

INCORPORAÇÃO DE CO₂ NO COMÉRCIO INTERNACIONAL: UMA ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO DAS EXPORTAÇÕES DE MINAS GERAIS EM 2005.

1. INTRODUÇÃO

A redução das emissões de CO₂, um dos principais gases de efeito estufa (GEE), é um objetivo que tem ganhado consenso mundial como parte do processo de mitigação do aquecimento global. Ainda assim, as emissões globais aumentaram nos últimos anos, principalmente nos países em desenvolvimento, onde parece estar ocorrendo uma fuga de carbono devido às relações de comércio internacional. A literatura chama de hipótese de Refúgio da Poluição (*Pollution Haven Hypothesis*) quando um sistema econômico com menos regulamentação ambiental experimenta um ganho de competitividade na produção de bens intensivos em poluição, podendo acarretar no curto prazo, a crescentes exportações desses países para os países com maiores regulamentações (MONGELLI *et al.*, 2006). Nesse contexto, a separação da responsabilidade do produtor e consumidor tem instigado muitos estudos sobre o carbono incorporado no comércio (PETERS e HERTWICH, 2008). Assim, espera-se que os formuladores de políticas considerem as implicações ambientais do comércio, pois sem o custeio pleno das externalidades, a produção de bens com grande quantidade de CO₂ incorporado pode ocorrer em regiões com legislação ambiental fraca.

O comércio internacional causa uma separação geográfica entre consumidores e a poluição emitida na produção dos diversos bens de consumo. Isso possibilita um deslocamento da poluição pelos consumidores associado ao seu consumo de bens produzidos em terras distantes. Se um país ou região tem uma grande parte de suas exportações na produção de bens intensivos em poluição, então pode ser grande o custo econômico (real ou percebido) associado em participar de políticas de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Se as políticas têm uma participação insuficiente de países, então existe o risco de que a produção se desloque para aqueles países não participantes (PETERS e HERTWICH, 2008).

Segundo Machado (2002), à exceção daqueles impactos causados pelo transporte de produtos transacionados internacionalmente, os impactos ambientais que podem ser associados ao comércio exterior não estão intrinsecamente relacionados à natureza do ato de comercialização propriamente dito. Antes, estão especialmente relacionados à produção e ao consumo dos bens e serviços transacionados com o exterior. Neste sentido, a destinação final do produto (mercado doméstico ou externo) e o local onde ocorre seu consumo (no país produtor ou no exterior – quando se separa produção e consumo no espaço via comércio exterior) não alteram *a priori* a natureza e a magnitude do impacto ambiental.

Uma séria limitação em análises de impactos ambientais é a tendência a lidar isoladamente com cada setor ou indústria, sem reconhecer a importância dos vínculos intersetoriais. A agricultura moderna utiliza grandes quantidades de energia produzida comercialmente e também de produtos industriais. Ao mesmo tempo, o vínculo mais tradicional, o fato de a agricultura ser fonte de matérias-primas para a indústria, está se desfazendo devido ao uso cada vez mais disseminado de produtos sintéticos. A ligação entre energia e indústria também está se alterando, pois há uma forte tendência a um uso menos intensivo de energia na produção industrial de alguns países (WCED, 1987).

Em 2005, as exportações brasileiras totalizaram US\$ 118.529 milhões¹. Somente o estado de Minas Gerais foi responsável por 9% do PIB nacional nesse ano e obteve também a

¹ Em preços f.ob, segundo dados do IPEADATA.

posição de segundo maior exportador, respondendo por 11,4% do total nacional². A maior parte das exportações mineiras no ano de 2005 se deve aos setores de Metalurgia³, que foi responsável por mais de 32% das exportações, a Indústria extrativa mineral (22%) e a Fabricação de alimentos⁴ com 6%. Esses dados reforçam a importância da análise da quantidade de carbono incorporado nas exportações do estado, já que segundo Nakano *et al.* (2009) a maior parte das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis estão diretamente correlacionados com o nível de atividades intensivas em carbono, como a geração de eletricidade, produção de produtos químicos e metalurgia básica e consumo de combustíveis para transportes.

A matriz energética nacional considera a participação dos diferentes insumos energéticos. Dentre esses insumos o Petróleo e seus derivados e o gás natural apresentaram a maior participação no consumo de energia em 2005, correspondendo a aproximadamente 42%. Os combustíveis derivados do petróleo, (em especial óleo diesel, óleos combustíveis e gasolina) são utilizados principalmente nos setores de transporte e geração térmica de eletricidade, havendo aplicações também em diversas atividades industriais. Em muitos países desenvolvidos, o consumo de combustíveis nas atividades de transporte e geração elétrica é equilibrado, mas no caso brasileiro, devido à forte participação da hidroeletricidade na matriz energética, o setor de transportes é o principal consumidor de combustíveis. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) para 2005 (MME, 2006), dos cerca de 137 milhões de *tep* (toneladas equivalentes de petróleo) de energia secundária consumidos pela economia, 55,7% ou 76,4 milhões de *tep* corresponderam ao consumo de combustíveis.

Em Minas Gerais, o consumo final de energia em 2005, alcançou 25,5 milhões de *tep*. Nesse ano, esse valor foi equivalente a 14,7 % do consumo de energia no Brasil. Semelhante ao que ocorre no país, o petróleo e seus derivados e o gás natural apresentaram maior participação no consumo final de energia do estado, cerca de 40% do total. O setor Industrial apresentou a maior demanda de energia secundária, correspondendo a 11.193 mil *tep* (55,23%) e o setor Transportes ocupou a segunda posição do Estado com um consumo de 28,6% do total. Nesse setor, derivados de petróleo e gás natural, não-renováveis, representaram 89% do total consumido (BEEMG, 2007).

Motivado pelos aspectos anteriormente tratados, este artigo possui como objetivo principal fazer uma comparação quantitativa de como as emissões incorporadas no comércio internacional de Minas Gerais forma o perfil ambiental do estado, avaliando a intensidade do carbono decorrente da queima de combustíveis energéticos, principalmente os fósseis, em 35 setores do estado em 2005. De qualquer modo, enquanto dados econômicos e de comércio detalhados são disponíveis, a disponibilidade de dados de emissões setoriais de CO₂ que equivalem aos dados econômicos e de comércio são frequentemente restritos, e para possibilitar a análise de todos os setores da matriz, uma compatibilização da matriz energética foi feita em relação à matriz de insumo-produto (SU *et al.*, 2010)⁵.

Especificamente, pretende-se: i) calcular as elasticidades de emissões em relação a variações na demanda final e os setores-chave; ii) analisar a estrutura das exportações, para verificar se os produtos exportados em Minas são intensivos em carbono e iii) verificar se os parceiros comerciais do estado importam mais dos setores considerados intensivos em carbono. Para atingir os objetivos propostos, a seção 2 apresenta algumas evidências da literatura sobre modelos de insumo-produto com emissões de CO₂ que abordam o tema de

² Dados do site do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em 31 de jan. de 2009 e da Fundação João Pinheiro. Disponível em <<http://www.fjp.gov.br>>.

³ Na matriz de 2005 o setor siderurgia está agregado com o setor de metalurgia.

⁴ Na matriz de 2005 o setor Indústria de café agregado no setor de Fabricação de Alimentos.

⁵ Os dados do Balanço Energético de Minas Gerais foram compatibilizados com a matriz do MDMG, conforme apresentado na sessão sobre a base de dados do presente artigo.

comércio internacional. A seção 3 apresenta as equações do modelo insumo-produto desenvolvido e alguns indicadores usados na sua construção. A seção 4 descreve a base de dados utilizada. A seção 5 apresenta e discute os resultados empíricos do modelo, bem como as interações intersetoriais na estrutura da exportação. Por fim, a seção 6 apresenta as considerações finais.

2 LITERATURA SOBRE CARBONO INCORPORADO NO COMÉRCIO INTERNACIONAL

A literatura internacional apresenta, sobretudo na área de economia regional, estudos sistemáticos sobre a intensidade das emissões de CO₂ e a sua incorporação no comércio internacional. Peters e Hertwich (2006) avaliaram as emissões de CO₂ incorporadas no comércio internacional em 87 países e 57 setores para o ano de 2001 utilizando um modelo de insumo-produto multi-regional e a base de dados do GTAP. O foco principal do artigo foi comparar quantitativamente como as emissões incorporadas no comércio internacional formam o perfil ambiental de um país e discutir as implicações para a política de clima global. Os resultados apresentados mostraram que existem em torno de 53Gt de CO₂ incorporado no comércio global e que os países do Anexo I⁶ são importadores líquidos de carbono. Por fim, os autores argumentam a importância de estudos nessa área já que as emissões incorporadas no comércio podem ter um impacto significativo na participação e na eficácia das políticas climáticas globais como o Protocolo de Quioto.

Nakano *et al.* (2009) analisou a incorporação de carbono no comércio utilizando uma base de dados da OCDE internacionalmente comparável (insumo-produto, comércio bilateral de bens e emissões de CO₂) para 41 países incluindo 17 indústrias. Seus resultados sugerem que em meados de 1990 e início da década de 2000 ocorreram “déficits de comércio” das emissões de CO₂ para 21 países da OCDE e que para 16 países, a magnitude desse “déficit de comércio” aumentou no final dos anos 90. Enquanto um terço do aumento global nas emissões baseadas na produção se realizou dentro das economias não-OCDE no fim da década de 1990, mais da metade das emissões baseadas no consumo foram atribuídas às economias da OCDE. As simulações mostraram que o aumento na intensidade de comércio global tem um impacto crescente sobre as emissões incorporadas, enquanto a transferência de tecnologia dos países de carbono intensivo a países de alto carbono intensivo reduzem as emissões globais e as lacunas do comércio de carbono. Ainda, os resultados sugerem que as discussões de políticas futuras sobre emissões globais de GEE precisam considerar as inter-relações entre os países ao invés de definir apenas objetivos para países individuais já que as economias estão ligadas através do comércio.

No contexto brasileiro, Schaeffer e de Sá (1996) ao estudarem o carbono incorporado nas importações e exportações brasileiras de 1970-1993 expressaram a preocupação de que os países desenvolvidos estivessem transferindo suas emissões de CO₂ para os países em desenvolvimento através de suas importações. O trabalho estimou por meio de um modelo de insumo-produto a quantidade de energia e de carbono incorporado nas exportações e importações de não-energéticos a fim de determinar se o comércio internacional de produtos ricos em carbono é um problema que vale a pena ser tratado no caso brasileiro. Devido a falta de dados, a composição da produção usada para os bens exportados e importados pelo Brasil foram idênticas às usadas para os produtos domésticos nos Estados Unidos em outros estudos. O uso de energia incorporado nas importações para o período de 1970-1980 foi calculado

⁶ Os países do Anexo I: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bulgária, Canadá, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, Romênia, Rússia, Suécia, Suíça, Ucrânia.

usando a matriz de insumo-produto dos EUA de 1967 e para o período de 1981-1993 a matriz de insumo-produto de 1977 dos EUA. Desse modo, os dados tiveram que ser ajustados com base em estudos sobre a energia do Brasil. As estimativas mostraram que o teor de carbono das exportações foi consideravelmente superior ao das importações a partir de 1980. Em 1990, a diferença, expressa como uma fração do total de emissões de carbono do Brasil, foi de 11,4 por cento, ou cerca de 8,3 milhões de toneladas de carbono.

Machado (2002) utilizou um modelo de insumo produto em unidades híbridas para o período de análise de 1985, 1990 e 1995, com o objetivo de avaliar os impactos do comércio exterior sobre o uso de energia e as emissões de CO₂. Os resultados mostram que o Brasil é um exportador líquido de energia e carbono embutidos nos produtos não-energéticos transacionados internacionalmente, e também que cada dólar auferido com as exportações incorpora consideravelmente mais energia e carbono do que cada dólar dispensado com as importações. Os setores mais intensivos em carbono encontrados foram o Ferro e Aço, Transporte, Minerais não-Metálicos, Papel e Celulose e Outras Metalurgias.

Mais recentemente, Carvalho e Perobelli (2009) desenvolveram um modelo de insumo-produto inter-regional híbrido São Paulo/restante do Brasil para quantificar as emissões de CO₂ decorrentes do consumo de combustíveis energéticos, ou seja, analisar os setores que mais incorporam carbono em sua produção, assim como a quantidade de carbono embutida nas exportações. As emissões de CO₂ consideradas são causadas por combustíveis energéticos, tais como óleo diesel, óleo combustível, gasolina, GLP, nafta, querosene, gás de cidade, coque, carvão vegetal, álcool etílico e outros energéticos de petróleo. Os resultados mostraram que os setores de Agropecuária, Siderurgia, Alimentos e Bebidas, Outros Setores e Transportes se destacaram como setores chaves nas emissões de CO₂ nas duas regiões analisadas. Em relação à quantidade de CO₂ incorporada nas exportações, os resultados apontaram que a pauta de exportações brasileira é em grande parte intensiva em poluição.

3 METODOLOGIA

A análise de *insumo-produto* é freqüentemente utilizada para se estudar as interdependências ou interações entre setores da economia de uma região ou país. O grau de interdependência pode ser avaliado por meio de medidas conhecidas como coeficientes de requerimento *intersetorial*. Esses coeficientes permitem avaliar, por exemplo, os impactos que mudanças na demanda final de um setor exercem sobre os demais setores da economia (Miller e Blair, 2009).

Existem várias extensões possíveis da análise de insumo-produto, dentre as quais, de particular relevância para este trabalho, está a incorporação de um setor energético para o estudo da intensidade de CO₂ emitido em Minas Gerais, e a identificação do carbono incorporado nas exportações. A abordagem utilizada neste trabalho se baseia na construção de uma tabela híbrida de insumo-produto. Essa abordagem já foi utilizada por vários autores, como Miller e Blair (1985), Gowdy e Miller (1987), Machado (2002) e Hilgemberg (2004). De acordo Miller e Blair (1985), o modelo de *insumo-produto* em unidades híbridas é a formulação mais consistente para aplicação de modelos de *insumo-produto* de natureza físico-econômica envolvendo uso de energia.

Em termos resumidos, a abordagem em unidades híbridas consiste em incorporar na tabela de *insumo-produto*, uma linha e uma coluna referentes ao setor de combustíveis energéticos. A nova linha descreve em unidades físicas (e.g., *Gg/tep*)⁷ as vendas do setor de combustíveis aos outros setores da economia e a sua coluna descreve em unidades monetárias (R\$) o total de compras feitas ao setor de combustíveis pelos demais. Após essa incorporação, é necessário recalcular a matriz de *insumo-produto* A e a inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$

⁷ Gg/tep: giga por tonelada equivalente de petróleo.

devido aos novos fluxos da matriz (PEROBELLI *et al*, 2007). Em seguida, deve-se calcular os requerimentos diretos (que são os efeitos imediatos, dado uma variação da demanda final), totais e indiretos (captam os efeitos secundários de uma mudança da demanda final) entre os setores, respectivamente. No caso do presente trabalho, mostra a dependência existente entre todos os setores (geração de emissões), que são representados através do setor de combustíveis. O Anexo 1 apresenta a formalização destes indicadores que serão utilizados no cálculo dos setores-chave apresentados na próxima seção.

3.1 Impactos setoriais e setores-chave na emissão de CO₂⁸

Para calcular os setores-chave no que concerne às emissões, é preciso construir uma matriz de elasticidades intersetoriais da demanda em relação ao consumo final de emissões. Para isso, considere Γ um escalar que denota a geração de emissões totais pelo sistema produtivo e τ' um vetor-linha de emissões por unidade de produto setorial. A partir do modelo de Leontief, pode-se escrever:

$$\Gamma = \tau' X^* = \tau'(I - A^*)^{-1} Y^* \quad (01)$$

Se as emissões dependem da demanda final da economia, pode-se escrever:

$$\Delta\Gamma = \tau' \Delta X^* = \tau'(I - A^*)^{-1} Y^* \gamma \quad (02)$$

onde γ é um escalar que representa o aumento proporcional na demanda final.

Seja s , um vetor da participação das demandas finais setoriais em suas respectivas produções efetivas:

$$s = (\hat{X}^*)^{-1} Y^* \quad \text{ou} \quad Y^* = s \hat{X}^* \quad (03)$$

Substituindo (01) em (02), tem-se:

$$\Delta\Gamma = \tau'(I - A^*)^{-1} \hat{X}^* s \gamma \quad (04)$$

Dividindo por Γ :

$$\Gamma^{-1} \Delta\Gamma = \Gamma^{-1} \tau'(I - A^*)^{-1} \hat{X}^* s \gamma \quad (05)$$

onde $\Gamma^{-1} \Delta\Gamma$ mostra o aumento total de emissões em relação a um aumento na demanda final, isto é, a elasticidade de Γ em relação à demanda final. Porém, esta expressão não traz nenhuma informação adicional, dada a natureza linear do modelo, pois $\Gamma^{-1} \Delta\Gamma = \gamma$. Assim, é necessário fazer uma desagregação da elasticidade. A primeira etapa é transformar a equação (05). Para isso, seja d' um vetor da distribuição de emissão final entre os n setores produtivos da economia, tal que $\sum_{i=1}^n d_i = 1$. Assim, o vetor dos coeficientes de consumo setorial τ' pode ser escrito como:

$$\tau' = \Gamma d' (\hat{X}^*)^{-1} \quad (06)$$

Substituindo (06) em (05):

$$\Gamma^{-1} \Delta\Gamma = d' (\hat{X}^*)^{-1} (I - A^*)^{-1} \hat{X}^* s \gamma \quad (07)$$

E considerando que:

$$(I - D)^{-1} = (\hat{X}^*)^{-1} (I - A^*)^{-1} \hat{X}^* \quad (08)$$

⁸ Esta seção segue a apresentação do conceito de elasticidade e da metodologia para a identificação de setores-chave no consumo de energia feita em Alcántara e Padilha (2003), Hilgemberg (2005) e Carvalho e Perobelli (2009)

Pois, segundo Miller e Blair (1985) quando duas matrizes quaisquer, \mathbf{P} e \mathbf{Q} são conectadas pela relação $\mathbf{P} = \mathbf{MQM}^{-1}$, elas são ditas similares e são expressas por $\mathbf{P} \approx \mathbf{Q}$. Logo, o produto do lado direito de (08) torna-se $(I - D)^{-1} \approx (I - A^*)^{-1}$, ou seja, $(I - D)^{-1}$ pode ser entendido como o valor aproximado das necessidades totais (diretas e indiretas) para a produção de bens e serviços na economia, os quais são usualmente obtidos da matriz $(I - A^*)^{-1}$.

Diagonalizando o vetor s , pode-se obter a partir de (07) e (08):

$$\varepsilon' = d'(I - D)^{-1} \hat{s} \gamma \quad (09)$$

que fornece a variação proporcional as emissões setoriais em relação a uma mudança proporcional na demanda final.

Omitindo-se γ e diagonalizando o vetor d' , obtemos:

$$\Gamma^y = \hat{d}(I - D)^{-1} \hat{s} \quad (10)$$

onde τ_{ij}^y é o elemento característico da matriz Γ^y e expressa a porcentagem de aumento nas emissões do setor i em resposta a uma mudança de 1% na demanda final do setor j . Esse por sua vez, pode ser interpretado como elasticidade, dado que a soma dos elementos da coluna do setor j expressa a porcentagem de variação das emissões experimentado por toda a economia em resposta a uma mudança de 1% na demanda final do setor j .

Sendo τ_{ij}^y um elemento da matriz Γ^y , pode-se definir:

$$P_{\bullet j} = \sum_{i=1}^n \tau_{ij}^y \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$P_{i \bullet} = \sum_{j=1}^n \tau_{ij}^y \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

Alcántara e Padilha (2003) chamam de impacto total, a soma das colunas, que mostram o aumento percentual nas emissões causado por um aumento de 1% na demanda final do setor j , dado por (11). E chamam de impacto distributivo, a soma das linhas, que mostram o aumento das emissões do setor i que resulta de um aumento de 1% na demanda final experimentada por todos os setores da economia, dado por (12).

Definindo Γ_T e Γ_D como os valores medianos⁹ dos impactos totais e distributivos, respectivamente. Alcántara e Padilha (2003) adotam a classificação estabelecida na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos Setores

	$\sum_i \tau_{ij}^y < \Gamma_T$	$\sum_i \tau_{ij}^y > \Gamma_T$
$\sum_j \tau_{ij}^y > \Gamma_D$	Setores relevantes do ponto de vista da demanda de outros setores I	Setores-chave: pressionam o consumo de energia e são pressionados a consumir energia II
$\sum_j \tau_{ij}^y < \Gamma_D$	Setores não-relevantes III	Setores relevantes do ponto de vista de sua demanda IV

Fonte: Alcántara e Padilha (2003)

⁹ Os autores optam por utilizar a mediana no lugar da média, pois a média é uma medida de tendência central indicada para casos onde a distribuição dos valores é simétrica. Nos casos de distribuição assimétrica, como é o da poluição, a mediana é uma medida de tendência central mais indicada.

Os setores no quadrante I têm suas emissões determinadas, em parte, pela demanda dos outros setores, pois o impacto distributivo é maior do que a mediana da economia. Os setores no quadrante II são os setores-chave, pois apresentam um efeito total e distributivo maior que os valores medianos da economia, isto é, eles são induzidos a emitir pelo aumento da demanda dos outros setores, e ao mesmo tempo, eles pressionam as emissões dos outros setores pelo aumento de sua própria demanda. No quadrante III, estão os setores menos relevantes no que concerne às emissões, e por fim, no quadrante IV, estão os setores com alto conteúdo de emissões.

Após definir os setores-chave da econômica em termos de emissões de CO₂, a próxima seção descreve o procedimento utilizado para analisar a estrutura das exportações, verificando se os produtos exportados em Minas são intensivos em carbono.

3.2 Análise da Energia Incorporada nas Exportações¹⁰

Considerando uma economia fechada, pode-se aplicar um teste de consistência por meio da equação $F = \alpha^* Y$, onde os vetores dos coeficientes totais de intensidade de carbono (α^*) e de demanda final (Y) são expressos em unidades híbridas, e o vetor de oferta/uso de combustíveis (F) é expresso em unidades físicas. O produto vetorial $\alpha^* Y$ tem que igualar o vetor de produtos energéticos (F), que por sua vez é um dado de entrada no modelo de unidades híbridas. Uma vez verificada a consistência do modelo, pode-se utilizar estes coeficientes para se estimar as emissões incorporadas no comércio internacional (MACHADO, 2002).

A mensuração das emissões incorporadas nas exportações é evidente, visto que as exportações (E) constituem-se num componente da demanda final total (Y). Desta forma, o carbono incorporado nas exportações pode ser estimado da seguinte maneira:

$$F_E = \alpha^* E \quad (13)$$

em que:

- F_E corresponde ao carbono incorporado nas exportações;
- α^* é um vetor de coeficientes totais de emissões; e,
- E são as exportações

4 BASE DE DADOS

Para a construção do modelo de insumo-produto em unidades híbridas, foram usados dados da matriz de insumo-produto para Minas Gerais de 2005, divulgada pela Fundação João Pinheiro (FJP), e do Balanço Energético de Minas Gerais (BEEMG) para o mesmo ano, publicado pela CEMIG. A matriz de insumo-produto possui abertura para 35 setores e 55 grupos de produtos. A partir dela, realizou-se um conjunto de procedimentos visando à obtenção da matriz de insumo-produto em unidades híbridas (35x35 setores).

O próximo passo consistiu na construção da parte híbrida, o que envolveu compatibilizar as informações derivadas da matriz de insumo-produto da FJP, que contemplava 35 setores, com os dados do BEEMG que estavam disponíveis para apenas 12 setores. Como as duas bases contemplam um número diferente de setores, uma desagregação do BEEMG foi necessária para que o mesmo ficasse com 35 setores, semelhante ao da matriz. A desagregação adotada foi feita com base na produção total de cada setor (assumindo que a quantidade de energia utilizada em cada setor é linear à sua produção) e teve como objetivo preservar, tanto quanto possível, as informações de uso de energia fornecido pelo BEEMG e da matriz.

Posteriormente, foi necessário fazer a conversão dos coeficientes de energia em emissão de CO₂ causada pelo consumo dos combustíveis pelos vários setores da economia.

¹⁰ Esta seção está baseada em Carvalho e Perobelli (2009).

Para isto, aplicou-se os coeficientes de conversão encontrados na Matriz Energética e de Emissões, que representam a quantidade total de dióxido de carbono, medido em Gg/tep emitidas na atmosfera de acordo com os coeficientes apresentados na Tabela 2¹¹.

Tabela 2. Coeficientes de conversão (Gg/tep) do consumo de CO₂

Setores	Óleo diesel	Óleo comb.	Gasolina	GLP	Querosene	Coq. carvão min.	Álcool etílico	Outras sec.petr.
Agropecuária	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,78	2,39	3,07
Mineração e Pelotização	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Minerais não Metálicos	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Metais não ferrosos e out. met.	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Papel e Celulose	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Química	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Alimentos e Bebidas	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,81	3,03	3,07
Têxteis e Vestuário	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Outras Indústrias	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,93	2,80	3,07
Comércio e Serviços	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,81	2,71	3,07
Transporte	3,00	3,21	2,35	2,61	2,97	3,95	2,76	3,07
Serviços Públicos	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,93	2,80	3,07
Setor Energético	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,94	3,00	3,07

Fonte: Matriz Energética e de Emissões (ECONOMIA E ENERGIA , 2000)

Finalmente, a última fase foi a substituição das linhas dos fluxos do setor de energia em unidades monetárias para unidades físicas, e este processo envolveu três etapas. A primeira foi a computação dos valores físicos dos fluxos de carbono regional assumindo a hipótese que a quantidade de energia utilizada está linearmente relacionada à produção. A segunda foi fazer uma participação porcentual da produção intersetorial pelo total do consumo intermediário, excluindo o setor de energia, e depois multiplicando essa participação pelo consumo intermediário total, para que a matriz ficasse balanceada, porém sem a linha do setor energético em unidades monetárias. E enfim, a terceira etapa foi a alocação entre os diversos setores, dos valores encontrados na primeira etapa deste procedimento.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Elasticidades de emissões e Setores-Chave

As emissões consideradas neste artigo são aquelas devido à queima de combustíveis energéticos, que são os principais responsáveis pelo acúmulo dos gases de “efeito estufa” na atmosfera. O cálculo das elasticidades fornece informações em uma matriz, onde cada elemento de uma dada coluna mostra a contribuição do impacto direto e indireto decorrente do aumento de 1% na demanda final da produção de um setor específico em cada um dos setores. Então, a soma dos elementos de uma determinada coluna mostra o impacto total nas emissões de todos os setores em Minas Gerais, decorrente do aumento de um ponto porcentual na demanda final de um dado setor. De forma análoga, a soma de cada uma das linhas representa o impacto distributivo, ou seja, a emissão que seria gerada em um setor quando a demanda final dos outros setores aumentasse em um ponto porcentual.

Os resultados mostram que os setores com maior impacto total são aqueles que pressionam as emissões dos outros setores acima da mediana da economia em decorrência do aumento de 1% na sua demanda final. Em Minas Gerais, a mediana encontrada foi de 0,034 Gg/tep de carbono adicionais em resposta ao incremento da demanda. Mostram também que as atividades que emitem CO₂ acima de 0,014 Gg/tep de carbono em resposta ao adicional de 1% na demanda de todos os setores possuem maior impacto distributivo. Desta forma, são considerados setores-chave aqueles que possuem impacto total e distributivo acima da mediana.

¹¹Como os dados estavam disponíveis apenas para os 12 setores, semelhante ao BEEMG, o mesmo procedimento de desagregação foi adotado.

A Figura 01 apresenta a especificação dos setores-chaves. No quadrante II, encontram-se os setores-chave, ou seja, aqueles que são induzidos a emitir pelo aumento da demanda dos outros setores, e ao mesmo tempo, pressionam as emissões dos outros setores pelo aumento de sua própria demanda. No quadrante I, os setores que têm suas emissões determinadas, em parte, pela demanda dos outros setores, pois o impacto distributivo é maior do que a mediana da economia. No quadrante III, os setores menos relevantes no que concerne às emissões. Por fim, os setores do quadrante IV que possuem alto conteúdo de emissões.

Os setores-chave identificados para a economia mineira no que concerne às emissões foram os setores de Agricultura, silvicultura e exploração florestal; Pecuária e pesca; Extrativa mineral; Alimentos; Celulose e Papel; Derivados do petróleo e álcool; Químicos; Minerais não-metálicos; Metalurgia; Veículos automotores; Construção e Transporte armazenagem e correio. Estes são pressionados a emitir quando a demanda dos demais setores aumenta, e ao mesmo tempo, pressionam a emissão dos outros setores quando sua própria demanda aumenta.

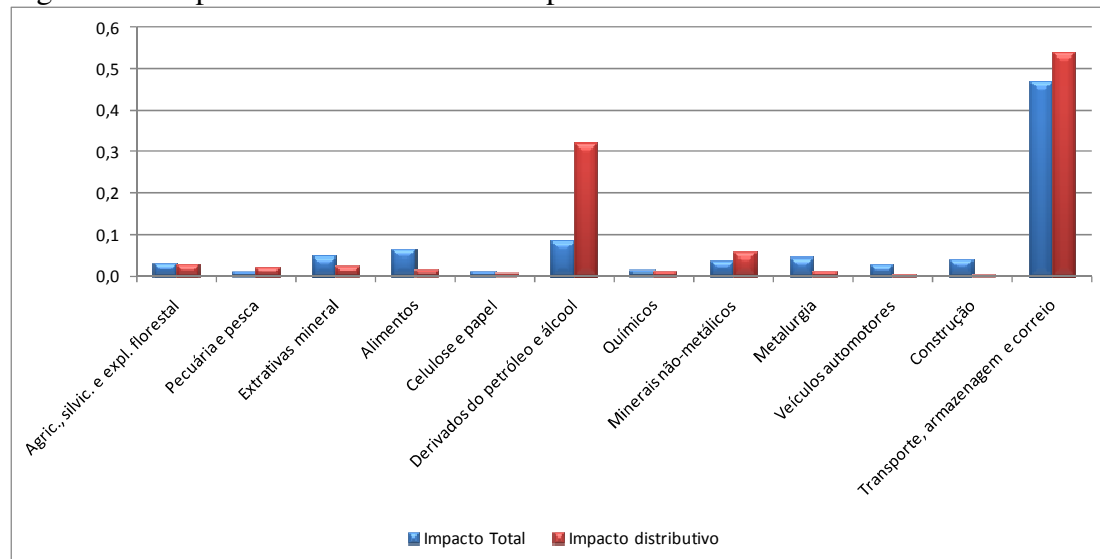
Figura 01 - Classificação dos Setores em Minas Gerais

	Impacto total menor que a mediana	Impacto total maior que a mediana
Impacto distributivo maior que a mediana	1) Produtos têxteis; 2) Artefatos de couro e calçados; 3) Vestuário e acessórios; 4) Borracha e plástico; e 5) Eletricidade, gás, água e limpeza urbana.	1) Agricultura, silvicultura e exploração florestal; 2) Pecuária e pesca; 3) Extrativa mineral; 4) Alimentos; 5) Celulose e Papel; 6) Derivados do petróleo e álcool; 7) Químicos; 8) Minerais não-metálicos; 9) Metalurgia; 10) Veículos automotores; 11) Construção; e 12) Transporte; armazenagem e correio.
Impacto distributivo menor que a mediana	1) Bebidas; 2) Produtos do fumo; 3) Farmacêuticos, perfumaria, higiene e limpeza; 4) Metal (excetuando máquinas e equipamentos); 5) Máquinas e Equipamentos; 6) Peças e acessórios para veículos automotores; 7) Outro equipamentos de transporte; 8) Móveis, madeiras e artigos diversos; 9) Serviços de informação; 10) Intermediação financeira e seguros; 11) Atividades imobiliárias e aluguel; 12) Serviços de alojamento e alimentação; e 13) Serviços prestados às empresas.	1) Máquinas, aparelhos e materiais elétricos; 2) Comércio; 3) Educação e saúde mercantil; 4) Administração pública; e 5) Outros serviços.

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Na Figura 02, pode-se observar que dentre os setores-chave, o setor de Derivados do petróleo e álcool e Transportes possuem o maior impacto distributivo. Este é um resultado esperado já que em geral, o primeiro é o maior produtor de combustíveis fósseis e o segundo utiliza, como insumo básico, os combustíveis fósseis. Os setores Alimentos; Extrativa Mineral; Metalurgia; Veículos Automotores e Construção possuem impacto total maior, revelando que o aumento de sua própria demanda pressiona as emissões dos outros setores. Os demais setores-chave possuem impacto distributivo maior, ou seja, são pressionados a emitir quando a demanda de outros setores aumenta.

Figura 02 - Impactos Total e Distributivo para os setores localizados em Minas Gerais



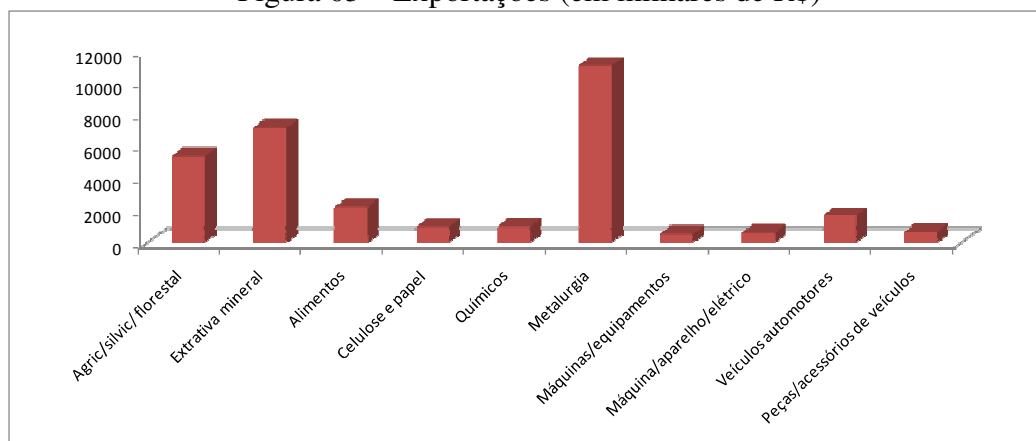
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Os formuladores de políticas ao se defrontarem com objetivos de redução de emissões de CO₂ devem ficar atentos aos setores-chave, pois restringir a emissão destes significa restringir sua produção no curto prazo, e conseqüentemente, isto afetará o produto de toda a economia de uma forma mais intensa.

5.2 Análise do conteúdo de carbono nas exportações de Minas Gerais

A intensidade das emissões presentes na estrutura de exportação baseia-se no volume exportado e foi calculada de acordo com a fórmula (13). De acordo com as informações da matriz de 2005, os maiores exportadores do estado foram os setores de Metalurgia; Extrativa Mineral; Agricultura, silvicultura e exploração florestal; Alimentos e Veículos automotores. A Figura 03 apresenta o grupo dos dez setores que mais exportaram nesse ano.

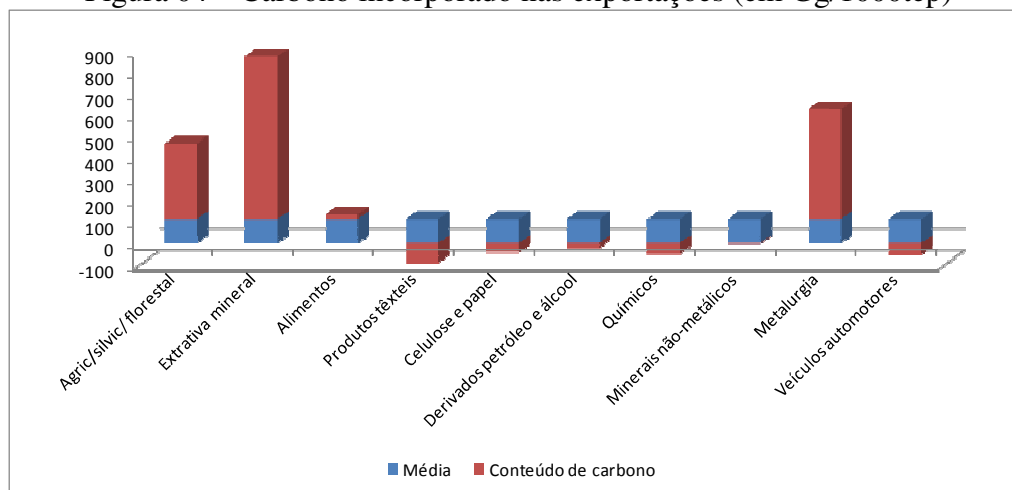
Figura 03 – Exportações (em milhares de R\$)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da matriz de insumo-produto de 2005.

O cálculo do conteúdo de carbono das exportações mineiras nos diversos setores revelou que os setores de Extrativa Mineral; Metalurgia; Agricultura, silvicultura e exploração florestal; Alimentos; Minerais não-Metálicos e Derivados do Petróleo e Álcool são as atividades que possuem a maior quantidade de carbono incorporado. A Figura 04 apresenta a lista dos dez setores com maior conteúdo de carbono em suas exportações.

Figura 04 – Carbono incorporado nas exportações (em Gg/1000tep)



Fonte: Elaboração própria com base nos resultados da pesquisa.

A Figura 04 lista os dez setores com maior conteúdo de carbono, mas observa-se que dentre esses dez, somente quatro possuem um teor de carbono acima da média de todos os setores exportadores, que é de 112,90 Gg/1000tep. São eles: Agricultura, Silvicultura e exploração florestal; Extrativa Mineral, Alimentos e Metalurgia. Esses estão também na lista dos maiores exportadores sugerindo, dessa forma, que a estrutura de exportações de Minas Gerais apresenta um elevado teor de carbono.

Além disso, dos dez setores que mais exportam no estado, apresentados na Figura 03, sete estão na lista dos setores-chave, Agricultura, Silvicultura e exploração florestal; Extrativa Mineral; Alimentos; Celulose e Papel; Químicos; Metalurgia e Veículos Automotores, o que também seria um indício de que as exportações de Minas são intensivas em emissões, já que o aumento da atividade desses setores implica que estes pressionam as emissões e são pressionados a emitir.

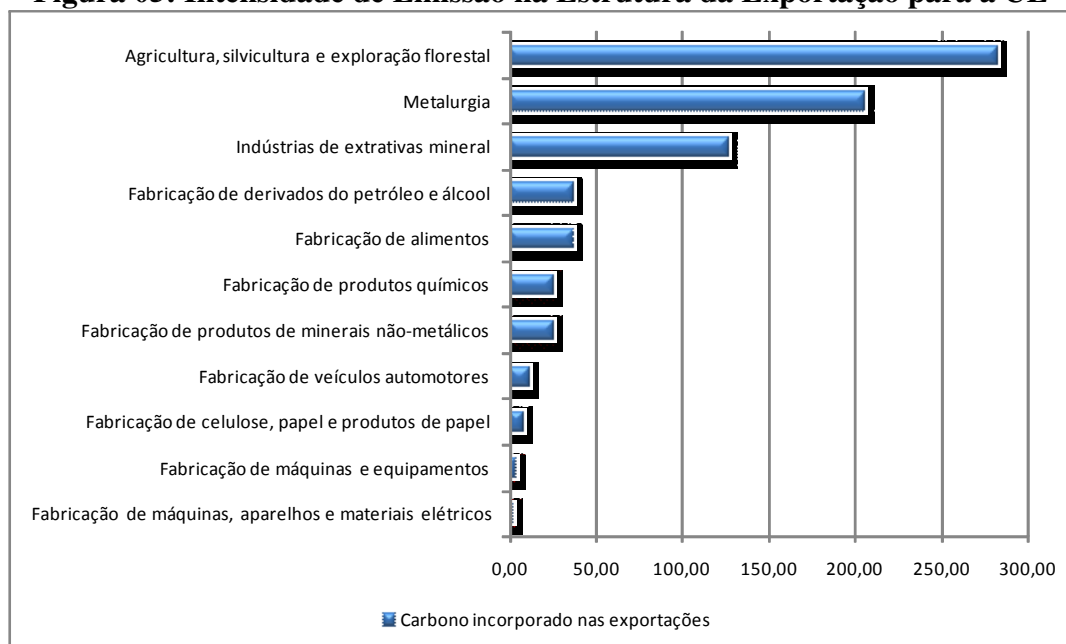
5.3 Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação dos principais parceiros comerciais de Minas Gerais

Essa seção apresenta os resultados da quantidade de carbono incorporada nas exportações dos diversos setores para os principais parceiros comerciais do estado: União Européia (EU), Estados Unidos (EUA), China; Argentina e Resto do MERCOSUL, e o Resto do Mundo.

De acordo com os dados da SECEX, em 2005, o principal parceiro comercial de Minas Gerais foi a União Européia com um total de 29% das exportações do estado. O segundo maior parceiro foi o Estados Unidos com 18% seguidos pela China com 11%, e MERCOSUL com 7%. Os demais países do mundo somaram 36%. Analisando o conteúdo de carbono das exportações dos diversos setores para esses países é possível verificar quais são os principais produtos comercializados que incorporam maior quantidade de carbono e para quais países que são destinados.

A Figura 05 apresenta a quantidade de carbono incorporado nas exportações de Minas Gerais para a UE. De acordo com os dados, os três setores que mais exportaram foram Agricultura, silvicultura e exploração florestal; Metalurgia e Indústrias de extrativa mineral, representando 36%, 24% e 16%, respectivamente. Esse três setores correspondem a 76% do total exportado. Considerando a quantidade de carbono incorporada nas exportações, observa-se que os setores que incorporam mais CO₂ são os mesmos setores que mais exportam, ou seja, os setores de Agricultura, silvicultura e exploração florestal, Metalurgia e Extrativa mineral, que são também setores-chave no que concerne às emissões. Assim, verifica-se que esse grupo de países exporta de setores intensivos em CO₂ de MG.

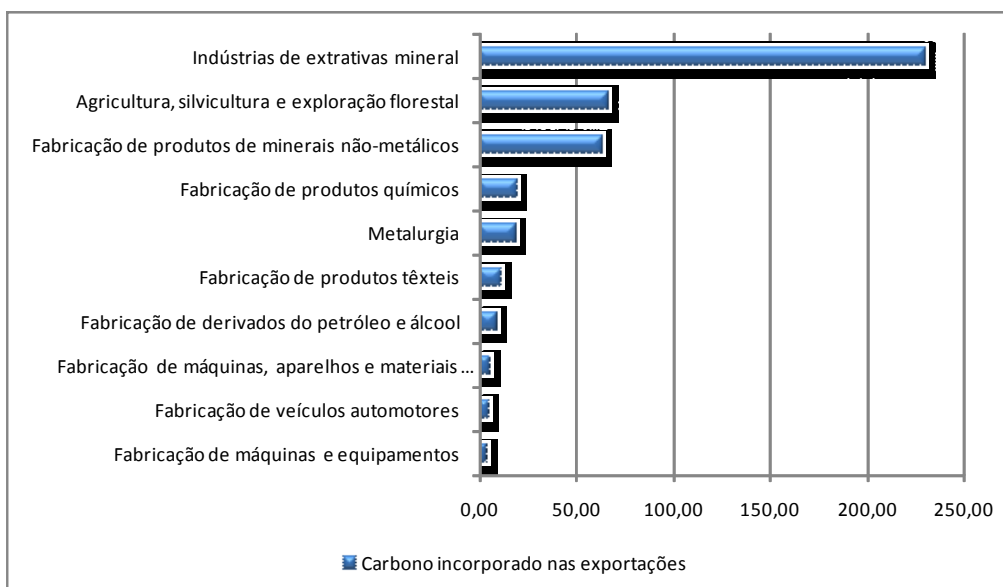
Figura 05: Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação para a UE



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Os EUA (Figura 06) importaram mais dos setores Extrativa mineral (47%); Agricultura, silvicultura e exploração florestal e Fabricação de produtos de minerais não-metálicos com 14%. O cálculo da quantidade de carbono incorporada nas exportações revelou que dos produtos comercializados, aqueles com alto teor de carbono são os setores de Extrativa mineral; Agricultura, silvicultura e exploração florestal; e Minerais não-metálicos, que são os maiores exportadores e também considerados setores-chave.

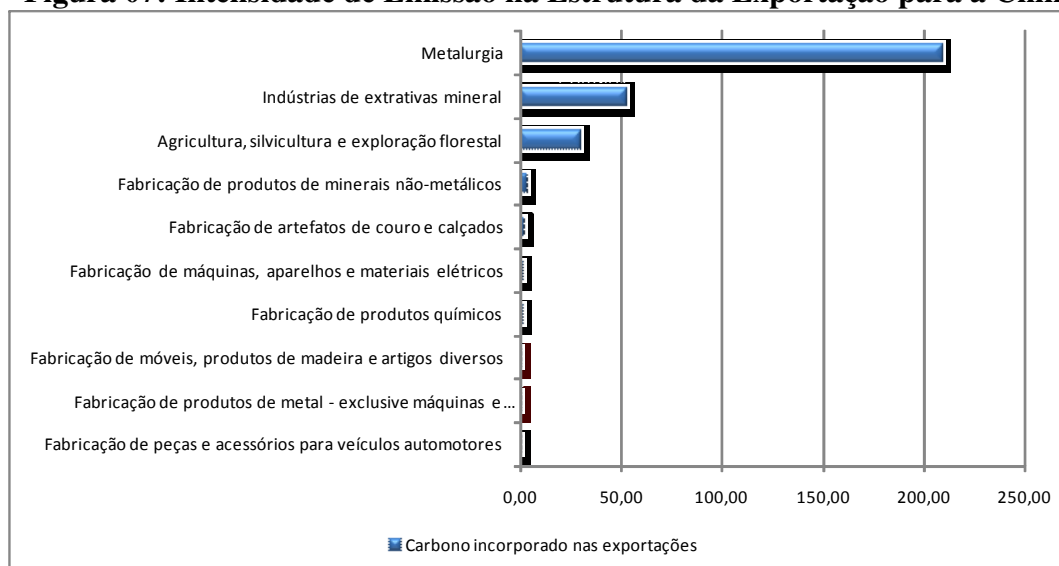
Figura 06: Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação para o EUA



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

A maior parte das exportações mineiras para a China se deve ao setor de metalurgia, que foi responsável por 65% das exportações em 2005, seguido pelos setores de Extrativas mineral (17%) e Fabricação de móveis, produtos de madeira e artigos diversos (4%). A Figura 07 mostra que os setores de Metalurgia; Extrativa mineral; e Agricultura, silvicultura e exploração florestal incorporam mais CO₂ em suas exportações. Esses três setores correspondem a 97% do total de CO₂ incorporado nas exportações. Assim, dois dos três setores mais exportadores de MG para a China possuem alto teor de carbono, já que a maior parte das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis está diretamente correlacionada, por exemplo, à metalurgia básica, que representam 65% das exportações.

Figura 07: Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação para a China

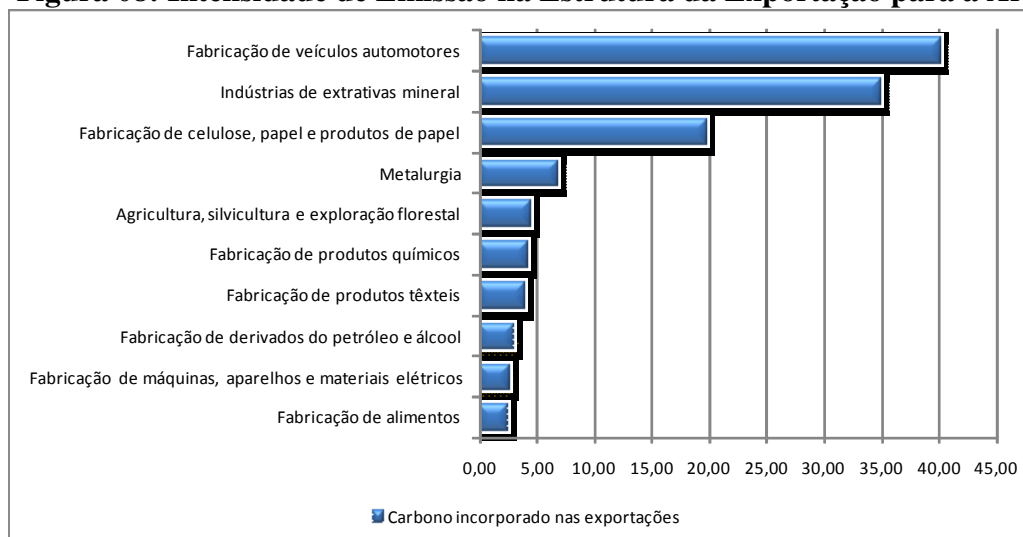


Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Dentre os países do MERCOSUL, a maior parte das exportações de Minas Gerais se concentra na Argentina, com cerca de 90% do total. Entre os setores mais exportadores, destacam-se os de Fabricação de veículos automotores com 41%; Extrativa mineral com 22%; e Fabricação de máquinas e equipamentos com 9%. Analisando a quantidade de CO₂

incorporado nas exportações (Figura 08), verifica-se que Fabricação de veículos automotores e Indústria de extrativa mineral também são os mais poluentes, com cerca de 40% e 35% do total do conteúdo de carbono, respectivamente.

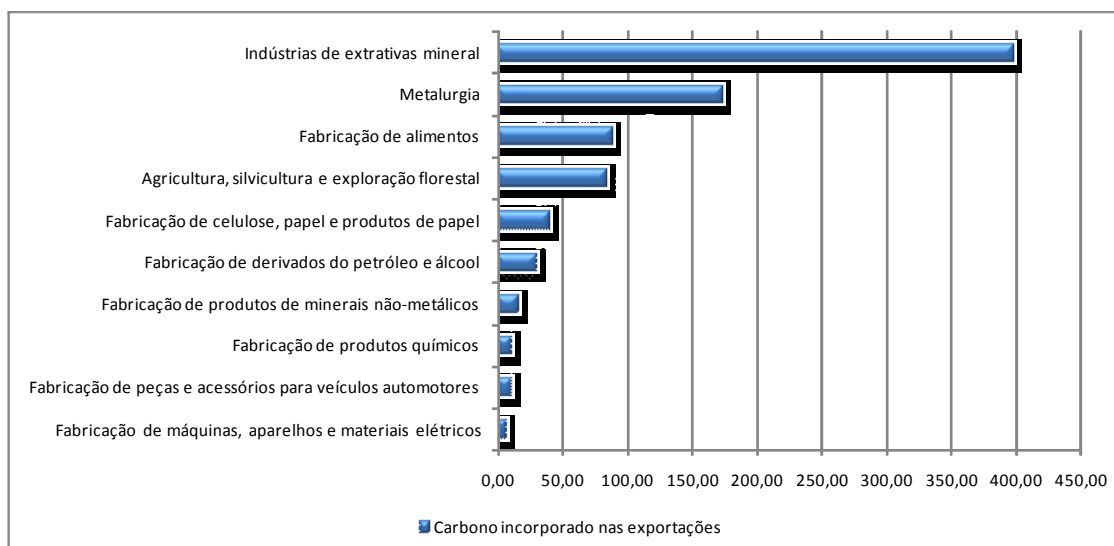
Figura 08: Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação para a Argentina



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Por fim, considerando as exportações para os demais países do mundo, observa-se que a pauta de exportações concentra-se nos setores de Indústrias de extrativa mineral (48%) e Metalurgia (14%). Em relação a quantidade de CO₂ incorporado nas exportações, a Figura 09 mostra que esses setores também são os mais poluentes.

Figura 09: Intensidade de Emissão na Estrutura da Exportação para o Resto do Mundo



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo procurou fazer uma análise sobre a intensidade e a incorporação das emissões de dióxido de carbono na pauta de exportações do estado de Minas Gerais em 2005, devido à queima de combustíveis fósseis em 35 setores de sua economia. O modelo foi construído a partir de uma tabela híbrida de insumo-produto regional, em que informações de vendas do setor de energia aos demais setores foram registrados em unidades físicas de emissão (Gg/tep), seguindo abordagens similares da literatura. Para alcançar os objetivos do trabalho, cálculos das elasticidades das emissões em relação às variações da demanda final foram feitos para encontrar os setores-chave (aqueles que pressionam e são pressionados a emitir) e também uma análise do conteúdo de carbono das exportações.

Os resultados mostraram que parte dos setores que são considerados chave, tais como Agricultura, Silvicultura e Exploração Florestal; Extrativa Mineral; e Metalurgia também são os que apresentam maior quantidade de carbono incorporado nas exportações, sugerindo que as principais atividades exportadoras do estado são intensivas em CO₂. Além disso, baseado na discussão de responsabilidade do consumidor, percebe-se que os grandes importadores e parceiros comerciais de MG estão consumindo principalmente dos setores intensivos em carbono, como Estados Unidos e União Européia, cujos setores dos quais mais importam são aqueles com maior teor de carbono incorporado e setores-chave.

China e Argentina, dos parceiros analisados, foram os únicos que apresentaram pelo menos um setor com baixo teor de carbono incorporado e que não é setor-chave dos três setores que eles mais compram de MG, caso do setor Fabricação de móveis, produtos de madeira e artigos diversos, para a China; e Fabricação de máquinas e equipamentos, para a Argentina. Portanto, em geral, apresentadas as duas exceções, todos os países importam mais das atividades intensivas em carbono. Essa conclusão é importante para os formuladores de políticas à medida que ao se adotar algum acordo de mitigação de emissões pode-se comprometer as exportações do estado, o que pode apresentar um elevado custo, e ao mesmo tempo, se região não participa de políticas de redução de emissões, algumas atividades com alto teor de carbono podem se deslocar para as mesmas.

No curto prazo, de acordo com as hipóteses adotadas no trabalho, há indícios de um *trade-off* entre restrições de emissões e nível de atividade, pois, nesse caso, a única forma de se reduzir a quantidade de CO₂ na economia é restringindo a produção dos setores. Também foi indicado neste trabalho que as emissões dependem das inter-relações entre as diversas

atividades produtivas. Dessa forma, a metodologia utilizada proporcionou informações relevantes para subsidiar a gestão e a formulação de políticas quanto à melhor estratégia de controle de emissões em Minas Gerais. Porém, não foi objetivo deste trabalho discutir quais medidas de políticas poderiam ser adotadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÁNTARA, V.; PADILLA, E. “Key” sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case. *Energy Economics*, n.31, p. 1676-1678, 2003.
- CARVALHO, T.S; PEROBELLI, F.S. Avaliação da intensidade de emissões de CO₂ setoriais e na estrutura de exportações: um modelo inter-regional de insumo-produto São Paulo/ restante do Brasil. *Economia Aplicada*, v. 13(1), p. 99-124, 2009
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. *23º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG, ano base 2007*. Disponível em < <http://www.cemig.com.br> > Acesso em 20 de dez. de 2009.
- Fundação João Pinheiro (FJP). *Anexo estatístico PIBMG-1995-2007*. Disponível em < <http://www.fjp.gov.br> > Acesso em 30 de jan. de 2010.
- GOWDY, J. M.; MILLER, J. L. Technological and demand change in energy use: an input-output analysis. *Environment and Planning A*, v. 19, n.10, p. 1387-1398, 1987.
- HILGEMBERG, E.M. *Quantificação e Efeitos Econômicos do Controle de Emissões de CO₂ Decorrentes do Uso de Gás Natural, Álcool e Derivados de Petróleo no Brasil: Um Modelo Interregional de Insumo-Produto*. 2005. 158f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- MACHADO, G.V. *Meio Ambiente e Comércio Exterior: Impactos da Especialização Comercial Brasileira sobre o Uso de Energia e as Emissões de Carbono do País*. 2002. 192f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- Matriz Energética e de Emissões. *ECONOMIA e ENRGIA*. v. 02 n. 24, 2000. Disponível em: < <http://www.ecen.com/matriz/> > Acesso em 12 de jan. de 2010.
- MILLER, R.; BLAIR, P. *Input-Output analysis: foundations and extensions*. New Jersey: Prentice-Hall, 2009. 782p.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Balanço Energético Nacional*, 2006. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br> > Acesso em mar. 2011.
- MONGELLI, I.; TASSIELLI, G.; NOTARNICOLA, B. Global Warnings agreements, international trade and energy/carbon embodiments: na input-output approach to the Italian case. *Energy Policy*, vol. 34, p. 88-100, 2006.
- NAKANO, S.; OKAMURA, A.; SAKURAI, N.; SUZUKI, M.; TOJO, Y.; YAMANO, N. The Measurement of CO₂ Embodiments in International Trade: evidence from the harmonised input-output and bilateral trade database. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, KEIO University, Japan, 2009.
- PEROBELLI, F. S.; MATTOS, R. S.; FARIA W. R. Interações energéticas entre o Estado de Minas Gerais e o restante do Brasil: uma análise inter-regional de insumo-produto. *Economia Aplicada*, v.11, n.1, p. 113 – 130. São Paulo, 2007.

PETERS, G. P.; HERTWICH, E. G. CO₂ Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy. *Policy Analysis*, vol. 42 (5), p. 1401-1407, 2008.

SCHAEFFER, R.; de SÁ, A. The embodiment of carbon associated with Brazilian imports and exports. *Energy Conversion and Management*, vol. 37, p. 955-960, 1996.

SU, B.; HUANG, H. C.; ANG, B. W.; ZHOU, P. Input-Output Analysis of CO₂ Emissions Embodied in Trade: the effects of sector aggregation. *Energy Economics*, vol. 32, p. 166-175, 2010.

WCED, 1987. *Nosso Futuro Comum*, 1. Ed. Brasileira. Rio de Janeiro: FGV, 1987.

Anexo 1: Formalização do Modelo de Insumo-Produto Regional com Setor de Emissões¹²

O modelo de insumo–produto regional é usado para representar as interações entre os diversos setores de uma economia e sua principal função é permitir avaliar os requerimentos de produção setorial necessários ao atendimento de uma dada estrutura setorial de demanda final por bens e serviços. A representação das relações intersetoriais é feita como segue:

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (01)$$

Uma extensão do modelo de insumo–produto é a análise que considera as emissões, em que determina o total de emissões geradas para entregar um produto à demanda final, tanto as emissões diretas geradas pelo processo de produção, como as emissões indiretas incorporadas nos insumos da indústria.

Em modelos de insumo–produto que incorporam emissões, trabalha-se com um conjunto de matrizes análogo ao modelo tradicional (equação 01), isto é, uma matriz de transações em emissões ou matriz de fluxos, uma matriz de geração direta de carbono, e finalmente, uma matriz de geração total de carbono. Com apenas uma pequena mudança na representação das transações intersetoriais no sistema convencional de insumo–produto, pode-se construir essas matrizes de insumo–produto.

A abordagem em unidades híbridas consiste em incorporar na tabela de *insumo–produto*, uma linha e uma coluna referentes ao setor de combustíveis energéticos. A nova linha descreve em unidades físicas (e.g., *Gg/tep*)¹³ as vendas do setor de combustíveis aos outros setores da economia e a sua coluna descreve em unidades monetárias (R\$) o total de compras feitas ao setor de combustíveis pelos demais. Após essa incorporação, é necessário recalcular a matriz de *insumo–produto* A e a inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$ devido aos novos fluxos da matriz (PEROBELLI *et al*, 2007).

Para começar, é preciso construir uma matriz de fluxos de emissões em unidades físicas considerando uma economia com (nxk) setores, onde k representa os setores de combustíveis. Desse modo, o vetor de fluxo de emissões E será de dimensão $k \times (nxk)$. Assumindo que as emissões consumidas pela demanda final (em unidades físicas) é dada por E_y e o consumo total de emissões é determinado por F (E_y e F são vetores coluna com k elementos). O fluxo de emissões pode ser representado por:

$$E_i + E_y = F \quad (02)$$

Onde i é um vetor coluna $(nx1)$ cujos elementos são números “um”. Essa equação mostra que as emissões totais consumidas (e produzidas) na economia são dadas pela soma das emissões consumidas pelo setor (do tipo descrito na linha de E) mais as emissões consumidas pela demanda final.

¹² Baseado em MILLER e BLAIR (1985).

¹³ *Gg/tep*: giga por tonelada equivalente de petróleo.

Por meio da matriz E , a matriz de transações *inter-setoriais* em unidades híbridas pode ser construída. Para tanto, deve-se substituir na matriz de transações *inter-setoriais* (Z) as linhas representando os fluxos de emissões em unidades monetárias pelas linhas que vão representar os fluxos de emissões em unidades físicas (e.g., Gg/tep). É necessário também, definir o produto total correspondente, X^* , e a demanda final, Y^* , como vetores para os quais o setor de combustíveis e os demais setores são similarmente medidos em unidades físicas e monetárias, respectivamente.

Considerando um modelo regional para Minas Gerais com n setores de atividade mais um setor de combustíveis, esquematicamente teríamos a tabela de insumo–produto em valores monetários e um vetor de emissões:

$$Z = \begin{matrix} & \begin{bmatrix} \$ & \$ \\ \vdots & \vdots \\ \$ & \$ \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} n \times n \end{matrix} & \end{matrix} \quad (03)$$

$$E = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 \times n \end{matrix} & [Gg/tep & \cdots & Gg/tep] \end{matrix} \quad (04)$$

Seja agora a nova tabela de insumo–produto Z^* , na qual, os fluxos de vendas de combustíveis são mensurados em unidades físicas e os outros fluxos em unidades monetárias (HILGEMBERG, 2004), isto é:

$$Z^* = \begin{matrix} & \begin{bmatrix} \$ & \$ & \cdots & \$ \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \$ & \$ & \cdots & \$ \\ Gg/tep & \cdots & \cdots & Gg/tep \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} (n+1) \times (n+1) \end{matrix} & \end{matrix} \quad (05)$$

Adotando o mesmo procedimento para a produção total (X) e demanda final (Y) por setor, é possível obter os seguintes vetores:

$$X^* = \begin{matrix} & \begin{bmatrix} \$ \\ \vdots \\ \$ \\ Gg/tep \end{bmatrix} \\ \end{matrix} \quad (06)$$

$$Y^* = \begin{matrix} & \begin{bmatrix} \$ \\ \vdots \\ \$ \\ Gg/tep \end{bmatrix} \\ \end{matrix} \quad (07)$$

Definindo $\hat{X} = diag(X^*)$, é possível construir uma matriz híbrida de coeficientes de requerimento direto como:

$$A^* = Z^* \left(\hat{X}^* \right)^{-1} \quad (08)$$

Cada elemento de A^* corresponde à proporção de insumos do setor i necessária à produção de R\$1,00 de produto do setor j . Assim, os elementos de A^* são chamados de coeficientes de requerimento direto.

Na forma matricial tem-se que:

$$A^* = \begin{bmatrix} \$ & \dots & \$ \\ \$ & \dots & Gg/tep \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Gg/tep & \dots & Gg/tep \\ \$ & \dots & Gg/tep \end{bmatrix} \quad (09)$$

O modelo de *insumo-produto* em unidades híbridas pode ser definido de forma análoga à expressão (01) e ser escrito da seguinte forma:

$$X^* = B^* Y^* \quad (10)$$

Onde $B^* = (I - A^*)^{-1}$ é a versão com elementos em unidades híbridas da matriz Inversa de Leontief.

A matriz híbrida de coeficientes de requerimento líquido total de emissões pode ser definida da seguinte maneira:

$$R^* = B^* - I^* \quad (11)$$

Onde I^* é a matriz identidade $(n+1) \times (n+1)$.

Para calcular a matriz de requerimentos indiretos Q^* , utiliza-se as matrizes R^* e A^* , desta forma, temos que:

$$Q^* = R^* - A^* \quad (12)$$

As matrizes A^* , R^* e Q^* fornecem as informações sobre o grau de dependências direta (que são os efeitos imediatos, dado uma variação da demanda final), total e indireta (capta os efeitos secundários de uma mudança da demanda final) entre os setores, respectivamente. No caso do presente trabalho, mostra a dependência existente entre todos os setores (geração de emissões), que são representados através do setor de combustíveis.

A matriz de requerimentos diretos e totais de emissões é obtida extraindo-se, as linhas dos fluxos de emissões de A^* e $(I - A^*)^{-1}$ respectivamente. Já que este trabalho se preocupa apenas com as informações do setor de combustíveis, é necessário que se extraia das matrizes descritas apenas as informações de requerimentos de emissões intersetoriais do setor de combustíveis. Para isso, é preciso criar uma matriz F^* ($n \times n$), onde os seus elementos que representam fluxos de emissões (em Gg/tep) são distribuídos ao longo da diagonal principal e os demais elementos que não são fluxos de emissões são representados por zeros.

$$F^* = \begin{bmatrix} Gg/tep & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Gg/tep & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Fazendo $F^* (\hat{X}^*)^{-1}$, tem-se uma matriz de zeros, referentes aos setores que não são de combustíveis, e números um (1), que denotam a localização do setor de combustíveis. Desta forma, ao se pós-multiplicar as matrizes de requerimentos diretos e de requerimentos totais de emissões por $F^* (\hat{X}^*)^{-1}$ recupera-se apenas os coeficientes de emissões, ou seja, a intensidade de carbono.

Assim, δ vai representar os requerimentos diretos e α os requerimentos totais:

$$\delta = F^* (\hat{X}^*)^{-1} A^* \quad (14)$$

$$\alpha = F^* (\hat{X}^*)^{-1} (I - A^*)^{-1} \quad (15)$$

Já os requerimentos indiretos, λ , são obtidos a partir da diferença entre os requerimentos totais (16) e os requerimentos diretos (15) de emissões:

$$\lambda = \hat{F}^* (\hat{X}^*)^{-1} [(I - A^*) - A^*] \quad (16)$$

Desta forma, assumindo que as emissões estejam linearmente relacionadas com os requerimentos de emissões fornecidos por (14), (15) e (16), é possível obter os requerimentos diretos, indiretos e totais de emissões, respectivamente.

Anexo 2: Desagregação dos setores do Balanço Energético de Minas Gerais

Setores matriz 2005	Setores BEEMG	Setores matriz 2005	Setores BEEMG	
Agríc., silvic. e expl. florestal	Agropecuária	Máquinas e equipamentos		
Pecuária e pesca		Máquinas, aparelhos e materiais elétricos		
Extrativas mineral	Mineração e Pelotização	Veículos automotores		
Alimentos	Alimentos e Bebidas	Peças e acessórios para veículos automotores	Outras indústrias	
Bebidas		Outros equipamentos de transporte	Cerâmica	
Produtos do fumo		Móveis, madeira e artigos diversos		
Produtos têxteis	Têxtil	Eletricidade, gás, água e limpeza urbana		
Artefatos de couro e calçados		Construção		
Vestuário e acessórios		Comércio		
Celulose e papel	Papel e Celulose	Serviços de informação	Comercial	
Borracha e plástico		Intermediação financeira e seguros		
Derivados do petróleo e álcool		Atividades imobiliárias e aluguel		
Farmacêuticos, perfumaria, higiene e limpeza	Química	Serviços de alojamento e alimentação		
Químicos		Serviços prestados às empresas		
Minerais não-metálicos	Cimento	Educação e saúde mercantil		
	Cal	Outros serviços		
	Não-ferrosos e outros metalúrgicos	Transporte, armazenagem e correio		Transportes
Metalurgia	Ferro gusa e aço integrado	Administração pública		Público
Metal - exclusive máquinas e equipamentos	Ferro gusa não integrado			
	Ferro ligas			
	Outros de siderurgia			