômicos e países, os quais exercem influência sobre a economia. Para avaliar os impactos econômicos da adoção de políticas de mitigação das mudanças climáticas por parte do Brasil, torna-se necessário utilizar um instrumental que permita a representação de diferentes agentes e setores da economia e suas interrelações. Neste sentido, optou-se pela utilização do instrumental de modelos de equilíbrio geral computável (*Computable General Equilibrium – CGE*), o qual incorpora variáveis macro e microeconômicas e procura captar as interdependências existentes entre os agentes de uma economia. Além disso, a utilização de modelos de equilíbrio geral computável permite a obtenção das direções e magnitudes de choques exógenos aplicados sobre uma mesma economia, permitindo a análise de impactos e custos de diversos cenários alternativos.

Como destaca Wing (2004) estes modelos de simulações combinam a estrutura abstrata de equilíbrio geral formalizada por Arrow e Debreu com dados econômicos reais para solucionar os níveis de oferta, demanda e preços que sustentam o equilíbrio num conjunto de mercados específicos. Os modelos CGE, são uma ferramenta padrão de análise empírica, amplamente utilizada na análise do bem-estar agregado e na distribuição dos impactos de políticas, que podem ser transmitidos através de múltiplos mercados, sendo capazes de representar uma ampla gama de diferentes tributos, subsídios, quotas ou instrumentos de transferências. Kydland e Prescott (1996) e Shoven e Whalley (1984), apresentam maiores detalhes sobre os modelos CGE.

Os modelos CGE têm sido intensivamente utilizados em análises de políticas climáticas como, por exemplo, as análises dos impactos do Protocolo de Quioto sobre a economia europeia (Virguier *et al.*, 2003), sobre a economia japonesa (Paltsev *et al.*, 2004), sobre os países em desenvolvimento (Babiker, Reilly e Jacoby, 2000), os custos de uma política climática nos Estados Unidos sob a gestão Obama (Paltsev *et al.*, 2009), o papel da Rússia no Protocolo de Quioto (Bernard *et al.*, 2003), e a redução do aquecimento global através de abordagens alternativas (Nordhaus, 2007), entre outros.

No presente estudo, utiliza-se o modelo EPPA² (*Emissions Prediction and Policy Analysis*) do *Massachusetts Institute Technology* (MIT), o qual é um modelo de equilíbrio geral dinâmico-recursivo e

² Maiores detalhes sobre o Modelo EPPA podem ser encontradas em Babiker et al. (2001) e Paltsev et al. (2005).

multiregional da economia mundial, que foi construído sobre o conjunto de dados do GTAP (*Global Trade Analysis Project*, Dimaranan e McDougall, 2002) e de dados adicionais para as emissões de GEE. O modelo EPPA considera:

- i. um horizonte de simulação de longo-prazo (até o ano de 2100),
- ii. tratamento dos principais GEE, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nítrico (N₂O), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF₆), bem como outras substâncias que exercem impacto direto sobre o clima.

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.

A evolução do modelo no tempo está baseada em cenários de crescimento econômico resultantes do comportamento do consumo, poupança e investimentos, bem como de pressuposições exógenas sobre o aumento da produtividade do trabalho, energia e da terra. O comportamento de tais variáveis somados às políticas simuladas, como impostos e subsídios ao uso de energia, controle nas emissões de poluentes, entre outros, determinam a evolução das economias e alteram a competitividade e participação das diferentes tecnologias ao longo do tempo e entre cenários alternativos.

Além disso, deve-se destacar a distinção feita pelo EPPA ao estoque de capital, o qual pode ser classificado em “maleável” e “não-maleável”. Cada economia regional é modelada de forma a apresentar as duas formas de capital em cada período. Uma parcela do estoque de capital agregado é “maleável”, em que a *mix* de insumos com os quais este tipo de capital é usado pode ser alterado em resposta às mudanças de preços relativos. Já a outra parcela do capital é rígida, ou seja, a proporção de insumos utilizada por este capital é mantida fixa. A parcela não maleável do estoque de capital é representada por funções de produção Leontief, que não permite a substituição entre insumos. Já a parcela maleável do estoque de capital é representada por funções de elasticidade de substituição constante (*Constant Elasticity Substitution*, CES), permitindo que o capital substitua e seja substituído por outros insumos na função de produção. Esta formulação permite ao modelo exibir respostas de curto e longo prazos a partir de mudanças nos preços relativos.

O crescimento populacional é definido exogenamente com base em tendências de longo prazo dos dados das Nações Unidas (*United Nations*, 2000, 2001). A taxa de crescimento da produtividade do trabalho é especificada de forma a reproduzir a taxa observada e prevista de crescimento médio do PIB, conforme os dados do Fundo Monetário Internacional (FMI, 2000). Maiores detalhes sobre a dinâmica do modelo podem ser encontrados em Babiker *et al.* (2001) e Paltsev *et al.* (2005).

Como o EPPA pertence à classe de modelos CGE, este representa o fluxo circular de bens e serviços da economia, no qual consumidores (famílias) arrendam fatores de produção aos setores produtivos e recebem em troca rendas dos fatores, a qual é utilizada na compra de bens produzidos pelos setores produtivos. Dessa forma, utiliza-se os 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 sujeito 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 Complementariedade Mista (*Mixed Complementary Problem - MCP*, Rutherford, 1995) em decorrência da grande quantidade de agentes econômicos e distorções. 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, as 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 deve obter lucro zero, ou seja, o valor dos insumos deve ser igual (ou maior) que o valor da produção. Em termos de MCP, as seguintes condições devem ser satisfeitas para todos os setores de uma economia:

$$\text{lucro} \geq 0, y \geq 0, \text{produto}^T(-\text{lucro}) = 0 \quad (1)$$

Já a condição de equilíbrio dos mercados supõe que qualquer bem ou fator com preço positivo deve manter o equilíbrio entre oferta e demanda, e qualquer bem ou fator em excesso de oferta deve ter preço zero. Utilizando a abordagem de um MCP, a seguinte condição deve ser satisfeita para cada bem e cada fator de produção:

$$\text{oferta} - \text{demanda} \geq 0, p \geq 0, p^T (\text{oferta} - \text{demanda}) = 0 \quad (2)$$

Enquanto a condição de equilíbrio da renda considera que o valor da renda para cada agente (incluindo entidades do governo) deve ser igual ao valor das dotações de fatores e das receitas dos impostos:

$$\text{Renda} = \text{dotações} + \text{receitas dos impostos} \quad (3)$$

De forma simples, o problema de otimização do Modelo EPPA pode ser resumido pelo comportamento dos diversos agentes e setores. Em cada região (r) e em cada setor (i), uma firma representativa escolhe um nível de produto y , a quantidade de insumos primários (k) e insumos intermediários (x) de outros setores (j), para maximizar os lucros sujeito à sua restrição tecnológica. O problema da firma é dado por:

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

onde π_{ri} e C_{ri} denotam as funções lucro e custo, respectivamente; e p_{ri} e w_{rf} são os preços dos bens e fatores, respectivamente.

No EPPA assume-se que a produção é representada por tecnologias com elasticidade de substituição constante (CES), que têm como característica intrínseca a homogeneidade linear e retornos constantes de escala. A homogeneidade linear da função custo, bem como a teoria da dualidade nos permite expressar o problema (4) em termos das funções custo e lucro unitário. Já a característica de retorno constante de escala implica que em equilíbrio as firmas obtêm lucro zero. Portanto, o comportamento otimizador da firma permite a obtenção da seguinte condição de equilíbrio:

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

onde c_{ri} é a função custo unitário.

Pelo Lema de Shephard, no setor i a demanda intermediária pelo bem j 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 caso dos consumidores privados, em cada região, um agente representativo possui dotações de fatores de produção e serviços, que podem ser vendidas ou arrendadas às firmas. Em cada período, o

agente representativo escolhe os níveis de consumo e poupança que maximizam sua função de bem-estar sujeita à restrição orçamentária dada pelo nível de renda M_r :

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

onde s_r é a poupança, d_{ri} é a demanda final por mercadorias, K_{rf} 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 que corresponde à configuração da Equação 8, dada por:

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

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

$$d_{ri} = m_r^- \frac{\partial E_r}{\partial p_{rs}} \quad (10)$$

e para poupança é:

$$s_r = m_r^- \frac{\partial E_r}{\partial p_{rs}} \quad (11)$$

onde 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 o equilíbrio de preços nos diferentes mercados de bens e fatores. A demanda final das categorias investimento, governo e comércio exterior, dessas equações são:

$$y_{ri} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial p_{ri}} + m_r^- \frac{\partial E_r}{\partial p_{ri}} \quad (12)$$

e

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

O modelo utiliza a sintaxe do algoritmo MPSGE (*Mathematical Programming System for General Equilibrium*, 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 aninhadas, de elasticidade de substituição constante (CES), 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 GAMS (*General Algebraic Modeling System*, Brooke et al., 1998), o qual obtém a solução do problema como de programação não-linear (sub-conjunto dos problemas MCP).

2.2 Dados

O EPPA agrega o conjunto de dados econômicos do GTAP em 16 regiões e diversos setores e fatores, conforme apresenta a Tabela 1. Para uma melhor avaliação de políticas climáticas, novas desagregações foram realizadas, além das fornecidas pelo conjunto de dados do GTAP, como por exemplo, para as tecnologias do setor energético e de transportes. Foram inseridas novas tecnologias, consideradas potencialmente relevantes no futuro, mas que ainda possuem custos muito elevados no

presente (tecnologias *backstop*), que podem aumentar suas participações no mercado de acordo com os preços energéticos ou das condições impostas pelas políticas climáticas. Além disso, desagregações setoriais consideram a separação de setores de serviços (SERV) e transportes (TRAN) do setor de outras indústrias (OTHR), o que possibilita a realização de um estudo mais cuidadoso do potencial de crescimento destes setores ao longo do tempo, e de suas implicações para uma economia intensiva em energia.

Tabela 1 – Agregações Utilizadas pelo Modelo EPPA.

Regiões	Setores	Fatores
Anexo B	Não Energético	Capital
Estados Unidos (USA)	Culturas (CROP)	Trabalho
Canadá (CAN)	Rebanho (LIVE)	Terra
União Européia (EUR)	Silvicultura (FORS)	Óleo cru
Japão (JPN)	Alimento (FOOD)	Óleo xisto
Leste Europeu (ROE)	Serviços (SERV)	Carvão
Austrália & N. Zelândia (ANZ)	Intensivo em energia (EINT)	Gás natural
Não – Anexo B	Transporte (TRAN)	Hidráulica
Brasil (BRA)	Outras Indústrias (OTHR)	Nuclear
Rússia (RUS)	Energético	Eólica & Solar
Índia (IND)	Carvão (COAL)	
África (AFR)	Óleo cru convencional (OIL)	
China (CHN)	Óleo refinado (ROIL)	
Oriente Médio (MES)	Gás natural (GAS)	
Resto da Ásia (REA)	Combustível líq. de biomassa (BOIL)	
México (MEX)	Óleo de xisto (SOIL)	
América Latina (LAM)	Elétric.: Fóssil (ELEC)	
Leste Asiático (ASI)	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.

Como destacado anteriormente, todos os setores produtivos, bem como o consumo final foram modelados utilizando-se funções de produção de elasticidade de substituição constante (CES) ou funções Cobb-Douglas e Leontief (que são casos especiais da função CES). Além disso, estruturas aninhadas para os setores foram consideradas, a fim de permitir diferentes níveis de substituição entre insumos e bens consumidos e a flexibilidade na utilização das elasticidades de substituição, particularmente, no que diz respeito aos combustíveis, eletricidade e aquelas elasticidades cujas emissões e custos de abatimento são especialmente sensíveis.

Quanto aos dados de energia, estes estão em unidades físicas e foram baseados nos balanços da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency, 2004, 2005*). Em decorrência da importância destas informações para realização do presente trabalho, os dados do GTAP para o Brasil foram comparados com bancos de dados nacionais, a partir de fontes como IBGE, IPEA e Ministério de Minas e Energia.

Por fim, as estatísticas sobre os gases de efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs e SF₆, entre outros) foram obtidas a partir dos inventários mantidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency, 1999*).

2.3 Política de Mitigação de Mudanças Climáticas

No presente estudo optou-se por implementar uma política de imposto ao carbono, o que representa uma das alternativas em debate nas negociações internacionais sobre emissões, tendo como objetivo controlar a expansão ou reduzir os níveis de emissões de GEE na economia. Colocar um preço no carbono permite atingir quatro objetivos: (i) sinalizar aos consumidores quais bens e serviços têm elevado conteúdo de carbono e devem, portanto, ser substituídos ou evitados; (ii) induzir as firmas à substituição de insumos por opções de baixo carbono; (iii) proporcionar incentivos de mercado para a inovação e o desenvolvimento de produtos de baixo carbono; (iv) permitir que os três mecanismos acima sejam postos em operação com o menor custo de informação possível (EMCB, 2010).

Na simulação realizada no EPPA, optou-se por implementar um imposto às emissões de carbono específico de US\$ 20 por tonelada de CO₂ - equivalente, o qual foi inserido a partir do ano de 2015 e vigorando até 2050. Considerou-se que o preço da tonelada de carbono cresce a uma taxa de juros de 4% ao ano a partir do primeiro ano de imposição, o que na prática representa que o preço real de carbono permanece constante ao longo do horizonte da política. Deve-se destacar ainda, que os resultados obtidos devem ser lidos como desvios em relação a uma trajetória da economia brasileira na qual a taxa não ocorresse.

3. RESULTADOS

Com a imposição de uma taxa de carbono, observou-se uma redução do PIB brasileiro em todos os períodos, culminando com a redução máxima de 6,08% em 2050 em relação ao PIB daquele ano no cenário de referência em que não há a imposição de uma taxa de carbono. Em geral, o sacrifício a ser realizado pelo país em termos de perdas do PIB nos primeiros anos da política não se revela expressivo, o que pode ser evidenciado pelas perdas de 0,35% e 0,46% em 2015 e 2020, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2 – PIB brasileiro em bilhões de dólares e sua taxa de variação.

Ano	Cenário de referência	Cenário com a política	PIB (%)
2004	33,79	33,79	0,00
2005	39,99	39,99	0,00
2010	49,91	49,91	0,00
2015	58,37	58,17	-0,35
2020	66,81	66,50	-0,46
2025	76,18	75,70	-0,62
2030	86,53	85,73	-0,92
2035	99,43	96,64	-2,80
2040	111,03	107,12	-3,53
2045	123,92	117,47	-5,20
2050	137,65	129,28	-6,08

Fonte: Resultados da pesquisa

Ao observar a trajetória de crescimento da economia brasileira, verifica-se que a adoção de medidas de redução das emissões de GEE por parte do Brasil gera uma pequena mudança na inclinação da trajetória de crescimento, o que evidencia o fato que os sacrifícios econômicos em termos de variação do PIB são relativamente pequenos. Tal quadro pode ser explicado por algumas características intrínsecas da economia brasileira como uma matriz energética “limpa”, que pode tornar o país mais resiliente a políticas de redução de carbono.

A Tabela 3 por sua vez, mostra que a imposição de uma taxa de carbono a partir de 2015 se mostra efetiva no sentido de reduzir as emissões brasileiras. Apesar disso, nos primeiros anos de vigência da política a redução de emissões foi pouco acentuada, 8,08% e 9,44% em 2015 e 2020, respectivamente. Porém, ao final do período considerado, as reduções de emissões se mostraram mais expressivas,

atingindo os picos de 45,80% e 52,17% em 2045 e 2050, respectivamente, em relação ao cenário de referência.

Tabela 3 – Emissões brasileiras de GEE (em mmt de C equivalente) e variação percentual.

Ano	Cenário de referência	Cenário com política	Variação (%)
2004	995,36	995,36	0,00
2005	1024,11	1024,11	0,00
2010	1101,56	1101,56	0,00
2015	1138,78	1238,84	-8,08
2020	1140,15	1259,01	-9,44
2025	1167,15	1318,62	-11,49
2030	1028,86	1362,57	-24,49
2035	929,45	1373,24	-32,32
2040	852,40	1394,22	-38,86
2045	776,03	1431,81	-45,80
2050	701,99	1467,59	-52,17

Fonte: Resultados da pesquisa.

O aumento da eficácia desta política nos últimos anos pode ser entendido pelo aumento gradativo do preço do carbono, o qual cresce a uma taxa de 4% ao ano, fazendo com que haja uma mudança significativa na trajetória das emissões de GEE brasileira, conforme apresentado no Gráfico 1.

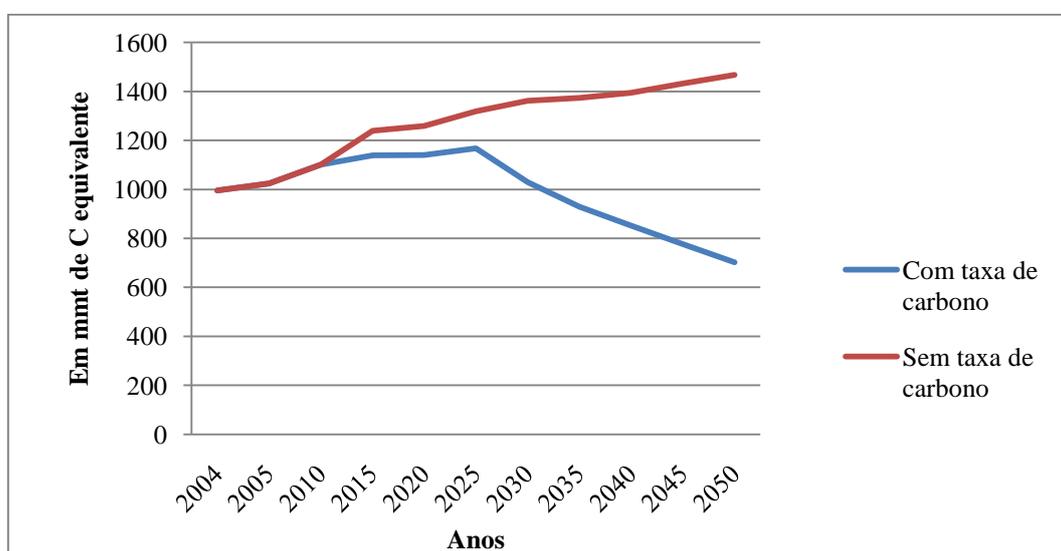


Gráfico 1 – Emissões brasileiras de GEE associadas ao uso de energia.

Fonte: Dados da pesquisa.

Não obstante, uma análise mais profunda da redução de emissões brasileiras permite verificar quais os setores que mais contribuem com a redução e quais os setores apresentaram respostas menos acentuadas em relação à política adotada (Tabela 4).

Nesse sentido, setores intensivos em emissões como os de carvão, óleo refinado e de eletricidade tendem a apresentar maiores reduções na oferta de energia, ao passo que, os setores de energia hidráulica,

de biocombustíveis e de energia eólica aumentaram suas participações na oferta doméstica de energia, uma vez que o imposto ao carbono aumenta o preço final das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis. Na simulação realizada, alguns setores apresentam substancial crescimento, como por exemplo, o de biocombustíveis³, que cresceu 26,43% e 25,58% nos anos de 2035 e 2040, respectivamente, o que explica a grande redução em emissões com impacto relativamente pequeno sobre o PIB.

Tabela 4 – Variação percentual da oferta de energia por setor de 2004 a 2050.

Setores	Período avaliado										
	2004	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Carvão	0,00	0,00	0,00	-16,13	-18,24	-19,53	-26,09	-28,10	-32,39	-34,31	-37,10
Óleo	0,00	0,00	0,00	0,64	0,46	0,27	-3,19	-7,02	-9,18	-11,96	-13,42
Óleo ref.	0,00	0,00	0,00	-10,89	-12,15	-14,14	-34,26	-43,53	-50,95	-58,47	-64,92
Gás	0,00	0,00	0,00	-9,29	-11,19	-12,17	-16,76	-18,13	-21,67	-23,34	-26,04
Elétric.	0,00	0,00	0,00	-15,18	-18,34	-20,07	-23,62	-24,59	-28,25	-30,03	-33,25
Hidráulica	0,00	0,00	0,00	4,53	4,88	4,92	4,39	4,34	4,34	4,54	4,77
Eólica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,61	3,62	2,47	3,01	3,11
Não-elétrico	0,00	0,00	0,00	3,05	2,96	3,57	2,74	2,65	2,58	3,13	3,66
Biocomb.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,43	25,58	6,54	4,77

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 5 apresenta os impactos sobre a demanda por energia, em decorrência da imposição de uma taxa de carbono. Pode-se observar que todos os setores apresentaram reduções na demanda de energia após a imposição de uma taxa de carbono em comparação com o cenário de referência, no qual tal taxa não existe. Entretanto, deve-se ressaltar que alguns setores como o de óleo refinado, eletricidade, intensivos em energia e outras indústrias foram os que apresentaram as maiores reduções percentuais na demanda de energia. Em contraposição, os setores de culturas, rebanhos e silvicultura apresentaram as menores reduções percentuais. Tais setores fazem parte da agregação agricultura, a qual é a segunda maior emissora de GEE no Brasil⁴. Com isso, verifica-se que um dos setores que mais emite GEE no país é relativamente menos sensível à imposição de uma taxa de carbono, uma vez que este tipo de imposto incide sobre o consumo de energia, enquanto as emissões relacionadas ao manejo de dejetos, sistema digestivo de animais ruminantes e mudanças no uso da terra não são diretamente afetadas pelo imposto. Dessa forma, surge a necessidade da adoção de políticas alternativas a fim de que o setor agricultura apresente resultados mais significativos em redução de emissões.

Os resultados gerados pelo Modelo EPPA revelaram que as perdas econômicas com a taxação do carbono no Brasil são pouco expressivas. Tais resultados estão de acordo com os obtidos pelo estudo EMCB (2010), o qual indica que as maiores reduções de emissões de GEE são oriundas dos setores 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 da taxa de carbono.

Por fim, uma parcela considerável da redução na demanda por energia verificada na Tabela 5, pode ser explicada pelo esforço realizado por alguns dos setores analisados em internalizar os custos da

³ O setor de biocombustíveis no modelo EPPA representa a segunda geração desta fonte de energia, ainda em desenvolvimento e não disponível correntemente em larga escala, o que explica o crescimento tardio desta fonte de energia no modelo. Essa tecnologia corresponde à produção de biocombustível a partir da quebra da celulose e do total aproveitamento de resíduos como o bagaço da cana-de-açúcar. A corrente geração de biocombustíveis, dominada pelo etanol produzido a partir da cana-de-açúcar no Brasil e a partir do milho nos EUA, bem como pela produção de biodiesel a partir de sementes oleaginosas, é considerada agregada dentro dos setores agrícolas do modelo, e portanto, acaba não apresentando papel relevante diante da política de taxação do carbono. A separação destes setores de biocombustíveis de primeira geração dos demais setores agrícolas no modelo EPPA encontra-se em desenvolvimento.

⁴ A agricultura ocupa a segunda posição no ranking de setores emissores no Brasil, o que representa 22% das emissões brasileiras.

taxação do carbono, afetando seus níveis de atividade, bem como o PIB nacional (como verificado na Tabela 2).

Tabela 5 – Variação percentual da demanda de energia por setor de 2004 a 2050.

Setores	Período avaliado										
	2004	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	0,00	0,00	0,00	-4,21	-5,11	-6,28	-8,75	-8,87	-9,87	-8,68	-8,34
Rebanho	0,00	0,00	0,00	-4,02	-4,68	-5,68	-7,95	-7,86	-8,81	-8,15	-8,39
Silvicultura	0,00	0,00	0,00	-4,76	-6,67	-6,12	-7,69	-7,41	-8,93	-8,47	-8,06
Alimentos	0,00	0,00	0,00	-5,64	-7,08	-8,78	-11,98	-12,44	-14,53	-14,86	-16,30
Óleo ref.	0,00	0,00	0,00	-11,94	-13,39	-15,59	-35,55	-44,76	-52,11	-59,48	-65,73
Eletric.	0,00	0,00	0,00	-12,50	-13,18	-15,88	-20,13	-22,06	-26,17	-28,73	-32,34
Intens. em Energia	0,00	0,00	0,00	-9,74	-11,40	-13,55	-17,59	-17,00	-19,57	-18,96	-20,46
Outros	0,00	0,00	0,00	-7,39	-9,26	-11,28	-13,62	-15,34	-17,34	-18,81	-20,63
Serviços	0,00	0,00	0,00	-6,49	-7,48	-8,68	-9,98	-10,94	-12,31	-13,63	-15,28
Transportes	0,00	0,00	0,00	-9,12	-9,76	-3,25	-9,10	-8,48	-9,96	-9,53	-10,61

Fonte: Resultados da pesquisa.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho analisa os impactos da adoção de uma política de restrição de emissões de GEE pelo Brasil. Mais especificamente, considera-se um imposto sobre as emissões de GEE no valor de US\$ 20 por tonelada a partir de 2015, vigorando até 2050.

Os principais resultados mostraram alterações na oferta e demanda de energia, evidenciando significativas reduções da demanda de energia dos setores de óleo refinado, de eletricidade, intensivos em energia e outros, o que pode estar relacionado com a necessidade da internalização dos custos decorrentes da adoção da medida de restrição de emissões. Verificou-se também uma mudança da matriz energética nacional, a qual ficou relativamente mais intensiva em fontes de energia “limpa” (ou de baixas emissões), como biocombustíveis e energia eólica, em detrimento de fontes de energia intensivas em carbono como óleo refinado, carvão, entre outros.

Deve-se ressaltar ainda, que os setores ligados à agricultura se mostraram pouco sensíveis aos efeitos da taxaço de carbono, evidenciando a necessidade da adoção de outras medidas mais eficazes na redução das emissões desse setor, responsável por grande parte das emissões de GEE do Brasil.

A implementação do imposto ao carbono causou uma pequena alteração na inclinação da trajetória de crescimento da economia, sinalizando um impacto negativo em termos de redução do PIB. Contudo, o impacto econômico mostrou-se relativamente pequeno, com queda de 6% do PIB no último ano simulado (2050), associado a reduções de 52% em emissões derivadas do uso de energia. Tal fato pode ser explicado pela composição da matriz energética brasileira (grande participação de fontes renováveis), que tornam a economia brasileira resiliente a eventuais choques de imposição de uma taxaço sobre as emissões.

Estes resultados, entretanto, não são conclusivos. Uma extensão deste trabalho deve incorporar questões relativas às mudanças do uso da terra e desmatamento, responsável por mais da metade das emissões brasileiras de GEE, bem como comércio de emissões, sendo estas questões de grande relevância quando se pretende considerar o Brasil nos esforços de mitigação das mudanças climáticas.

BIBLIOGRAFIA

Babiker, M., J. Reilly and H. Jacoby. The Kyoto Protocol and developing countries. *Energy Policy*, v.28, p. 525-536, 2000.

- Babiker, M. H.; Reilly, J. M.; Mayer, M.; Eckaus, R. S.; Sue Wing, I. and Hyman, R. C. *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 71, Cambridge, Massachusetts, 2001.
- Bernard, A.; Paltsev, S.; Reilly, J. M.; Vielle, M.; Viguier, L. *Russia's Role in the Kyoto Protocol*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 98, Cambridge, Massachusetts, 2003.
- Brooke, A. Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. *GAMS: a user's guide*. GAMS Development Corporation, p. 262, 1998.
- Dimaranan, B., and Mcdougall, R. *Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP5 Data Base*. Center for Global Trade Analysis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2002.
- EMCB. *Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades* / editado por Sérgio Margulis e Carolina Burle Schmidt Dubeux; coordenação geral Jacques Marcovitch.– São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. 82 p.
- Feijó, Flávio Tosi ; Porto Jr., Sabino da Silva . Protocolo de Quioto e o Bem Estar Econômico no Brasil Uma Análise Utilizando Equilíbrio Geral Computável. *Análise Econômica* (UFRGS), v. 51, p. 127-154, 2009.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers*, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2007a. Disponível em: (<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policy Makers*, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2007b. Disponível em: (<http://www.ipcc-wg2.gov/publications/AR4/index.html>)
- International Energy Agency. *World Energy Outlook: 2004*. OECD/IEA: Paris, 2004.
- International Energy Agency. *Energy Balances of Non-OECD Countries* (2005 edition) OECD/IEA: Paris, 2005.
- International Monetary Fund, *World Economic Outlook (September)*, Washington DC: International Monetary Fund, 2000.
- Kyndland, Finn E. & Prescott, Edward C. The Computational Experiment: An Econometric Tool. *Journal of Economic Perspectives*, v.10, n.1, p. 69-85, 1996.
- Nordhaus, William. *The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy in the DICE-2007 Model*. Manuscript, may 2007.
- Mathiesen, L. *Computation of Economic Equilibrium by a Sequence of Linear-Complementarity Problems*, Mathematical Programming Study 23, Amsterdam, 1985.
- Lopes, Ricardo L. *Efeitos de uma restrição na emissão de CO₂ na economia brasileira*. 2003. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, Piracicaba.
- Paltsev, S.; Reilly, J. M.; Jacoby, H. D. and Tay, K. H. *The Cost of Kyoto Protocol Targets: The Case of Japan*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 112. Cambridge, Massachusetts, 2004.
- Paltsev, S.; Reilly, J.; Jacoby, H.; Eckaus, R.; Mcfarland, J.; Sarofim, M.; Asadoorian, M.; Babiker, M. *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 125, Cambridge, Massachusetts, 2005. Disponível em: (<http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC Rpt125.pdf>)

- Paltsev, S.; Reilly, J. M.; Jacoby, H. D.; Morris, J. F. *The Cost of Climate Policy in the United States*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 173, Cambridge, Massachusetts, USA, 2009. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt173.pdf>
- Rocha, Marcelo T. Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT. 2003. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, Piracicaba.
- Rutherford, T. F. Extensions of GAMS for Complementarity Problems Arising in Applied Economics. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v.19, n.8, p. 1299-1324, 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.
- Shoven, J. B. & J. L. Whalley. Applied General Equilibrium Models of Taxation and International Trade: An Introduction and Survey, *Journal of Economic Literature* v. 22, p. 1007-1051, 1984.
- Tourinho, O. A. F.; da Motta, R. S.; Alves, Y. L. B. Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral. IPEA. Texto para discussão n. 976, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: (http://www.ipea.gov.br/pub/td/2003/td_0976.pdf)
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Clean Development Mechanism. 2010. Disponível em: (<http://cdm.unfccc.int>)
- United Nations: *Long-Run World Population Projections: Based on the 1998 Revision*. United Nations: New York, 2000.
- United Nations: *World Population Prospects: The 2000 Revision, Data in digital form*. Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 2001.
- US Environmental Protection Agency. *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-1997*, Technical Report EPA 236-R-99-003, Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington DC 1999.
- Viguier L., M. Babiker and J. Reilly. The costs of the Kyoto Protocol in the European Union. *Energy Policy*, v. 31 (5), p. 393-483, 2003.
- Wing Sue, I. *Computable General Equilibrium Models and Their Use in Economy-Wide Policy Analysis*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Technical Note 6, Cambridge, Massachusetts, 2004.