

JAMILSEN DE FREITAS SANTOS

**CRESCIMENTO ECONÔMICO E EMISSÃO DE CO₂ POR COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS: UMA ANÁLISE DA HIPÓTESE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Economia, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

JAMILSEN DE FREITAS SANTOS

**CRESCIMENTO ECONÔMICO E EMISSÃO DE CO₂ POR COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS: UMA ANÁLISE DA HIPÓTESE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Economia, para obtenção
do título de *Magister Scientiæ*.

APROVADA: 8 de setembro de 2009.

Prof. Dr. Alexandre Bragança Coelho
(Co-orientador)

Prof^ª. Dra. Silvia Harumi Toyoshima

Prof. Dr. Francisco Carlos C. Cassuce

Prof. Dr. Jader Fernandes Cirino

Prof^ª. Dra. Elaine Aparecida Fernandes
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Clovis e Penha, pelo amor, pelo incentivo, pelo esforço, pela minha formação e por todo apoio, sem o qual, não seria possível a realização deste estudo.

A toda minha família, por constituir minha fortaleza.

Aos meus amigos, pela ajuda, pelo ombro e pelas risadas.

A Hellen, pela inspiração e por cuidar tão bem da nossa filha, que está em seu ventre.

A professora Elaine, pela orientação.

Aos professores Alexandre e Marcelo, pelos conselhos valiosos.

A Universidade Federal de Viçosa, pela estrutura.

A todas as pessoas que contribuíram nesta conquista. Muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA	4
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	7
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1 A ECONOMIA E O AMBIENTE NATURAL.....	8
2.2. A RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO E POLUIÇÃO, O SURGIMENTO DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL.....	12
2.2.1. <i>Revisão de Literatura da Relação Entre Renda e Poluição</i>	12
2.2.2. <i>Fundamentação Teórica da Relação Entre Renda e Poluição</i>	18
2.3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	21
3. METODOLOGIA	25
3.1 O MODELO UTILIZADO PARA TESTAR A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL	26
3.2 DEMAIS FORMAS FUNCIONAIS A SEREM TESTADAS E A DEFINIÇÃO DOS MODELOS	27
3.3 PROCEDIMENTOS ECONÔMICOS	29
3.3.1 <i>A Escolha Entre a Abordagem de Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios</i>	29
3.3.2 <i>Os Testes Para Detecção de Heterocedasticidade e Autocorrelação</i>	31
3.3.3 <i>Testes de Raiz Unitária e Cointegração para Dados em Painel</i>	32
3.3.4 <i>Detecção de Quebra Estrutural</i>	33
3.3.5 <i>Critérios para Seleção de Modelos</i>	34
3.3.6 <i>O Método de Estimação MQGF</i>	34
3.4 PROCEDIMENTOS PARA EFETUAR PREVISÕES.....	36
4. FONTE DE DADOS	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 A RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE CARBONO E CRESCIMENTO ECONÔMICO	40
5.1.1 <i>Escolha da Abordagem e Teste de Violação dos Pressupostos</i>	40

5.1.2 Testes de Estacionariedade e Cointegração	41
5.1.3 A Identificação da Presença de Quebra Estrutural e as Regressões.....	42
5.1.4 A Escolha do Melhor Modelo – Teste Davidson-MacKinnon e os Critérios de Akaike e Schwarz.....	46
5.2 ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS	48
5.2.1 O Ajustamento da Função às Emissões Observadas no Brasil	48
5.2.2 Sustentabilidade Ambiental das Emissões Brasileiras Recentes e Projetadas.....	50
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS	57
ANEXO 1 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS.	65
ANEXO 2 – REGRESSÕES PRELIMINARES.....	66
ANEXO 3– A INTENSIDADE DE CARBONO NO TEMPO.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Emissões de CO ₂ no Brasil no ano de 1994	3
Tabela 2.1. Resumo dos principais resultados sobre a CKA.	15
Tabela 4.1. Estatística descritiva das variáveis	38
Tabela 5.1. Teste de Hausman	40
Tabela 5.2. Testes de violação dos pressupostos	41
Tabela 5.3. Aplicação dos testes de raiz unitária	41
Tabela 5.4. Estatísticas do Teste de Cointegração de Pedroni para dados em painel	42
Tabela 5.5. Significância dos coeficientes das <i>dummies</i> indicadoras de quebra estrutural	42
Tabela 5.6. Resultado da regressão para o modelo CKA, linear e log-log.	43
Tabela 5.7. Aplicação dos testes de raiz unitária aos resíduos das regressões.....	45
Tabela 5.8. Significância dos coeficientes que compõem o Teste Davidson-MacKinnon	46
Tabela 5.9. Critérios de Akaike e Schwarz para escolha do modelo com melhor ajuste.....	46
Tabela 5.10. As emissões para as próximas décadas	51
Tabela 5.11. Necessidade de redução das emissões por combustíveis fósseis	52
Tabela 5.12. Necessidade de redução das emissões totais	53
Tabela A.1. Índice de correlação entre as variáveis	65
Tabela A.2. Resultado da regressão para o modelo CKA, linear e log-log.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Emissões globais de CO ₂ , 1840 – 2004 (%)	2
Figura 2.1. Interação entre o meio ambiente e a economia.....	8
Figura 2.2. Modelo equilíbrio de materiais.....	9
Figura 2.3. Efeito limiar.....	11
Figura 2.4. Exemplo hipotético de uma Curva de Kuznets Ambiental.....	13
Figura 3.1. O efeito da variável tendência.....	27
Figura 3.2. Representação gráfica das diferentes funções.....	28
Figura 5.1. A relação entre PIB e emissões de carbono e de dióxido de carbono.....	47
Figura 5.2. Emissões efetivas e estimadas de carbono	49
Figura 5.3. Emissões efetivas e estimadas de CO ₂ e os erros ao longo do tempo.....	49
Figura 5.4 Projeções para as emissões brasileiras por combustível fóssil e as emissões sustentáveis <i>per capita</i>	52

RESUMO

SANTOS, Jamilsen de Freitas, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2009, **Crescimento econômico e emissão de CO₂ por combustíveis fósseis: uma análise da hipótese da Curva de Kuznets Ambiental**. Orientadora: Elaine Aparecida Fernandes. Co-orientadores: Alexandre Bragança Coelho e Marcelo José Braga.

A preocupação contemporânea com meio-ambiente instiga questionamentos quanto aos efeitos do crescimento econômico na degradação do ambiente natural e quanto a sustentabilidade do modelo de desenvolvimento. O aquecimento global é um dos problemas ambientais de maior importância da atualidade e sua principal causa é o aumento das emissões de dióxido de carbono no mundo. Este trabalho propõe verificar empiricamente a curva que melhor representa a relação entre emissão de CO₂ por combustíveis fósseis e PIB para 13 países e fazer previsões das emissões brasileiras para as próximas décadas utilizando a relação encontrada. A maioria dos estudos acerca do crescimento econômico e das emissões de CO₂ especulam sobre a existência de uma curva em formato de U invertido, chamada de Curva de Kuznets Ambiental (CKA), para representar a relação entre as duas variáveis. A hipótese da CKA defende que o crescimento econômico, a princípio, aumentaria a degradação ambiental, mas após atingir um ponto máximo esta tenderia a diminuir com o aumento da renda. Um argumento para este comportamento é que nas fases iniciais do desenvolvimento econômico há a mobilidade de uma economia agrária “limpa” para uma economia industrial intensiva em poluição e, posteriormente, para uma economia de serviços “limpos” (ARROW et al., 1995). Entretanto após alguns anos do surgimento da CKA surgem diversos trabalhos buscando fazer verificações mais rigorosas da Curva. Harbaugh et al. (2001) sugere que a evidência empírica da CKA é menos robusta do que parece, tomando como base o trabalho Grossman e Krueger (1995), o autor afirma que os resultados podem mudar com poucas alterações nas amostras, nas especificações prévias das variáveis ou no modelo utilizado. A crítica se fortalece no caso do dióxido de carbono como variável de degradação ambiental, o trabalho de Berrens et al. (2007) faz uma meta análise da CKA com 588 observações de 77

trabalhos e mostra que apenas 27% dos estudos estimaram um ponto de reversão, sendo que o formato de U-invertido não foi significativo para o caso do dióxido de carbono. Dada a heterogeneidade do debate, o presente estudo testou diferentes formas funcionais que relacionam crescimento econômico e emissões de gás carbônico por combustíveis fósseis, para isso empregou-se técnicas de regressão com dados em painel. As previsões das emissões brasileiras nas próximas décadas foram feitas utilizando-se a função estimada anteriormente juntamente com projeções de população e PIB obtidas em fontes secundárias. Os resultados indicam que a relação para os países observados, como um todo, tem a forma logarítmica, crescendo a taxas decrescentes. A partir dos resultados encontrados, é possível inferir que o crescimento econômico, por si só, não é capaz de promover um desenvolvimento sustentável em termos de emissões de dióxido de carbono. No caso brasileiro, políticas de redução de CO₂ devem ser implementadas com urgência, para promover a sustentabilidade ambiental. Considerando que a partir da década de 2020, as emissões por combustíveis fósseis nacionais deixam de ser sustentáveis, uma medida preventiva seria o estímulo a investimentos em novas tecnologias poupadoras de recursos naturais não-renováveis.

ABSTRACT

SANTOS, Jamilsen de Freitas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2009, **Economic growth and CO₂ emissions from fossil fuel: an analysis of the Environmental Kuznets Curve hypothesis.** Adviser: Elaine Aparecida Fernandes. Co-Advisers: Alexandre Bragança Coelho and Marcelo José Braga.

The contemporary concern with the environment instigates questions about the effects of economic growth in the degradation of the natural environment and the sustainability of the development model. Global warming is one of the most important environmental problems and its main cause is the increase in emissions of carbon dioxide in the world. This study proposes to verify empirically the curve that best represents the relationship between CO₂ emissions from fossil fuels and GDP for 13 countries and forecast the Brazilian emissions for the next decade using the relationship found. Most studies on economic growth and CO₂ have speculated on the existence of a inverted U-shaped curve, called the Environmental Kuznets Curve (EKC), to represent the relationship between the two variables. The hypothesis of EKC argues that economic growth, in principle, lead to environmental degradation, but after reaching a peak this tends to decrease with increasing income. An argument for this behavior is that in the early stages of economic development is the mobility of an agrarian economy "clean" for an industrial pollution-intensive economy and then to a "clean" service economy (ARROW et al., 1995). However after a few years after the emergence of EKC arise several studies trying to make more stringent checks of the curve. Harbaugh et al. (2001) suggests that the empirical evidence of EKC is less robust than it appears, based on the work of Grossman and Krueger (1995), the author states that the results can be modified with little change in the samples, in the model or on the prior specifications of the variables. The criticism is strengthened in the case of carbon dioxide as affected by environmental degradation, the work of Berrens et al. (2007) is a meta-analysis of EKC with 588

observations from 77 studies and shows that only 27% of the studies estimated a turning point, and the shape of inverted U-shape was not significant for the case of carbon dioxide. Given the heterogeneity of the debate, this study has tested different functional forms that relate economic growth and carbon emissions from fossil fuels, for that it was employed regression techniques with panel data. Estimates of the Brazilian emissions for the next decades were made using the function previously estimated with projections of population and GDP obtained from secondary sources. The results indicate that the relationship observed for the countries as a whole has the logarithmic form, growing at decreasing rates. From the results, we can infer that economic growth alone is not capable of promoting sustainable development in terms of emissions of carbon dioxide. In the Brazilian case, policies to reduce CO₂ should be implemented urgently to promote environmental sustainability. On the 2020s national emissions from fossil fuels are no longer sustainable, so preventive measures would be the stimulus to investment in new technologies that save non-renewable natural resources.

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

As consequências das atividades humanas sobre o meio ambiente têm ocupado espaço importante na literatura econômica mundial. Questões como a poluição do ar e gestão de resíduos são assuntos de grande relevância, já que existe uma preocupação com a sustentabilidade do desenvolvimento e, portanto, com a capacidade de sobrevivência das gerações futuras.

Ao longo do tempo, foram surgindo novas técnicas produtivas que propiciaram a intensificação na transformação da natureza pelo homem, enquanto a explosão demográfica foi responsável por tornar tal transformação geograficamente mais extensa. Esse processo, embora atenuado pela maior eficiência no uso dos recursos, tem um impacto significativo sobre a biosfera. O aquecimento global, causado pela intensificação do efeito estufa, é um desses impactos.

O aumento da concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre impede a dissipação do calor gerado por raios solares. Os GEE são compostos pelo dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorcarbonos (HFCs), Perfluorcarbonos (PFCs) e Hexafluoreto de enxofre (SF_6). Dentre estes gases, o dióxido de carbono representa 77% das emissões antropogênicas¹ medidas em CO_2 equivalente (CO_2e), sendo o gás de maior contribuição para o efeito estufa (BAUMERT, 2005).

A concentração de gás carbônico na atmosfera aumentou cerca de um terço desde o período pré-industrial, passando de 280 ppm^2 para 379 ppm em 2005. No mesmo período, a média da temperatura global aumentou cerca de 1 grau centígrado, conforme relatório IPCC

¹ Geradas pela atividade humana.

² Partes por milhão.

(2007). O mesmo relatório estima que a atual concentração de CO₂ excede valores normais dos últimos 650.000 anos.

Segundo Baumert (2005), os principais setores emissores de CO₂ pertencem a diferentes tipos de atividades econômicas. Geração de energia, indústria de transformação, transporte e desmatamento são atividades que podem ser citadas como exemplos. É importante destacar que o modelo de produção e consumo energético adotado tem tido a maior contribuição para o aumento antrópico (produzido pelo homem) do clima, devido ao uso intensivo dos recursos fósseis não renováveis: carvão mineral, petróleo e gás. Estes levam milhões de anos para se formarem e são chamados de não-renováveis exatamente porque não fecham seu "ciclo" de carbono em prazos compatíveis com as necessidades humanas e com o equilíbrio ambiental do planeta.

No que se refere aos principais países emissores (Figura 1.1), pode-se observar que no período analisado, os Estados Unidos foram o país que mais emitiram CO₂. Suas emissões representaram mais de ¼ das emissões totais. Em seguida, vem a Federação Russa, China, Alemanha, Reino Unido e Japão.

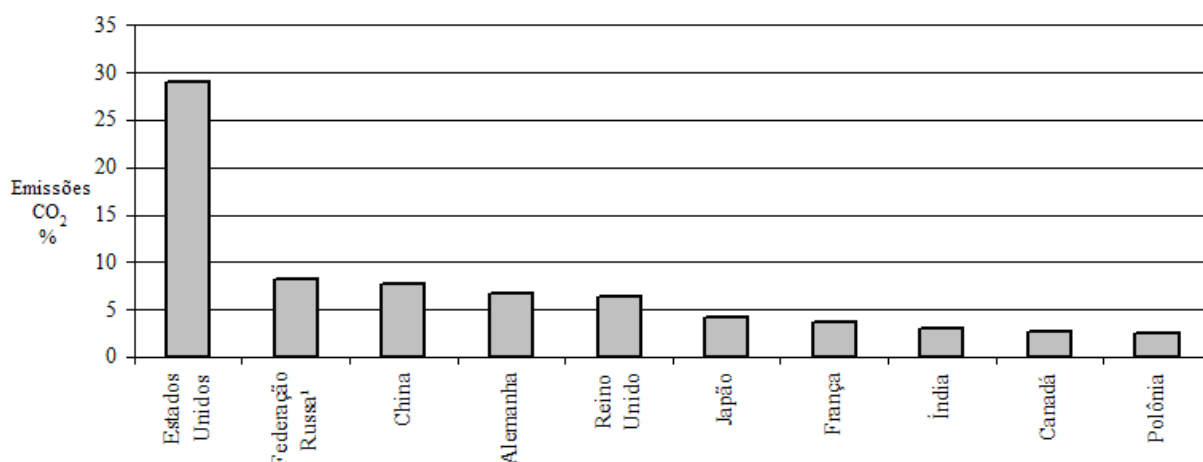


Figura 1.1. Emissões globais de CO₂, 1840 – 2004 (%)

¹ Inclui as emissões da URSS proporcional às emissões da Federação Russa.

Fonte: ONU (2007).

Quanto ao Brasil, suas emissões de CO₂ estão em torno de 1,84 toneladas/habitante. Nota-se que é um número bem inferior se comparado a países como Estados Unidos (19,61 toneladas/habitantes) e Japão (9,5 toneladas/habitantes) e é, por isso, que o Brasil não faz

parte do Anexo 1³ (EPE, 2008). Apesar de ser um valor inferior, relativamente a outros países, é importante observar que esse nível de emissões, dado o tamanho da população brasileira, contribui efetivamente para o aumento das emissões mundiais. Além disso, quando analisa-se as emissões via queimadas, observa-se que esta é responsável por 75% das emissões totais do país (Tabela 1.1).

O setor de transporte também é um grande poluidor e ocupa o segundo lugar no *ranking*, com 9% das emissões totais. A modalidade rodoviária é a grande responsável pelas maiores quantidades emitidas, representando mais de 88% da emissão de CO₂ do setor. O transporte rodoviário emitiu, em 1994, 83.302 Gt de CO₂, ou seja, 36% das emissões totais da queima de combustíveis fósseis no Brasil. Esse valor é superior as emissões de todo o setor industrial (32%) (MCT, 2006).

Dentre os combustíveis fósseis utilizados, o óleo diesel é o responsável pela maior parcela de emissões de CO₂, com 61% das emissões em 1994, seguido da gasolina com 28%. Os dois combustíveis juntos já contribuem com quase 90% das emissões do setor de transportes e 37% das emissões derivadas da queima de combustíveis fósseis em todos os setores do Brasil (MCT, 2006).

Tabela 1.1. Emissões de CO₂ no Brasil no ano de 1994

Fonte da emissão	CO ₂ t/ano	Participação (%)
Desmatamento e queimadas	776.331.000	75
Queima de combustíveis com transporte	94.324.000	9
Queima de combustíveis na industria	74.066.000	7
Queima de combustíveis em outros setores	42.511.000	4
Queima de combustíveis para geração de energia	25.602.000	3
Emissão em processos industriais	16.870.000	2
Total	1.029.706.000	100

Fonte: Inventário de emissões, MCT (2006).

Nota: A emissão em processos industriais acontece devido a reações químicas inerentes ao processo produtivo. Um exemplo é a emissão de CO₂ resultante da calcinação do calcário, que compõe o processo produtivo do cimento.

Em seguida, ocupando o terceiro, quarto, quinto e sexto lugares no *ranking* das fontes mais poluidoras, tem-se a queima de combustíveis na indústria, a queima de combustíveis por outros setores, queima de combustíveis para geração de energia e emissões em processos industriais, contribuindo com 7%, 4%, 3% e 2% respectivamente (Tabela 1.1).

³ O Anexo 1 é utilizado pelo Protocolo de Quioto para fazer referência aos países com maior volume de emissão.

É importante observar ainda que quando comparado o nível de emissão de CO₂ em relação a quantidade de energia fornecida, observa-se que a economia brasileira não difere significativamente de economias como a americana e a japonesa. Para cada tep (tonelada equivalente de petróleo) de energia ofertada internamente no Brasil, emite-se 1,57 toneladas de CO₂, enquanto que este número é de 2,49 para os EUA e 2,29 para o Japão (EPE, 2008). Diante desse contexto, e mesmo o Brasil não fazendo parte dos países que mais poluem, deve-se considerar o problema do nível de emissão elevado como uma realidade. Nesse sentido, torna-se fundamental uma maior precaução em relação aos impactos adversos das atividades humanas no meio ambiente.

1.2 O Problema e Sua Importância

São perceptíveis os desequilíbrios causados pela intervenção do homem no meio ambiente, sobretudo quanto às mudanças climáticas provocadas pela excessiva emissão e concentração de gases do efeito estufa. Esses gases são gerados principalmente pelas indústrias, veículos automotores, queimadas, dentre outras fontes, que levam ao aquecimento do planeta. Diversos estudos têm mostrado os resultados da degradação ambiental causada pela ação antrópica sobre o planeta, podendo-se citar como exemplos os trabalhos de Fritz et al (1998), MCT (1999), Rutherford et al (1997) e Seroa da Motta (2006).

A geração de energia, agricultura e processos industriais são responsáveis por 77% das emissões de gases do efeito estufa no mundo (ONU, 2007). Estas fontes são fortemente ligadas ao nível de atividade econômica, o que sugere uma interdependência entre as emissões e o crescimento econômico. No que se refere à composição do efeito estufa, o CO₂ é o gás que mais contribui para a sua formação e o recente aumento de sua concentração é consequência direta da atividade humana. Nesse sentido, é extremamente importante analisar a relação existente entre o CO₂ e o crescimento econômico, observando como essas variáveis se comportam ao longo do tempo.

A literatura econômica internacional trata de forma intensiva o tema crescimento econômico e emissões de CO₂. Autores como Nordhaus (1977), Selden e Song (1994), Grossman e Krueger (1995), Holtz-Eakin e Selden (1995), Barros et al. (2007) e Romero-Ávila (2008) podem ser citados como exemplos. Apesar dos inúmeros trabalhos na área, ainda não existe um consenso de como se processa essa relação. Inicialmente, acreditava-se que o crescimento econômico era diretamente proporcional às emissões de dióxido de carbono

[Nordhaus (1977) e Nordhaus (1991)]. Posteriormente, foram apresentadas evidências para a formulação da hipótese da existência de uma Curva de Kuznets Ambiental (CKA) [Grossman (1995), Selden e Song (1994), Holtz-Eakin e Selden (1995)]. Por fim, trabalhos como o de Shafik e Bandyopadhyay (1992), Shafik (1994) e Ansuategi e Escapa (2002) mostram que esse comportamento de U-invertido não ocorre para as emissões de CO₂. O formato da CKA depende do ambiente institucional, do progresso tecnológico e da composição setorial, sendo assim, poderia ser monotonicamente crescente, senoidal, U-invertido, ou qualquer outra forma que contemplasse as características institucionais vigentes.

A hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) defende que o crescimento econômico, a princípio, aumentaria a degradação ambiental, mas após atingir um ponto máximo, esta tenderia a diminuir com o aumento da renda (GROSSMAN, 1995). Isso significa que o formato da curva é explicado por meio de dois argumentos principais. O primeiro deles diz respeito à fase ascendente. Essa fase mostra o progresso natural do desenvolvimento econômico, passando-se de uma economia agrária “limpa” para uma economia industrial intensiva em poluição e, posteriormente, para uma economia de serviços “limpos” (ARROW et al., 1995). O segundo argumento explicaria a fase descendente da curva. Nesta fase, as economias desenvolvidas exportariam processos de produção intensivos em poluição para economias menos desenvolvidas (SURI e CHAPMAN, 1998).

Apesar de ser um assunto com forte repercussão internacional, não se tem conhecimento de numerosos trabalhos como este em países subdesenvolvidos. Dos trabalhos nacionais, merecem destaque os trabalhos de Arraes et al. (2006), que testaram a hipótese da CKA para diversos países: dentre as variáveis analisadas, a hipótese se confirmou para a emissão de dióxido de carbono; Sampaio e Maximo (2007) que verificaram a existência de uma relação em formato N⁴ entre CO₂ e crescimento econômico para o Brasil e Carvalho e Almeida (2008) que, para vários países, encontraram a trajetória N para as emissões de CO₂.

Portanto, ainda não está claro se a economia brasileira tenderia para um processo sustentável de crescimento com relação às emissões de CO₂. Diante do número incipiente de estudos e procurando contribuir para a literatura nacional existente, o presente trabalho propõe, primeiramente, verificar a curva que melhor represente a relação entre emissão de CO₂ por combustíveis fósseis e atividade econômica para um grupo de diversos países

⁴ O formato N é observado quando se testa a CKA com um polinômio de 3º grau, sendo que a condição para que isso ocorra é que os termos do polinômio apresentem sinais positivo, negativo e positivo novamente. Detalhes na revisão de literatura.

selecionados⁵. Em seguida, a relação encontrada entre as variáveis é utilizada para prever o comportamento das emissões brasileiras nas próximas décadas.

Diferentemente dos demais estudos, além de estabelecer uma relação entre renda e poluição que permite a ocorrência de diversas trajetórias, esta relação é aplicada para prever o comportamento do nível de emissões nacional para as próximas décadas, analisando a sustentabilidade ambiental do desenvolvimento brasileiro. Caso se refute a hipótese da CKA, é provável que haja um aumento das emissões mesmo no longo prazo, sendo necessário que se intensifique a política ambiental. Esta informação é muito importante para os tomadores de decisões tanto em nível público como privado, pois pode auxiliá-los a repensar o modelo de desenvolvimento seguido pelo país.

⁵ África do Sul, Austrália, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos da América, Índia, Itália, Japão, México, República da Coreia (Coreia do Sul), Reino Unido e Taiwan. Os países foram selecionados buscando diferentes níveis de crescimento econômico, isso é importante para trazer maior representatividade para a função encontrada. A dificuldade em prever as emissões brasileiras somente com seus registros passados se deve ao fato de que níveis de crescimento econômico ainda não alcançados pelo Brasil podem trazer mudanças no comportamento das variáveis, o que comprometeria as previsões. Detalhes do critério de seleção dos países encontram-se na seção Fonte de Dados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Verificar a relação existente entre crescimento econômico e emissão de dióxido de carbono por combustíveis fósseis nos países selecionados, analisando-se as perspectivas para o caso brasileiro nas próximas décadas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Especificamente, pretende-se:

- a) Estimar a melhor forma funcional que represente a relação entre emissão de CO₂ por combustíveis fósseis e a atividade econômica.
- b) Identificar em que ponto se encontra a economia brasileira e confrontar com o seu nível recentes de emissões.
- c) Prever os níveis de emissões brasileiras para as próximas quatro décadas.

2. Referencial Teórico

2.1 A Economia e o Ambiente Natural

O meio ambiente desempenha funções importantes em uma economia. Segundo Hanley et al. (1997), suas principais atribuições são ofertar recursos, receber resíduos, gerar amenidades diretamente e suprir condições vitais globais. É através destes papéis que o ambiente se relaciona com o sistema econômico formado por indivíduos, instituições e mercado. Estas relações são ilustradas na Figura 2.1.

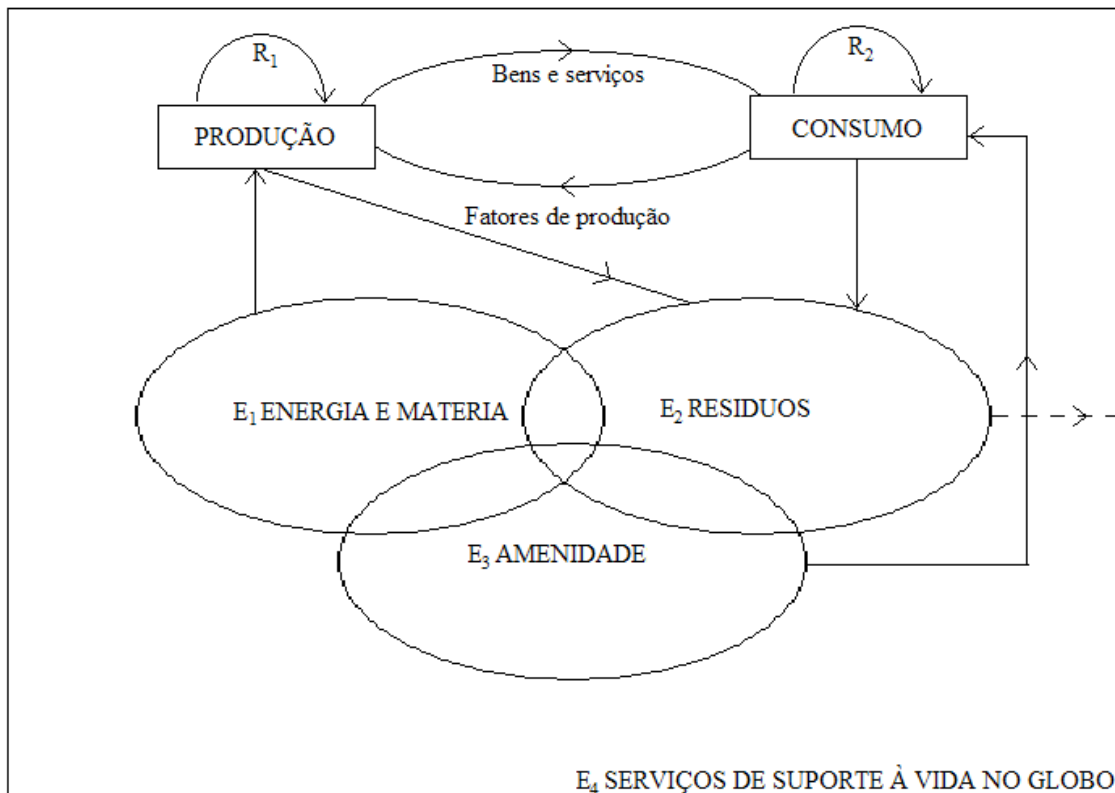


Figura 2.1. Interação entre o meio ambiente e a economia.

Fonte: Hanley et al. (1997)

Neste modelo os processos de reciclagem são indicados por R e as funções do meio ambiente por E . Com a oferta de recursos, o meio ambiente alimenta o processo produtivo. A partir desse processo, os insumos são transformados em produtos finais e consumidos. Tanto o processo de produção quanto o consumo geram resíduos, sendo esses objetos de grande

discussão na atualidade. Qual seria a capacidade de suporte do ambiente natural? Essa pergunta é feita por diversos autores⁶ na literatura econômica, como se pode verificar a seguir.

Segundo Callan e Thomas (2007), fornecer recursos e receber resíduos são as duas funções principais do meio ambiente. Entretanto, existe uma outra característica que está intimamente ligada ao papel desempenhado pelo mesmo: ele pode gerar amenidades diretamente, suprindo valores educacionais e espirituais para a sociedade. Um exemplo disso é o caso da motivação de dada comunidade para evitar a extinção de espécies animais quando não há nenhum interesse comercial em sua preservação. Finalmente, a natureza fornece as condições vitais globais para os seres humanos. A manutenção da temperatura e do clima e a reciclagem da água e dos nutrientes podem ser citadas como exemplos.

No intuito de estabelecer as ligações entre o meio ambiente e as instituições econômicas presentes no fluxo circular da renda, Kneese et al. (1970) desenvolveram o modelo de equilíbrio de materiais (MEM), Figura 2.2.

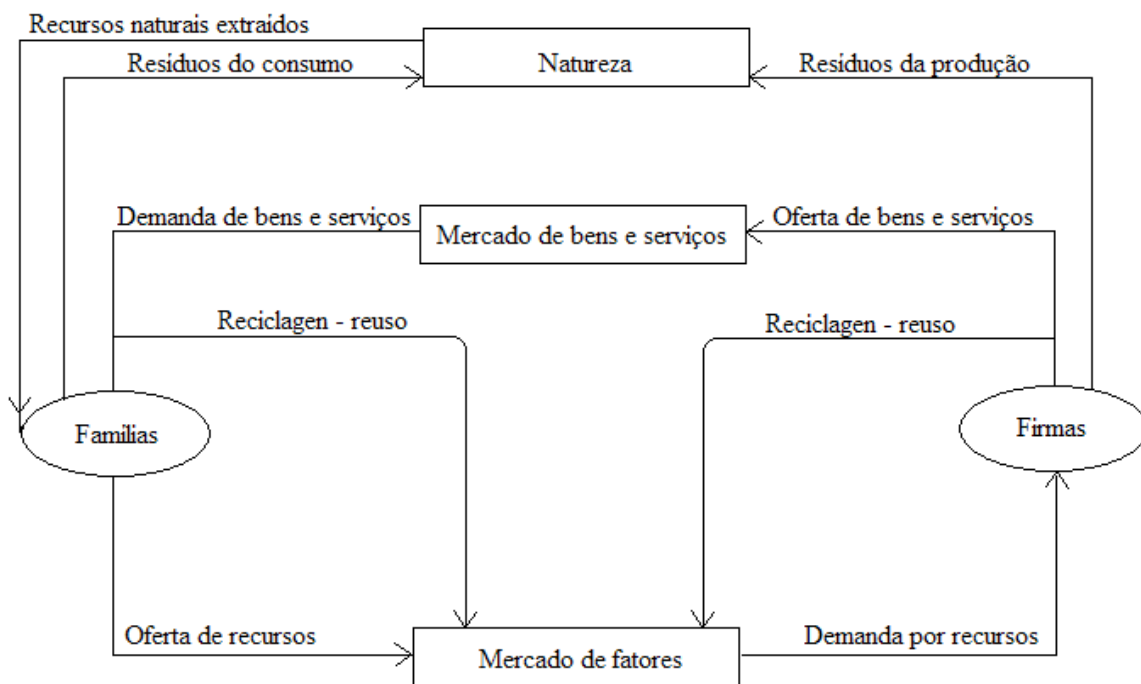


Figura 2.2. Modelo equilíbrio de materiais.

Fonte: Kneese et al. (1970).

Esse modelo dá ênfase aos atores que movem o fluxo de matéria e energia, colocando o fluxo circular da renda dentro de um esquema maior para mostrar as conexões existentes entre a economia e o meio-ambiente (Figura 2.2). Além dos fluxos reais e monetários usuais

⁶ Na seção que trata do desenvolvimento sustentável, faz-se inferências as duas correntes principais que tratam desse assunto: Economia Ambiental e Economia Ecológica.

do modelo circular da renda, no MEM existem fluxos internos, o que significa que os recursos podem ser recuperados e reciclados para outros usos ou reutilizados na sua forma existente. Entretanto, reciclagem e reuso não impedem que os resíduos sejam eventualmente despejados na natureza. O MEM mostra que todos os recursos retirados da natureza, em última instância, acabam voltando na forma de resíduos. Este fato é consequência de leis naturais ou processos físicos descritos nas chamadas duas leis da termodinâmica (GEORGESCU-ROGEN, 1971).

A primeira lei da termodinâmica afirma que, matéria e energia não podem ser criadas ou destruídas. Esta lei, que também é conhecida como “Princípio de equilíbrio de materiais”, diz que matéria pode ser convertida em energia, energia pode ser convertida em matéria e vice-versa, mas em um sistema fechado⁷ não pode haver mudança no estoque de matéria-energia. Apesar de a Terra não ser um sistema fechado, pois recebe energia do sol, menos de 1% da energia solar é convertida em energia química e isso é feito basicamente através do mecanismo de fotossíntese das plantas (HANLEY et al., 1997). Além de representar um limite à oferta de matéria-energia, a Primeira Lei da Termodinâmica tem uma importante implicação: à medida que mais matéria é extraída no processo de produção, mais resíduos são gerados. Estes resíduos devem, eventualmente, ser devolvidos à natureza, pois o conteúdo de matéria-energia não pode ser destruído. Este fato tem implicação clara na definição da quantidade de resíduos que devem ser despejados na natureza em qualquer processo de crescimento econômico e nos impactos decorrentes nos níveis de bem-estar da sociedade.

A segunda lei da termodinâmica, também conhecida como lei da entropia, afirma que, num sistema fechado, a utilização de matéria-energia causa um fluxo unidirecional de recursos de baixa entropia para recursos de alta entropia, ou seja, da ordem para a desordem (HANLEY *et al.*, 1997). Isso significa que a capacidade da natureza em converter matéria e energia não é ilimitada. Durante a conversão de energia, parte se torna inutilizável. Assim, o processo fundamental da qual a atividade econômica depende é finito, pois matéria e energia não podem ser recicladas de forma que se consiga de volta toda a capacidade original da fonte energética para realizar trabalho.

Nesse sentido, uma quantidade de gases emitidos pelo homem é reciclada por assimilação da atmosfera, entretanto as emissões de gases do efeito estufa excedem essa capacidade de assimilação. No curto prazo, a desutilidade gerada é o comprometimento da qualidade do ar, o que diz respeito às amenidades proporcionadas pelo meio ambiente. No longo prazo, o aumento exorbitante da concentração dos GEE comprometem a quarta função

⁷ Um sistema fechado é aquele que não troca matéria ou energia com o meio exterior.

do ambiente, que é suprir as condições vitais para o globo. Segundo Hanley et al. (1997), isto acontece devido ao *efeito limiar* (Figura 2.4).

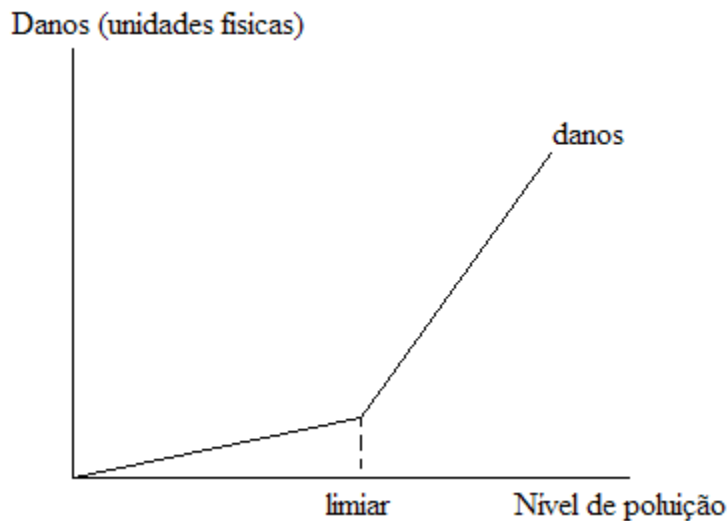


Figura 2.3. Efeito limiar.

Fonte: Hanley et al. (1997).

Através da Figura 2.4, pode-se notar que inicialmente, conforme a poluição aumenta, os danos aumentam em uma proporção X . Ao atingir um ponto limiar, os danos passam a aumentar em uma proporção $X + Z$. No caso das emissões de GEE, o ponto limiar será atingido quando desastres ambientais freqüentes tiverem suas causas atribuídas ao aquecimento global. Segundo IPCC (2007), alterações climáticas perigosas possivelmente vão acontecer caso a temperatura aumente 2°C acima dos níveis pré-industriais. O Relatório acrescenta que há grandes chances desse limite ser ultrapassado caso a concentração de GEE na atmosfera ultrapasse o limiar de 550 ppm de CO_2 equivalente (CO_2e).⁸ Considerando o longo tempo de permanência dos GEE na atmosfera, depois de ultrapassado este ponto é mais difícil reverter a situação, já que a diminuição das emissões demoraria para ter impacto negativo sensível na concentração dos Gases.

Portanto, o modelo de equilíbrio de materiais, amparado pelas duas primeiras leis da termodinâmica, e o conceito de efeito limiar trazem à tona a finitude da oferta de recursos do meio ambiente, a finitude da sua capacidade de receber resíduos, assim como a vulnerabilidade do papel de dar suporte à vida no planeta Terra. O comprometimento destas funções afeta igualmente a sociedade e a economia.

⁸ CO_2 equivalente é uma medida padronizada pela ONU para quantificar as emissões globais, usando como parâmetro o CO_2 . Os GEE possuem potenciais de poluição diferentes. O cálculo do CO_2e leva em conta essa diferença e é resultado da multiplicação das emissões de um determinado GEE pelo seu potencial de aquecimento global.

2.2. A Relação Entre Crescimento e Poluição, o Surgimento da Curva de Kuznets Ambiental

2.2.1. Revisão de Literatura da Relação Entre Renda e Poluição.

O aumento da preocupação com a degradação do meio ambiente nos anos que seguiram 1970 propiciou o surgimento de vários estudos relacionando esse tema à economia. D'Arge (1973) foi um dos pioneiros. Em seu trabalho, assume-se um cenário malthusiano, em que o crescimento da população e dos fluxos materiais degradaria o ambiente natural, levando a uma situação insustentável ao longo do tempo.

Nessa linha de raciocínio, Meadows et al. (1972) mostrava um crescimento exponencial da população, poluição e do produto com relação ao tempo. Implicitamente, assumia-se uma relação proporcional entre poluição e produto, uma premissa que só seria estudada a partir de 1990, quando trabalhos como os de Grossman e Krueger (1991) e Shafik e Bandyopadhyay (1992) começaram a argumentar que a representação gráfica entre poluição e produto se dava por meio de uma curva em formato de U-invertido.

O comportamento denominado “U-invertido” foi observado, originalmente, por Kuznets (1955) que propôs que a desigualdade de renda se relacionava com crescimento econômico na forma de uma trajetória de U-invertido. De forma semelhante, surge a Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que vai se consolidar em diversos estudos posteriores, como os de Grossman (1995), Ekins (1997) e Dijkgraaf e Vollebergh (2001). Estando o crescimento econômico no eixo horizontal e degradação ambiental no eixo vertical, pode-se exemplificar uma CKA conforme Figura 2.5.

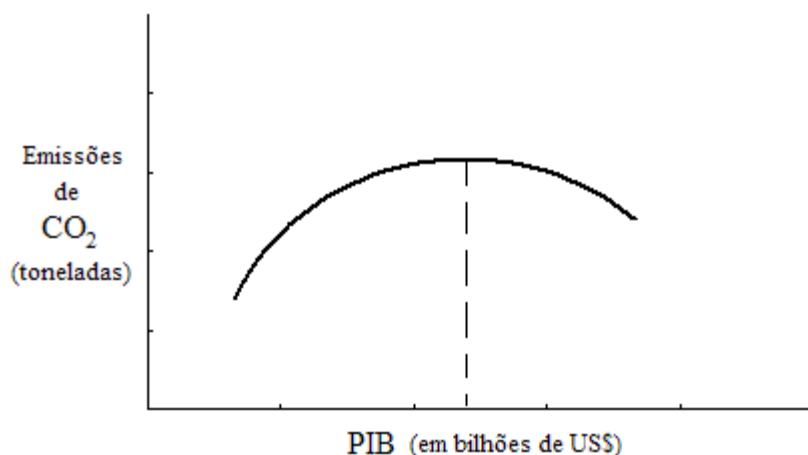


Figura 2.4. Exemplo hipotético de uma Curva de Kuznets Ambiental

Fonte: Elaboração própria.

A trajetória da CKA é justificada por diferentes linhas de argumentação que dialogam entre si. Grossman e Krueger (1991) relacionam as mudanças nas inclinações aos efeitos renda, composição e tecnologia. O efeito escala ocorre devido à pressão do aumento da renda negativamente sobre o meio ambiente, ou seja, conforme a renda vai aumentando, a degradação do ambiente aumenta também. O efeito composição atenua a degradação ambiental uma vez que a cadeia produtiva do país se reestrutura voltando-se para setores menos intensivos em poluição, neste caso a composição industrial se torna mais eficiente ambientalmente, por exemplo, ocorre com a mudança para uma economia baseada principalmente no setor de serviços. O efeito tecnologia, também responsável por diminuir o impacto ambiental, acontece quando o progresso tecnológico propicia um processo produtivo mais eficiente no uso dos recursos e no impacto ambiental. Logo, a curva passa a ser decrescente no momento em que os efeitos composição e tecnologia se sobrepõem ao efeito renda. O ponto em que os efeitos se anulariam seria o *turning point*, limite entre a primeira e a segunda fase.

Em trabalho posterior, Grossman e Krueger (1995), os mesmos autores do trabalho citado acima, argumentam também que quando as nações experimentam grande prosperidade seus cidadãos demandam mais atenção em aspectos não econômicos e que países ricos têm leis ambientais mais severas e efetivas. Semelhantemente, em Selden e Song (1994), defende-se a existência desta demanda social, atribuindo sua causa a maiores níveis de conscientização e educação ambiental. Outra abordagem é que os custos marginais de redução da degradação

ambiental são maiores do que os benefícios marginais nos níveis mais baixos de desenvolvimento econômico, até a renda atingir o ponto de reversão em que os benefícios marginais de conter a degradação ambiental passam a ser maior do que os custos marginais (MUNASINGHE, 1999). Os benefícios em reduzir a poluição se igualam aos custos da presença da poluição, este custo é a motivação para os cidadãos exigirem a regulação de impactos ambientais, portanto a degradação ambiental seria conduzida pelas políticas públicas para um formato de U-invertido. Segundo Barros et al. (2007) a demanda social de qualidade ambiental força os grupos políticos a modificarem o ambiente institucional, de forma que o ponto de reversão na CKA acontece quando se atinge a governança ambiental.

Uma abordagem diferente para o comportamento CKA está relacionada aos estágios de desenvolvimento econômico dos países. Em uma economia pré-industrial, baseada na agricultura, se produz quantidades limitadas de lixos biodegradáveis. Com a industrialização e a intensificação da extração de recursos, acontece o aumento da degradação ambiental até um ponto em que o aparecimento de novas tecnologias e a passagem para uma economia baseada no setor de serviços propicia a melhoria ambiental (PANAYOTOU, 2003).

Outra justificativa para a fase descendente da Curva são os portos de poluição, apresentada em Grossman e Krueger (1995). Nesta hipótese, países desenvolvidos deixariam de produzir bens intensivos em poluição, passando a importá-los ou migrariam plantas produtivas intensivas em extração e poluição para países subdesenvolvidos em que a regulamentação ambiental fosse menos rígida. Esta é uma forte crítica ao aspecto sustentável da CKA. Esse é um artifício que não poderá ser imitado pelos países não desenvolvidos, pois quando eles se desenvolverem, não haverá outros países para acolher plantas intensivas em poluição. Ou seja, a degradação ambiental não estaria diminuindo, e sim, sendo exportada, o que não poderia acontecer de forma recorrente.

A segunda crítica à hipótese da CKA, é que embora possa existir a curva no formato de U-invertido, o tempo necessário para se retornar a um nível de qualidade ambiental desejável pode ser muito longo e o conhecimento a respeito desse tempo é primordial para se fazer inferências. A crítica foi feita em Selden e Song (1994), pois se observou que os níveis de poluição não voltariam ao volume atual antes do final deste século. Este problema envolve também a questão do efeito limiar, uma vez que um ponto de reversão muito alto pode atingir um nível irreversível para o meio ambiente, o que ressalta a importância da identificação dos pontos de reversão (ARROW et al., 1995). Como exemplo de trabalho que identificou pontos de reversão factíveis tem-se Grossman e Krueger (1995), em que o pico do U-invertido estaria entre US\$ 4.053 e US\$ 14.000 de renda *per capita*. Sua amostra era composta por estados que

compunham a Alemanha, Estados Unidos e Inglaterra e as principais variáveis ambientais analisadas foram dióxido de enxofre, fumaça, partículas suspensas, coliformes fecais e metais pesados na contaminação dos rios, entre outras. A Tabela 2.1 resume os resultados dos estudos mais relevantes sobre a CKA.

Tabela 2.1. Resumo dos principais resultados sobre a CKA.

Autores	Variável dependente	Formato da curva	Ponto de reversão (PIB <i>per capita</i>)
Shafik e Bandyopadhyay (1992)	Falta de água limpa	Reta decrescente	-
	Falta de saneamento urbano	Reta decrescente	-
	Nível de matéria particulada	Quadrático	-
	SO ₂	U invertido	3.000
	Mudanças na área florestal	Quadrático	-
	Taxa anual de desmatamento	U invertido	2.000
	Oxigênio dissolvido nos rios	Quadrático	-
	Lixo municipal <i>per capita</i> (<i>pc</i>)	Quadrático	-
Panayotou (1993)	Emissões de carbono <i>pc</i>	U invertido	4.000
	SO ₂	U invertido	3.000
	NO _x	U invertido	5.500
	Material particulado suspenso	U invertido	4.500
	Taxa de desmatamento	U invertido	1.200
Grossman e Krueger (1993)	SO ₂	N	4.107 e 14.000
	Material particulado suspenso	N	Decrescente
	Fumaça	N	5.000 e 10.000
Shafik (1994)	Falta de água potável	Reta decrescente	-
	Falta de saneamento urbano	Reta decrescente	-
	Desmatamento anual	U invertido	-
	Desmatamento total	U invertido	-
	Oxigênio dissolvido nos rios	Reta decrescente	-
	Coliformes fecais em rios	N	1.375 e 11.500
	Material particulado suspenso	U invertido	3.280
	SO ₂	U invertido	3.670
Selden e Song (1994)	Lixo municipal <i>pc</i>	Reta decrescente	-
	Emissão de carbono <i>pc</i>	Reta decrescente	-
	Utilizando efeitos fixos:		
	SO ₂	N	10.700
	Material particulado suspenso	N	9.600
	NO _x	N	21.800
	CO	N	19.100
	Utilizando efeitos aleatórios:		
	SO ₂	N	8.900
	Material particulado suspenso	N	9.800
	NO _x	N	12.000
Grossman e Krueger (1995)	CO	N	6.200
	SO ₂	N	4.053 e 14.000
	Fumaça	N	6.151
	Partículas pesadas	N	Decrescente
	Oxigênio dissolvido	N	2.703
	Necessidade biológica de oxigênio	N	7.623
	Necessidade química de oxigênio	N	7.853
	Concentração de nitratos	N	10.524
	Coliformes fecais	N	7.955
	Coliformes totais	N	3.043
	Concentração de chumbo	N	1.887
	Cádmio	N	11.632
Arsênico	N	4.900	

Continuação da Tabela 2.1.

Autores	Variável dependente	Formato da curva	Ponto de reversão (PIB <i>per capita</i>)
	Mercurio	N	5.047
	Níquel	N	4.113
Unruh e Moomaw (1998)	CO ₂	N	-
de Bruyn et al. (1998)	CO ₂	Logarítmico	-
	NO _x	Logarítmico	-
	SO ₂	Logarítmico	-
Agras e Chapman (1999)	CO ₂	U invertido	13.630
	Energia	U invertido	62.000
Dijkgraaf e Vollebergh (2001)	CO ₂	U invertido	20.647
Friedl e Getzner (2002)	CO ₂	N	-
Perman e Stern (2003)	SO ₂	Logarítmica e CKA *	-
Lucena (2005)	CO ₂	Reta crescente	-
Carvalho e Almeida (2008)	CO ₂	N	16.912
Romero-Ávila (2008)	CO ₂	- *	-
Lee e Lee (2009)	CO ₂	- *	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: * A presença de séries não estacionárias dificulta a identificação robusta de uma forma funcional.

Após as primeiras verificações da Curva de Kuznets Ambiental, surgiram diversos trabalhos buscando fazer verificações mais exigentes da Curva. Harbaugh et al. (2001) sugere que a evidência empírica da CKA é menos robusta do que parece, tomando como base o trabalho de Grossman e Krueger (1995), os autores afirmam que os resultados podem mudar com poucas alterações nas amostras, nas especificações prévias das variáveis ou no modelo utilizado.

A grande maioria dos trabalhos que testa a relação CKA utiliza séries temporais. Na última década surgiram diversos estudos que voltaram o foco da atenção para o problema da não estacionariedade das séries que compõem os modelos analíticos [STERN e PERMAN (2003), FRIEDL e GETZNER (2003), STERN (2004), ROMERO-ÁVILA (2008) e LEE e LEE (2009)]. Como se pode observar na Tabela 2.1, nos dois últimos trabalhos não foi possível proceder com uma solução para as séries com tendências estocásticas, o que impossibilitou o reconhecimento de uma função que relacione a renda com a variável de degradação ambiental, que em ambos casos foi emissões de CO₂. Em Stern e Perman (2003), conclui-se que a base empírica da CKA não é robusta, sendo que a relação entre a renda e a degradação ambiental segue um comportamento crescente com taxas decrescentes com o passar do tempo, tendo uma elasticidade menor que um, mas não negativa. Stern (2004) acrescenta que o uso de métodos mais apropriados tende a indicar pontos de reversão mais altos e funções monotônicas crescentes.

Friedl e Getzner (2003) obtiveram uma função em formato N para a relação entre renda e emissões de CO₂ na Áustria. Foram expostas duas justificativas para o formato encontrado. A primeira é que a fase descendente poderia ser o efeito do choque do petróleo, uma vez que os autores identificam uma quebra estrutural em 1974 e a última fase ascendente ocorreria ao se dissiparem os efeitos do choque. A segunda justificativa é que poderia ser um resultado meramente estatístico. O formato N também foi encontrado em Martinez-Zarzoso e Bengochea-Morancho (2004) e em Carvalho e Almeida (2008). A abordagem teórica proposta em Barros et al. (2007) argumenta que a fase descendente da CKA ocorre devido à eficácia do serviço regulatório, mas que esse pode se congestionar fazendo com que haja uma segunda fase ascendente, descrevendo assim, um formato N. Os autores acreditam que este congestionamento pode ocorrer em caso de licenças ambientais paralisadas, fiscalizações insuficientes, morosidade das decisões dos tribunais, etc. O formato N é observado quando se testa a CKA com um polinômio de 3º grau, sendo que a condição para que isso ocorra é que os termos do polinômio apresentem sinais positivo, negativo e positivo novamente.

Diversos resultados apontam para trajetórias crescentes⁹. Funções crescentes seguem o argumento de que quanto mais se produz mais se degrada. Tal o comportamento pode ser descrito por uma reta, uma função exponencial ou uma função logarítmica, em que as respectivas inclinações variam com a intensidade de degradação. As funções crescentes são frequentes quando a variável de degradação ambiental é o nível de emissões de CO₂, sendo que sua trajetória mais comum descreve o formato dos Novos Tóxicos¹⁰ [CAVIGLIA-HARRIS et al. (2008), STERN e PERMAN (2003), STERN (2004)]. A particularidade do dióxido de carbono foi consolidada empiricamente em Berrens et al. (2007), onde foi feita uma meta análise da CKA com 588 observações de 77 trabalhos. Apenas 27% dos estudos estimaram um ponto de reversão e o formato de U-invertido não foi significativo para o caso do dióxido de carbono.

Segundo Arrow et al. (1995), a relação de U-invertido não é válida para o dióxido de carbono porque este poluente é persistente no longo-prazo e seus custos são mais dispersos. Ansuategi e Escapa (2002) atribui este comportamento do CO₂ ao fato de que este gera uma desutilidade global e não local. Dessa forma, os países têm poucos incentivos para executar um esquema de controle de poluição unilateral, de maneira que este poluente cresce de forma monotônica. Os autores acrescentam ainda que sociedades com planejadores sociais míopes

⁹ Verificadas por Shafik e Bandyopadhyay (1992), Maddison (2005) e Shafik (1994).

¹⁰ Trajetória apresentada por Dasgupta et al. (2002), descrita por uma função crescente com taxas de crescimento decrescentes.

provavelmente seguem caminhos de crescimento degradativo e que só uma iniciativa política multilateral será capaz de implementar as transferências intergeracionais.

Como são diversas as possibilidades de trajetória, para descrever corretamente a relação entre as variáveis, o trabalho deve estar apto para captar diferentes funções. Não obstante, tem-se que as funções mais esperadas são as crescentes.

2.2.2. Fundamentação Teórica da Relação Entre Renda e Poluição.

A relação entre poluição e meio ambiente, e conseqüentemente a CKA pode ser fundamentada teoricamente por modelos estáticos e dinâmicos de otimização que consideram a degradação ambiental de forma endógena. Um modelo, desenvolvido por Xepapadeas (2005), unifica um módulo econômico baseado na tecnologia e preferências, que caracteriza o problema econômico, com um módulo ambiental que caracteriza a acumulação da poluição. Para o autor, os principais argumentos que relacionam o módulo ambiental ao módulo econômico são:

- Poluição é um subproduto dos processos de produção ou consumo;
- Emissões geradas no módulo econômico afetam o fluxo ou a acumulação de poluentes no meio ambiente;
- Poluição tem efeitos prejudiciais na utilidade dos indivíduos; e
- Poluição pode ter efeitos prejudiciais na produtividade.

O ponto de partida para o desenvolvimento do modelo é a função de produção agregada neoclássica para a economia, expressa por:

$$Y = F(K, AL) \tag{2.1}$$

em que Y é o nível de produto, K é o capital produtivo e AL é o trabalho efetivo que agrega os choques da mudança tecnológica na produtividade do trabalho. A inclusão da poluição no modelo acrescenta os esforços para o abatimento da poluição na função de produção através da variável capital de abatimento, Ka , resultando na expressão:

$$Y = F(K, AL, Ka) \tag{2.2}$$

Pode-se dizer que o capital produtivo gera a poluição, enquanto o capital de abatimento reduz a poluição. O capital produtivo pode ser medido em unidades de eficiência, tomando notação: $k=K/(AL)$. Desta forma, a evolução do estoque de capital é expressa por:

$$\dot{k} = f(k) - c - a - \delta k \quad (2.3)$$

em que $f(k)$ deriva da função de produção neoclássica padrão, c é o consumo, a é redução da poluição e δ é a taxa de depreciação do capital. O abatimento é agregado à Expressão 2.3, influenciando negativamente a evolução do estoque de capital.

O fluxo de poluição gerado ao longo tempo está relacionado principalmente ao nível de produção, sua representação é dada pela função de emissão: $Z = v(Y)$, ou $Z = v(\kappa, a)$.

A dimensão ambiental é introduzida na função de utilidade ao se considerar que tanto o consumo quanto a poluição irão determinar a satisfação dos indivíduos. Em uma economia descentralizada, os indivíduos tratam a qualidade ambiental como fixa ao maximizarem suas utilidades. É importante ressaltar que o impacto da poluição se dá sob a forma de uma desutilidade. Portanto, para o i -ésimo indivíduo, tem-se: $U(c_i, Z)$.

Existem três situações básicas para o desenvolvimento do seu modelo. A primeira delas diz respeito à economia estar em uma trajetória socialmente ótima. Uma segunda situação contempla uma economia que possui uma trajetória que foge ao caminho ótimo. Por fim, uma terceira situação exemplifica um modelo com regulação ambiental.

O modelo parte do problema de maximização da diferença entre a utilidade do consumo e a desutilidade da poluição, como se segue:

$$\max_{\{a(t), \{c(t)\}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [U(c) - D(Z)] dt, \quad D' > 0, D'' > 0 \quad (2.4)$$

$$\text{s.a.} \quad \dot{k} = f(k) - c - a - \delta k$$

em que t é o período de tempo, ρ é a taxa de desconto da utilidade, $U(c)$ é a utilidade em função do consumo e $D(Z)$ é a desutilidade em função da poluição. A partir daí, tem-se o Hamiltoniano expresso por:

$$H = U(c) - D(v(k, a)) + q(f(k) - c - a - \delta k)$$

sua diferenciação fornece as seguintes condições de primeira ordem:

$$U(c) = q$$

$$D'v(k, a) = q$$

No caso da economia no caminho socialmente ótimo, tem-se que o nível de diminuição ótima da poluição de curto prazo é $a=\tilde{a}(c,k)$. Diferenciando-se a função de utilidade com respeito ao tempo, encontra-se o sistema dinâmico que caracteriza a evolução da economia como segue:

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\eta} \left[f'(k) - \frac{D'v_k(k, \tilde{a}(c,k))}{U_c(c)} - \rho - \delta \right] \quad \text{e} \quad (2.5)$$

$$\dot{k} = f(k) - c - \tilde{a}(c,k) - \delta k$$

que implicam a relação renda-poluição para a primeira situação:

$$RRP = \{(Z,y): Z=v(k, \tilde{a}(c,k)), y=f(k)\} \quad (2.6)$$

No caso de uma economia em que se ignora a poluição e não há regulação ambiental, nota-se que o termo referente à desutilidade é extraído da função consumo, representada pela Expressão 2.5, resultando na Expressão 2.7. As taxas de crescimento desta economia obedecem ao sistema dinâmico:

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\eta} [f'(k) - \rho - \delta] \quad \text{e} \quad (2.7)$$

$$\dot{k} = f(k) - c - \delta k$$

e sua relação renda-poluição é dada por:

$$RRP = \{(Z,y): Z=v(k,0), y=f(k)\} \quad (2.8)$$

Na situação em que há imposto sobre as emissões, a firma competitiva se depara com seguinte função maximizadora de lucros:

$$\max_{k,a} f(k) - (r + \delta)k - a - \tau v(k,a)$$

em que τ representa o imposto sobre as emissões, este é cobrado pelo governo e passa a ser agregado aos critérios de decisões da firma maximizadora de lucros. Diferenciando-se com relação ao capital e a “ a ”, encontram-se as condições de primeira ordem:

$$f'(k) = r + \delta + \tau v_k(k, a)$$

$$1 = \tau v_a(k, a)$$

Atualizando a função do capital no modelo ótimo e definindo a diminuição de curto prazo com regulação $a = \tilde{a}(k, \tau)$, o sistema dinâmico fica:

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\eta} [f'(k) - \tau v_k(k, a(k, \tau)) - \rho - \delta] \quad e$$

$$\dot{k} = f(k) - c - \tilde{a}(k, \tau) - \delta k$$

chegando-se à seguinte relação renda-poluição:

$$RRP = \{(Z, y): Z = v(k, \tilde{a}(k, \tau)), y = f(k)\}. \quad (2.9)$$

Portanto, a abordagem de modelos de otimização justifica a existência de diferentes formas funcionais para descrever a relação renda-poluição, inclusive o formato de U-invertido. A definição desta trajetória depende de fatores como o estoque de capital, preferências dos consumidores, parâmetros tecnológicos e regulação, como se verificou nas diversas situações representadas pelas Expressões 2.6., 2.8 e 2.9 (XEPAPADEAS, 2005).

2.3. Desenvolvimento Sustentável

A partir do século XIX, com a intensificação do processo de industrialização e dos sistemas agropecuários, a demanda por recursos naturais e os danos ao meio ambiente tornaram-se crescentes. A partir da década de 1970, surge o conceito de desenvolvimento que incorporava a preocupação com o meio ambiente. O marco inicial foi a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano em Estocolmo (Suécia) em 1972. Representantes de vários países discutiram a problemática ambiental e sua proporção em âmbito global. Nessa Conferência, os 113 países participantes definiram as diretrizes da política ambiental da ONU para os 20 anos subsequentes.

Ganha destaque na Conferência o relatório “Limites do Crescimento”, elaborado e publicado em 1972 por um grupo de cientistas e acadêmicos denominados Clube de Roma.

De concepção neo-malthusiana, o relatório recebe várias críticas por defender o chamado “crescimento zero” e ignorar as diferenças existentes entre países ricos e pobres quanto aos padrões de consumo dos recursos naturais. Embora os pesquisadores não tivessem proposto que crescimento era o mesmo que desenvolvimento e que “crescimento zero” não implicaria estagnação, o estudo foi bastante criticado.

O enfoque do “crescimento zero” foi superado e ganha importância crescente o conceito de Ecodesenvolvimento. Em 1973, Maurice Strong elaborou a sua proposta de desenvolvimento, onde se recomendava a utilização mais racional de ecossistemas locais, valorizando o conhecimento das populações envolvidas no processo produtivo. Esta proposta foi desenvolvida por Sachs em diversos trabalhos [SACHS (1975, 1990, 1993)]. O Ecodesenvolvimento procurou se apoiar em cinco dimensões da sustentabilidade: a social, a econômica, a ecológica, a espacial e a cultural. De forma resumida, seu enfoque principal consiste em relacionar o planejamento de estratégias plurais de harmonização entre as atividades de dinamização socioeconômica e o trabalho de gestão racional do meio ambiente (CIRINO, 2005).

Paralelamente, surge o conceito de desenvolvimento sustentável que vem em um contexto de controvérsia sobre as relações entre crescimento econômico e meio ambiente. Ele emerge deste contexto como uma proposição conciliadora, onde se reconhece que o progresso técnico efetivamente relativiza os limites ambientais, mas não os elimina. Em adição, também se considera que o crescimento econômico é condição necessária, mas não suficiente para a eliminação da pobreza e disparidades sociais. O conceito de desenvolvimento sustentável se consolidou no Relatório da Comissão Mundial sobre o Meio-Ambiente e Desenvolvimento da ONU de 1987 conhecido como “*Our Common Future*” ou “Relatório Brundtland”. Esse relatório, estava centrado em três eixos principais: crescimento econômico, equidade social e equilíbrio ecológico.

O Relatório Brundtland implica duas suposições básicas: o desenvolvimento deve permitir a ampliação, ou pelo menos a manutenção, da qualidade de vida em um horizonte temporal longo; e manutenção do estoque de capital, incluindo os recursos naturais. Neste relatório, o desenvolvimento sustentável foi definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. Isso significa que o crescimento econômico pode causar um aumento da renda nacional, mas ele deve ser acompanhado também por uma melhora e ou conservação ambiental (CIRINO, 2005).

Na década de 1990, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), realizada no Rio de Janeiro, trouxe o tema de volta ao foco da agenda política internacional. Nessa Conferência, apesar dos conflitos de interesses presentes, foi elaborado um programa de ação de longo prazo e amplo impacto internacional, a Agenda 21, no qual lançaram-se algumas bases para se praticar, em termos globais, o emergente conceito de desenvolvimento sustentável.

Os resultados da Eco-92 desdobraram-se, em termos de instrumentos de mensuração, a partir de agosto de 1994, com a realização da *Conference and Workshop on Indicators of Sustainability* – CWIS. Segundo Hart (1994), embora já existissem algumas iniciativas de concepção de metodologias para aplicação de instrumentos de mensuração, a CWIS possibilitou alguns avanços, entre os quais se destacaram: a) reconhecimento de diferentes definições de sustentabilidade; b) necessidade de uma metodologia adequada para o uso efetivo de indicadores de sustentabilidade e; c) constatação do interesse governamental e privado no tema.

Com a realização da CWIS, aumenta-se o interesse em se medir efetivamente o desenvolvimento sustentável. A medida mais comum de desenvolvimento é o PIB, e muitas são suas limitações (a dificuldade em se distinguir as classes sociais e ignorar se a utilização de recursos é prudente ou não) (REDCLIFT, 1992). Esta lacuna só pode ser preenchida por conhecimentos multidisciplinares. Em 1996, a Comissão para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas publicou metodologias para diversos indicadores. Nos anos de 2002 e 2004, foram lançados os primeiros indicadores brasileiros de desenvolvimento sustentável pelo IBGE, mas ainda não existe um único indicador que seja suficientemente descritivo quanto a sustentabilidade do desenvolvimento .

A concentração de gases do efeito estufa na atmosfera é um indicador de desenvolvimento sustentável no aspecto ambiental. O aquecimento global causaria danos à natureza, à economia e conseqüentemente a toda sociedade, o que comprometeria o desenvolvimento sustentável. Alguns trabalhos estimam o limite máximo tolerável da concentração de GEE na atmosfera e traçam trajetórias desejáveis de redução de emissões. Segundo ONU (2007), a concentração máxima de GEE deve ser de 450 ppm de CO_{2e}, sendo que as emissões mundiais devem ser de 14,5 Gt de CO_{2e} por ano para obedecer este limite.

Este limite difere do relatório Stern (2006), que considera a concentração máxima 550 ppm de CO_{2e} na atmosfera. A autor corrobora a hipótese do triângulo de estabilização proposta por Pacala e Socolow (2004) que sugere a estabilização das emissões mundiais de dióxido de carbono em 25 Gt. Portanto, esta seria uma visão mais otimista para uma trajetória

sustentável de emissões de CO₂. É evidente que este é só um dos inúmeros requisitos para a promoção do desenvolvimento sustentável, no entanto é indispensável.

3. Metodologia

No presente trabalho, estimou-se as funções que relacionam emissões de gás carbônico (CO₂) e Produto Interno Bruto *per capita* (PIB *per capita*) para um conjunto de países. Os países foram selecionados buscando diferentes níveis de crescimento econômico, isso é importante para trazer maior representatividade para a função encontrada. A dificuldade em prever as emissões brasileiras somente com seus registros passados se deve ao fato de que níveis de crescimento econômico ainda não alcançados pelo Brasil podem trazer mudanças no comportamento das variáveis, o que comprometeria as previsões.

Utilizando as funções obtidas, foram feitas inferências quanto aos efeitos do crescimento econômico sobre a poluição por gás carbônico no atual estágio de desenvolvimento brasileiro. Para isso, deve-se:

- Primeiro, testar a melhor função que descreve a relação entre emissão de CO₂ por combustíveis fósseis e PIB de forma geral para vários países utilizando dados em painel;
- Segundo, considerando o PIB brasileiro, comparar os níveis de emissões recentes com os níveis de emissões previstos na função obtida no primeiro passo; e
- Terceiro, utilizando projeções de PIB e população, estimar os níveis de emissões para as próximas décadas até 2050.

Grande parte da literatura existente diz que a relação entre CO₂ e PIB *per capita* se dá via uma curva no formato de U-invertido, denominada Curva de Kuznets Ambiental. Com o objetivo de testar essa curva, as metodologias já consolidadas tratam as variáveis independentes, como polinômios de PIB *per capita* de no mínimo dois graus e incluem variáveis explicativas adicionais com o intuito de isolar o efeito do crescimento econômico sobre a degradação ambiental¹¹. Cabe ressaltar que conforme os sinais dos polinômios, a curva pode assumir um formato de U, U-invertido, N ou N-invertido. Além da hipótese da CKA foram testadas diversas formas funcionais para descrever a relação entre as variáveis emissões de CO₂ por combustíveis fósseis e crescimento econômico. Os critérios adicionais de escolha dos modelos são expostos nas próximas subseções, assim como os métodos de estimação e as técnicas de análise da função.

¹¹ Cf. Selden e Song (1994) e Grossman (1995).

3.1 O Modelo Utilizado Para Testar a Curva de Kuznets Ambiental

A escolha dos modelos a serem usados para testar a CKA teve os trabalhos de Selden e Song (1994) e Grossman e Krueger (1995) como ponto de partida. A semelhança desses está em deixar a degradação ambiental como variável dependente e um polinômio do PIB como parte das variáveis explicativas. Como resultado, tem-se que o modelo que será utilizado neste trabalho é:

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 PIB_{it}^2 + \beta_3 PIB_{it}^3 + \beta_4 POP_{it} + E_{it} \quad (3.1)$$

em que i é o indexador de país, t indexador de tempo, CO_2 é a quantidade de emissão de gás carbônico, PIB é o Produto Interno Bruto *per capita*, POP é a população, E é o termo de erros e os β_s são os coeficientes. Para chegar a estes modelos foi necessário fazer as seguintes escolhas: optar entre um polinômio de 2° e de 3° grau; optar entre a variável densidade demográfica e população; e usar ou não usar a variável tendência.

Selden e Song (1994) utilizaram um modelo com polinômio de 2° grau; já o modelo utilizado por Grossman (1995) adiciona um grau ao polinômio PIB. Esse modelo é mais completo por ter possibilidades de captar mais formas funcionais, como por exemplo, o formato N, sem que isso aconteça em detrimento do formato de U ou U-invertido. Dada a versatilidade do polinômio de 3° grau, optou-se por este.

Uma variável adicional utilizada nos modelos citados foi densidade demográfica. No entanto, ela apresenta uma correlação negativa¹² com a variável emissão de CO_2 . Essa questão mostra que a poluição se relaciona com população absoluta. Um exemplo hipotético da desvantagem da densidade demográfica é que, *coeteris paribus*, um país de território muito pequeno com uma população relativamente grande e absolutamente pequena, tende a ter níveis de poluição menor do que um país grande com uma população absolutamente maior e relativamente menor. Portanto, priorizou-se o uso da variável população absoluta em detrimento de vieses que possam ser causados pela densidade demográfica, que é relativa. Os trabalhos de Maddison (2005) e Dijkgraaf et al. (2001), assim como o presente, utilizaram a variável população.

Quanto à variável tendência, optou-se por não incluí-la, já que pode deturpar a aplicação do teste funcional¹³. O problema é melhor visualizado na Figura 3.1, onde estão

¹² Ver Anexo 1.

¹³ A variável *ano* foi usada por Grossman (1995), mas não por Selden e Song (1994).

presentes as representações de duas situações hipotéticas (com e sem tendência respectivamente).

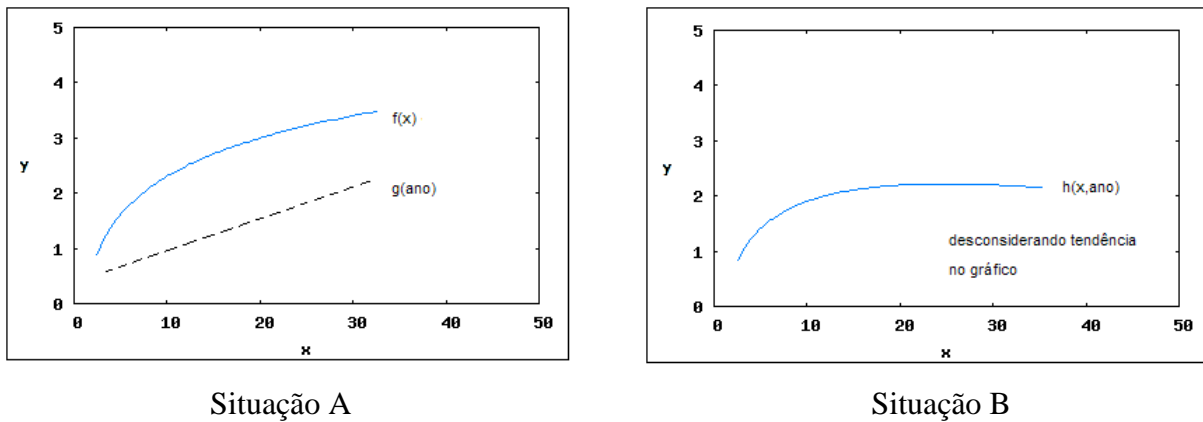


Figura 3.1. O efeito da variável tendência.

Fonte: Elaboração própria.

Na situação A, $f(x)$ é uma função de y com relação à x , ou seja, todas as oscilações de y se devem à x , logo a reta $g(\text{ano})$ seria implícita. Na situação B, $h(x, \text{ano})$ é uma função de y com relação à x e ano , logo as oscilações de y se devem à x e ano , mas a Figura 3.1 só tem duas dimensões e acaba por desconsiderar parte das oscilações de y . Cabe aqui ressaltar que o passar do tempo, mantendo tudo mais constante, não faz os níveis de CO_2 aumentarem significativamente por si só, então a variável tendência também poderia causar um viés na forma funcional.

Portanto, estes foram os critérios utilizados na seleção das variáveis para composição do modelo destinado a testar a CKA. As técnicas usadas para a regressão do modelo, assim como as justificativas são abordadas posteriormente.

3.2 Demais Formas Funcionais a Serem Testadas e a Definição dos Modelos

As principais fontes emissoras de CO_2 são os setores de energia, indústria, transportes e as atividades que causam o desmatamento, segundo Baumert (2005). Essa informação sugere que um modelo básico que explique a poluição tenha como variáveis independentes: a intensidade de produção de energia, de produção industrial, do transporte, assim como a intensidade do desmatamento. O presente trabalho verifica inicialmente a relação entre a emissão de CO_2 por combustíveis fósseis e o PIB. O uso de combustíveis fósseis não é

influenciado diretamente pelo desmatamento, portanto o PIB é uma variável representativa da oferta de energia, indústria e transporte.

A importância da variável demográfica população persiste para além dos modelos da Curva de Kuznets Ambiental. Pois é a população que demandará o produto industrial, assim como uso de energia e transportes. Portanto, o modelo inicial proposto tem a emissão de CO₂ como variável dependente e PIB *per capita* e população como variáveis independentes.

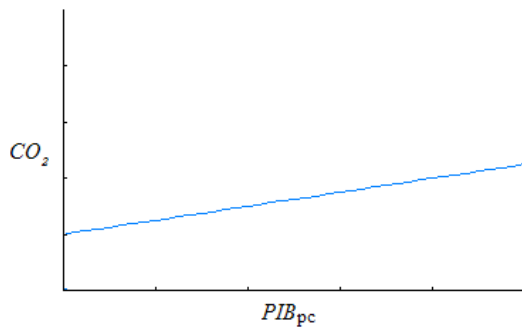
As formas funcionais linear, exponencial e logarítmica serão testadas utilizando-se os dois modelos:

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 PIBpc_{it} + \beta_2 POP_{it} + E_{it} \quad (3.2)$$

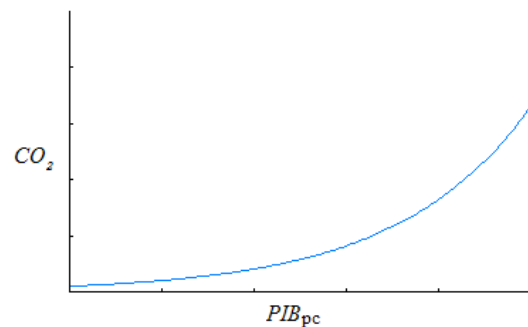
$$\ln(CO_{2it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBpc_{it}) + \beta_2 \ln(POP_{it}) + E_{it} \quad (3.3)$$

A função log-log representada na Expressão 3.3 pode tomar forma exponencial ou logarítmica, dependendo dos valores dos parâmetros regredidos. Abaixo estão as possíveis representações gráficas que podem ser assumidas pelos modelos.

Forma funcional linear



Forma funcional exponencial



Forma funcional logarítmica

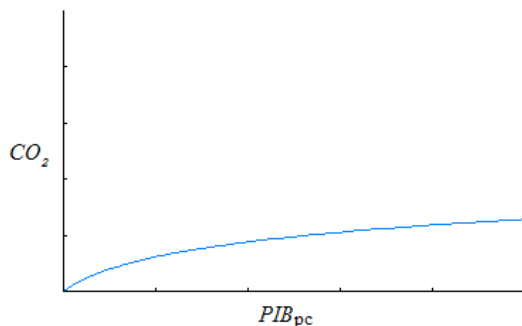


Figura 3.2. Representação gráfica das diferentes funções.

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Procedimentos Econométricos

As ferramentas econométricas são utilizadas para fazer as regressões, escolher o melhor método de regressão e para testar a sua qualidade. A aplicação dos métodos e dos testes foi feita com a utilização dos *softwares* STATA 9 e Eviews 6. Os dados são detalhados na seção 4, e as observações estão combinadas em séries temporais anuais de diversos países. O método utilizado para arranjo das observações foi o de dados em painel, suas principais vantagens são: permitir captar a informação temporal das variáveis assim como a diversidade entre as diferentes seções cruzadas; possibilitar maior número de observações e conseqüentemente maior grau de liberdade e reduzir os riscos de multicolinearidade, uma vez que os dados entre os indivíduos apresentam estruturas diferentes.

3.3.1 A Escolha Entre a Abordagem de Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios

As técnicas de regressão para dados em painel se dão normalmente por meio das abordagens por efeitos fixos ou por efeitos aleatórios. A abordagem de efeitos fixos exige que se faça pressuposições a respeito do intercepto, dos coeficientes angulares e do termo de erros. Basicamente, deve-se escolher se o intercepto e os coeficientes angulares variam na dimensão dos dados de corte ou de série temporal, ou se ficarão constantes, sendo as diferenças absorvidas pelo termo de erros (GUJARATI, 2006). A variação é incluída no modelo através de *dummies* para os diferentes dados de corte e ou para o tempo, as quais multiplicam os regressores que foram eleitos para variar.

Como esta análise busca uma ordem comum nos sinais dos coeficientes angulares, estes são mantidos constantes entre os países. Também não serão utilizadas *dummies* com relação ao tempo, pois assim, se espera observar melhor sua tendência original da função. Em alguns casos, os dados são simplesmente empilhados, mas esta abordagem assume coeficientes angulares e interceptos comuns para os dados de corte. Dada a heterogeneidade dos países que compõem o presente estudo, a premissa escolhida foi a possibilidade de variação dos interceptos com relação aos dados de corte. Ou seja, as opções consideradas foram a abordagem de efeitos aleatórios e a abordagem de efeitos fixos com diferentes interceptos entre as seções cruzadas.

A abordagem de efeitos fixos é uma forma de levar em conta a individualidade de cada unidade de corte transversal, no caso do presente trabalho, de cada país. A Expressão 3.4 contém um modelo simples de regressão de efeitos.

$$y_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 x_{it} + u_{it} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

em que i é o indexador de país, t o período de tempo, x a variável independente e y a variável dependente. A peculiaridade deste caso encontra-se no parâmetro β_{0i} , pois o subscrito i indica que haverá um intercepto para cada unidade de seção cruzada.

A abordagem de efeitos aleatórios é também conhecida como modelo de componente de erros. Neste caso, a heterogeneidade das seções cruzadas é introduzida no termo de erro, ou seja, a constante não é considerada como um parâmetro fixo, mas sim como um parâmetro aleatório não observável. Ao considerar $\beta_{0i} = \beta_0 + e_i$, tem-se que cada intercepto é igual à um intercepto comum mais um desvio, ao aplicar esta igualdade na Expressão 3.4, tem-se

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + u_{it} + e_i \quad (3.5)$$

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + w_{it} \quad (3.6)$$

em que $w_{it} = e_i + u_{it}$.

A Expressão 3.6 é um modelo simples com abordagem de efeitos aleatórios, onde há um único intercepto, β_0 , para todas seções cruzadas. Este modelo pressupõe que os componentes de erro individuais não estão correlacionados entre si nem estão correlacionados entre as unidades de corte transversal e as de séries temporais. Segundo Gujarati (2006), resumidamente, pode-se dizer que no modelo de efeitos fixos, cada seção cruzada tem o valor próprio de intercepto, enquanto no modelo de efeitos aleatórios, o intercepto β_0 é o valor médio de todos os interceptos de forma que e_i representa o desvio do intercepto da unidade de corte transversal do intercepto β_0 .

No presente estudo a abordagem de efeitos fixos tem a vantagem de oferecer informações que reflitam a heterogeneidade dos países. No entanto, o principal critério utilizado para escolha entre a abordagem dos efeitos fixos e a abordagem dos efeitos aleatórios é o Teste de Hausman. Utilizando o exemplo do modelo representado na Expressão 3.5, é verificado se o termo de erros e_i não está correlacionado com X (GUJARATI, 2006). Caso não haja correlação, então não há diferenças substanciais entre os interceptos das diferentes seções cruzadas, caso haja correlação, assume-se que existem diferenças substanciais entre os interceptos das unidades de corte transversal. A estatística do Teste de Hausman é obtida pela Expressão:

$$h = (b - \beta)'(\sigma_b - \sigma_\beta)^{-1}(b - \beta)$$

em que b é a matriz dos coeficientes obtidos pela abordagem de efeitos fixo, β é a matriz dos coeficientes obtidos pela abordagem de efeitos aleatórios, σ_b é a matriz variância de b e σ_β é a matriz variância de β . A estatística h tem distribuição assintótica e se aproxima da distribuição Qui-Quadrado (χ^2) com k graus de liberdade, em que k refere-se ao número de parâmetros estimados, excluindo o termo constante. A hipótese nula indica que as diferenças nos coeficientes não são sistemáticas, sendo mais apropriado o uso da abordagem dos efeitos aleatórios (STATA, 2008).

3.3.2 Os Testes Para Detecção de Heterocedasticidade e Autocorrelação

A heterocedasticidade ocorre quando a variância do termo de erro não é constante entre as seções cruzadas. Para testar a presença de heterocedasticidade, é usada a estatística de Wald modificada em que a hipótese nula indica homocedasticidade, ou seja, $\sigma_i^2 = \sigma^2$ para todo i (GUJARATI, 2006). A estatística é comparada com valores críticos da distribuição χ^2 , em que os graus de liberdade são dados pelo número de seções cruzadas.

A autocorrelação é verificada pelo Teste de Wooldridge. Segundo Drukker (2003), o ponto de partida utiliza o modelo em primeira diferença, como segue:

$$\Delta y_{it} = \beta_1 \Delta x_{it} + \Delta u_{it}$$

em seguida, é verificado se o termo de erros não é serialmente correlacionado, com $Corr(\Delta u_{it}, \Delta u_{it-1}) = 0,5$. A hipótese nula indica ausência de autocorrelação e a estatística utilizada é comparada com o F crítico.

Uma consideração que deve ser feita no caso do teste da CKA é quanto a multicolinearidade dos parâmetros. As variáveis explicativas formam um polinômio, o que tende a favorecer a presença de multicolinearidade. Segundo Gujarati (2006), o principal efeito prático da multicolinearidade é o aumento da variância dos estimadores, o que leva a maiores intervalos de confiança e maior possibilidade de se aceitar a hipótese de não significância dos estimadores. Porém, como será exposto, o efeito negativo esperado não tem um impacto relevante sobre os estimadores.

3.3.3 Testes de Raiz Unitária e Cointegração para Dados em Painel

A presença de raiz unitária nas séries implica em sua não estacionariedade, o que compromete a interpretação das regressões, pois seus resultados são considerados espúrios. São efetuados dois testes para verificação de raiz unitária nas séries. O teste formulado por Levin, Lin e Chu (2002), conhecido como LLC, utiliza a estatística t sob a hipótese nula de que cada série temporal possui uma raiz unitária, ou seja, $\rho_i = \rho = 0$, contra a hipótese alternativa de que todas as seções são estacionárias. A regressão seguida no teste é:

$$\Delta y_{it} = \rho_i y_{it-1} + \alpha_{0i} + \alpha_{1i} t + u_{it}$$

em que são incorporados os efeitos individuais representados por α_{0i} , e os efeitos da tendência temporal em $\alpha_{1i} t$ (BARBIERI, 2006).

O teste de raiz unitária ADF-Fisher¹⁴ parte do seguinte modelo proposto por Choi (2001):

$$y_{it} = d_{it} + x_{it}$$

em que:

$$d_{it} = \alpha_{i0} + \alpha_{i1} t + \dots + \alpha_{im_i} t^{m_i}$$

$$x_{it} = \rho_i x_{i(t-1)} + u_{it}$$

sendo d_{it} o componente não estocástico e x_{it} , o componente estocástico da série y_{it} . A estatística do teste segue a distribuição χ^2 , na hipótese nula todas as séries são raiz unitária e na hipótese alternativa parte das séries é estacionária.

O teste LLC é um teste paramétrico e o teste tipo Fisher é não paramétrico, eles apresentam diferentes estatísticas e diferentes hipóteses alternativas. Esta diversidade fornece maior confiabilidade aos resultados obtidos.

¹⁴ *Augmented Dickey-Fuller* tipo Fisher.

A presença de raiz unitária nas séries requer a aplicação do teste de cointegração. Caso sejam cointegradas, as séries possuem tendências comuns e produzem erros estacionários, podendo ser aplicado um modelo de correção. O teste proposto por Pedroni (1995, 1997) tem a hipótese nula de não cointegração das séries, partindo do modelo:

$$y_{it} = a_i + d_i t + X'_{it} b_i + e_{it} \quad (3.7)$$

em que X' representa as variáveis explicativas, e b os respectivos coeficientes de inclinação, a capta os efeitos fixos e d as tendências deterministas para cada seção cruzada. Os resíduos gerados pela estimação da Expressão 3.7 são testados por quatro diferentes estatísticas¹⁵ de cointegração em painel que seguem a distribuição normal.

3.3.4 Detecção de Quebra Estrutural

A quebra estrutural acontece quando há mudança de origem exógena na relação entre as variáveis estudadas. O teste de estabilidade estrutural pode ser efetuado através da metodologia proposta por Gregory Chow ou com a utilização de variáveis binárias (*dummies*). Optou-se pela utilização de variáveis binárias em virtude da vantagem de se conhecer a fonte da quebra estrutural, seja ela o intercepto, a inclinação ou ambos (GUJARATI, 2006).

Os modelos aplicados para o teste de estabilidade estrutural são:

$$y_i = \alpha_1 + \alpha_2 D_i + \beta_1 x_i + e_i \quad (3.8)$$

$$y_i = \alpha_1 + \beta_1 x_i + \beta_2 (D_i x_i) + e_i \quad (3.9)$$

$$y_i = \alpha_1 + \alpha_2 D_i + \beta_1 x_i + \beta_2 (D_i x_i) + e_i \quad (3.10)$$

em que y é a variável dependente, x é a variável independente, α é o coeficiente de intercepto, β é coeficiente de inclinação, D é a variável binária que discrimina o período a partir da quebra estrutural esperada e e representa o termo de erros. A Expressão 3.8 tem o objetivo de testar se a quebra estrutural ocorre somente no intercepto; a Expressão 3.9 visa testar se a quebra estrutural ocorre na inclinação; e a Expressão 3.10 testa se há ocorrência de quebra no intercepto e na inclinação simultaneamente. A existência de quebra estrutural se

¹⁵ As estatísticas de cointegração em painel são: estatística-v, estatística-rho, estatística-pp e estatística-ADF. As três primeiras estatísticas de cointegração em painel são não-paramétricas, análogas ao teste de Phillips-Perron, e a última é paramétrica, análoga ao teste ADF.

confirma no intercepto nos casos em que o coeficiente α_2 for significativo e se confirma na inclinação quando o coeficiente β_2 for significativo.

3.3.5 Critérios para Seleção de Modelos

Para a seleção da forma funcional de melhor ajuste, é efetuado o Teste Davidson-MacKinnon¹⁶ e aplicado o critério de Akaike e Schwarz. O Teste Davidson-MacKinnon é utilizado para se escolher entre o modelo linear e logarítmico, que podem ser representados pelas equações:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e \quad (3.11)$$

$$\log(y) = \beta_0 + \beta_1 \log(x_1) + \beta_2 \log(x_2) + e. \quad (3.12)$$

Segundo Wooldridge (2004), os valores estimados na Expressão 3.11 e na Expressão 3.12 são primeiro denominados \hat{y} e $\hat{\hat{y}}$ respectivamente, em seguida os modelos são estimados novamente incluindo-se como parâmetros as estimações originais, como segue:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \theta_1 \hat{y} + e \quad (3.13)$$

$$\log(y) = \beta_0 + \beta_1 \log(x_1) + \beta_2 \log(x_2) + \theta_1 \hat{\hat{y}} + e. \quad (3.14)$$

caso a estatística t seja significativa

para \hat{y} , rejeita-se o modelo da Expressão 3.11. De forma semelhante, caso $\hat{\hat{y}}$ seja significativo, deve-se rejeitar o modelo representado pela Expressão 3.12. Outro critério utilizado para confirmar a aplicação do Teste Davidson-MacKinnon é escolher o modelo da regressão que apresente o menor valor para as estatísticas de Akaike e Schwarz.

3.3.6 O Método de Estimação MQGF

Para realizar as regressões foi utilizado o método dos Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis (MQGF). O método foi escolhido por sua eficácia na correção de heterocedasticidade, autocorrelação e correlação nas seções cruzadas quando os dados são

¹⁶ Conhecido também como Teste J para seleção de modelos.

compostos por uma amostra grande (STATA, 2007). O MQGF é também aconselhável quando a estrutura da variância e o ρ que determina a autocorrelação são desconhecidos (GOMES, 2007). Para correção da heterocedasticidade e da correlação seccional, o MQGF usa ponderações de peso inversamente proporcional às variâncias observadas e também ponderações entre as diferentes seções. O processo completo consiste em usar os resíduos da primeira regressão para obter ρ , encontrar o estimador β , aplicar o β estimado no modelo original para obter novo vetor de erros v_t , derivar novo β usando ρ e repetir o processo até que as mudanças no ρ se tornem não significativas (WOOLDRIDGE, 2002).

Segundo Dias e Dias (2007), o método dos Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis estima os coeficientes da regressão através da expressão:

$$\hat{\beta} = \left(\sum_{i=1}^N x_i' \theta^{-1} x_i \right) + \left(\sum_{i=1}^N x_i' \theta^{-1} y_i \right)$$

em que a estimação da matriz de pesos θ é obtida por:

$$\hat{\theta} = N^{-1} \sum_{i=1}^N \hat{v}_i \hat{v}_i'$$

em que v é o vetor de erros obtido no primeiro estágio da regressão. A matriz peso, composta por variâncias e covariâncias minimizam os efeitos da heterocedasticidade e da autocorrelação.

Considerando a vantagem na abordagem de efeitos fixos para o caso, é necessária a utilização de variáveis instrumentais binárias (*dummies* de intercepto) para captar os efeitos de cada seção cruzada, ou seja, o intercepto de cada país individualmente (GOMES, 2007). É preciso usar este artifício uma vez que não há um algoritmo computacional implementado que faça a abordagem de efeitos fixos para comandos do MQGF. Portanto, o modelo estimado para testar a hipótese da CKA, o modelo linear e o modelo log-log passam a ser:

$$CO_{2it} = \beta_1 + \beta_s D_s + \beta_{14} PIB_{it} + \beta_{15} PIB_{it}^2 + \beta_{16} PIB_{it}^3 + \beta_{17} POP_{it} + E_{it} \quad (3.15)$$

$$CO_{2it} = \beta_1 + \beta_s D_s + \beta_{14} PIB_{it} + \beta_{15} POP_{it} + E_{it} \quad (3.16)$$

$$\ln(CO_{2it}) = \ln(\beta_1 + \beta_s D_s) + \beta_{14} \ln(PIB_{it}) + \beta_{15} \ln(POP_{it}) + \ln(E_{it}) \quad (3.17)$$

em que a nova variável D é uma *dummy* de intercepto que assume consecutivamente valores unitários para cada país na amostra e s é o índice para o país que varia de 2 a 13. Por exemplo,

o país 1 que se refere à Austrália assume o intercepto β_1 , o país 12 que se refere aos Estados Unidos terá o intercepto $\beta_1 + \beta_{12}$. Desta forma, espera-se diminuir o termo de erros buscando expressar as correlações entre as seções e os parâmetros através das variáveis instrumentais (WOOLDRIDGE, 2002).

Após selecionar o modelo que relaciona as variáveis de degradação e crescimento econômico, são substituídas projeções de população e PIB nas funções para se obter previsões dos níveis de emissões para as próximas décadas. Este método foi utilizado por Selden e Song (1994), em que foram feitas previsões mundiais para o ano de 2000, 2100 e para os picos das funções¹⁷. As projeções forneceram informações importantes, revelando a insustentabilidade do crescimento econômico, uma vez que a maioria dos pontos de reversão das curvas seriam atingidos após o século XXI.

3.4 Procedimentos Para Efetuar Previsões

As previsões de emissões de CO₂ por combustíveis fósseis no Brasil são feitas utilizando o modelo selecionado no presente trabalho com projeções obtidas em fontes secundárias¹⁸ de PIB *per capita* e população brasileira para os anos analisados. É necessário adequar os dados que são substituídos nas funções, transformando-os em base logarítmica e em primeira diferença. Da mesma forma é preciso converter os resultados, tirando da primeira diferença e da base logarítmica para que sejam comparados aos dados recentes com unidades de medida homogêneas.

Para verificar a qualidade das previsões foram calculados os intervalos de confiança dos valores projetados. Estes são obtidos por meio da técnica de previsão individual descrita em Gujarati (2006). Inicialmente se calcula a variância do estimador:

$$\text{var}(Y_0 - \hat{Y}_0) = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum x_i^2} \right] \quad (3.18)$$

em que \hat{Y}_0 é o valor estimado de $E(Y|X_0)$, x_i são os desvios de X com relação à sua média \bar{X} e n é o tamanho da amostra. Então, com o valor encontrado na Expressão 3.18 se estabelece o intervalo de confiança em:

¹⁷ As variáveis de degradação utilizadas no trabalho citado foram dióxido sulfúrico, partículas suspensas, óxido de nitrogênio e monóxido de carbono.

¹⁸ Goldman Sachs e US Census Bureau, detalhes na seção 4.

$$\Pr \left[\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_0 - t_{\alpha/2} ep(\hat{Y}_0) \leq \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_0 \leq \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_0 + t_{\alpha/2} ep(\hat{Y}_0) \right]$$

em que os $\hat{\beta}_s$ são os estimadores da função. O limite inferior do intervalo de confiança foi usado para traçar o cenário otimista nas análises, enquanto o limite superior para traçar o cenário pessimista.

Para projetar as emissões totais de CO₂, foi mantida a proporção de emissões por desmatamento e queimadas no ano de 1994. Segundo MCT (2006), as emissões por mudança no uso da terra e florestas representavam 75% das emissões totais. Exemplificando, ao considerar x um valor projetado para emissões de CO₂ por combustíveis fósseis, as emissões totais representam quatro vezes o valor de x .

4. Fonte de Dados

Os dados são compostos por 559 observações distribuídas entre os anos de 1956 a 1998 para os seguintes países: África do Sul, Austrália, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos da América, Índia, Itália, Japão, México, República da Coreia (Coreia do Sul), Reino Unido e Taiwan. Em geral, os critérios utilizados para a escolha da amostra de países foram, primeiro, a diversidade em termos de crescimento econômico, priorizando parte da composição por países desenvolvidos na amostra; e segundo, a disponibilidade das informações existentes. Especificamente, Austrália, Canadá, EUA, Itália, Japão e Reino Unido foram selecionados pelo alto grau de desenvolvimento e participação elevada nas emissões mundiais. República da Coreia, Índia e China foram selecionadas também pela elevada contribuição às emissões totais, isso inclui Taiwan por ser considerada província da China. África do Sul é a parte da amostra que representa o continente africano. México e Brasil assumem a representação de países latino-americanos em desenvolvimento, sendo que o Brasil será também principal foco de análise.

Informações estatísticas sobre as variáveis utilizadas nas regressões podem ser visualizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Estatística descritiva das variáveis

Variável	Média	Variância	Máximo	Mínimo
CO_2	191.104	9,70e+10	1.560.577	2.062
$PIBpc$	5.476	5,61e+07	42.142	75
POP (milhões)	179	8,02e+10	1.240	10

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Índice de correlação das variáveis encontra-se no Anexo I

De modo geral, as variáveis apresentam elevada variância, isto ocorre devido à heterogeneidade dos países. No entanto, esta heterogeneidade não comprometerá as regressões, uma vez que os dados encontram-se dispostos em painéis. Os níveis de emissão de gás carbônico foram obtidos do *Carbon Dioxide Information Analysis Center* (MARLAND, 2007). As emissões estão expressas em mil toneladas métricas de carbono (Qt C)¹⁹, sendo que esta unidade de medida foi mantida durante as regressões e para análise dos resultados foram convertidos em mil toneladas métricas de dióxido de carbono (Qt CO₂) através do fator de

¹⁹ Quilotonelada (Qt) = 1.000 toneladas. Megatonelada (Mt) = 1.000.000. Gigatonelada (Gt) = 1.000.000.000.

conversão de 3,664²⁰. A variável PIB *per capita* foi calculada com base nos dados de consumo, gastos do governo, investimento, importação, exportação, taxa de câmbio (moeda local/US\$) e população disponibilizados pelo *Center of International Comparisons at the University of Pennsylvania* no relatório *Penn World Table* (HESTON et al., 2002). As medidas resultantes para o PIB *per capita* são dólares americanos a preços correntes.

As projeções de PIB *per capita* brasileiro foram obtidas em relatório Goldman Sachs (2007) e são medidas em dólares americanos a preços de 2006. A Goldman Sachs é um grupo econômico especializado em análises dos BRICs²¹, o que reforça a confiabilidade das previsões. As projeções de população brasileira e mundial tiveram como fonte o U.S. Census Bureau (2009), sendo estas são referentes aos valores absolutos da população no meio do ano estimado.

²⁰ Seu peso molecular relativo é de 44/12 (ONU, 2007).

²¹ Sigla que denomina um grupo de países composto por Brasil, Rússia, Índia e China.

5. Resultados e Discussão

Esta seção está dividida em duas partes principais. Na primeira é exposto o procedimento para a escolha da função que melhor representa a relação entre PIB e emissões de CO₂ por combustíveis fósseis e, na segunda, é feita uma análise dessa relação enfocando o caso brasileiro.

5.1 A Relação Entre Emissões de Carbono e Crescimento Econômico

5.1.1 Escolha da Abordagem e Teste de Violação dos Pressupostos

Considerando que os dados estão agrupados em painéis, o primeiro passo é fazer a escolha entre a abordagem de efeitos fixos e efeitos aleatórios, que é realizada através da estatística do Teste de Hausman. Essa estatística é exposta na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Teste de Hausman

Modelo	χ^2	Prob > χ^2
CKA	7,47	0,0063
Linear	10,76	0,0046
Log-log	68,89	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

O teste de Hausman indica a rejeição da hipótese nula para os três modelos, ou seja, as diferenças entre os coeficientes são sistemáticas. Portanto, as especificidades entre os países se revelam em diferentes parâmetros de interceptos, sendo mais apropriada a utilização da abordagem de efeitos fixos.

O procedimento seguinte foi testar se há violação dos pressupostos de homocedasticidade, ausência de autocorrelação e independência das seções cruzadas (Tabela 5.2). O atendimento ou não desses pressupostos requer a aplicação de diferentes métodos regressivos.

Tabela 5.2. Testes de violação dos pressupostos

Modelo	Homocedasticidade	Ausência de autocorrelação	Independência entre as seções cruzadas
CKA	0,0000	0,0000	0,0000
Linear	0,0000	0,0000	0,0000
Log-log	0,0000	0,0000	0,0000
Critério	Prob > χ^2	Prob > F	Prob > χ^2

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tem-se que os testes apontam violação dos três pressupostos, ou seja, os modelos preliminares²² são heterocedásticos, com autocorrelação e correlação entre as seções cruzadas. As devidas correções são feitas aplicando-se o método de regressão MQGF (Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis), como verificado em Gomes (2007).

5.1.2 Testes de Estacionariedade e Cointegração

Com o objetivo de verificar se as séries possuem raiz unitária é aplicado o Teste ADF-Fisher, cujos resultados estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Aplicação dos testes de raiz unitária

Variáveis	Levin, Lin e Chu		ADF-Fisher	
	Estatística t	Prob. > N	Estatística χ^2	Prob. > χ^2
<i>CO2</i>	1,3544	0,9122	22,2735	0,6736
<i>PIB</i>	-3,0787	0,0010 *	48,8866	0,0043 *
<i>PIB</i> ²	9,8361	1,0000	34,9255	0,1133
<i>PIB</i> ³	16,8766	1,0000	58,5334	0,0003 *
<i>POP</i>	-2,4867	0,0064 *	45,9802	0,0092 *
<i>LNCO2</i>	-0,7270	0,2336	24,9770	0,5203
<i>LNPIB</i>	1,7334	0,9585	22,2593	0,6744
<i>LNPIB</i> ²	1,7334	0,9585	22,2593	0,6744
<i>LNPIB</i> ³	1,7334	0,9585	22,2593	0,6744
<i>LNPOP</i>	-0,2838	0,3883	31,9085	0,1962

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: * Significativo a 5%, indica que a série é estacionária.

Considerando que a hipótese nula é a presença de raiz unitária nas séries, os testes apontam que quase todas as séries não são estacionárias. Como exemplo, tem-se que para a série CO₂ não se rejeita a hipótese nula, uma vez que sua estatística χ^2 é 22,2735. Este fato faz com que os resultados fornecidos pelas regressões sejam espúrios. Para formular a solução adequada é aplicado o Teste de Cointegração de Pedroni, como segue na Tabela 5.4.

²² Os regressões preliminares encontram-se no Anexo 2.

Tabela 5.4. Estatísticas do Teste de Cointegração de Pedroni para dados em painel

Modelo	Estatística-v	Estatística-rho	Prob. > N	
			Estatística-PP	Estatística-ADF
CKA	0,1445	0,3112	0,0775	0,0005 *
Linear	0,3962	0,3574	0,3989	0,3698
Log-log	0,3456	0,3975	0,2184	0,3041

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: * Significativo a 5%, indica cointegração.

Segundo o teste aplicado, as variáveis não são cointegradas. Com isso, torna-se apropriado proceder a estimação dos modelos com as variáveis em primeira diferença pelo método MQGF e, então, verificar se os erros gerados são aleatórios.

5.1.3 A Identificação da Presença de Quebra Estrutural e as Regressões

A relação entre as variáveis pode se alterar em determinado momento devido a influências exógenas. O choque do petróleo ocorrido em 1974 é o fato de maior relevância que justifica a existência de quebras estruturais na relação entre PIB *per capita* e emissões de CO₂. No Anexo 3 estão ilustradas as intensidades de carbono²³ para os países estudados, onde pode-se confirmar uma mudança na relação entre as variáveis em diversos países por volta do ano 1974. Na Tabela 5.5, estão os resultados dos testes que verificam a presença de quebra estrutural nesse ano para intercepto e inclinação.

Tabela 5.5. Significância dos coeficientes das *dummies* indicadoras de quebra estrutural

Modelo	Tipo da quebra	Variável testada	Prob > z	
			Intercepto	Inclinação
CKA *	Intercepto	Constante	0,003	-
CKA	Inclinação	<i>PIB</i>	-	0,324
CKA	Inclinação	<i>PIB2</i>	-	0,887
CKA	Inclinação	<i>PIB3</i>	-	0,804
CKA	Intercepto e inclinação	Constante e <i>PIB</i>	0,078	0,527
CKA	Intercepto e inclinação	Constante e <i>PIB2</i>	0,078	0,960
CKA	Intercepto e inclinação	Constante e <i>PIB3</i>	0,078	0,947
Linear	Intercepto	Constante	0,001	-
Linear *	Inclinação	<i>PIB</i>	-	0,000
Linear	Intercepto e inclinação	Constante e <i>PIB</i>	0,138	0,000

²³ A intensidade de carbono é calculada pela proporção das emissões de carbono sobre o PIB *per capita*.

Continuação da Tabela 5.5.

Log-log	Intercepto	Constante	0,567	-
Log-log *	Inclinação	<i>PIB</i>	-	0,000
Log-log	Intercepto e inclinação	Constante e <i>PIB</i>	0,932	0,001

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: No modelo CKA as variáveis *PIB*, *PIB*² e *PIB*³ foram testadas na mesma regressão, a quebra é comum para as três variáveis.

No modelo CKA foi constatada a presença de quebra-estrutural no intercepto, enquanto que no modelo log-log a mudança ocorre na inclinação da curva. No caso do modelo linear, tanto a constante quanto o *PIB* individualmente apresentam quebra estrutural, mas quando estes são testados em conjunto, a constante deixa de ser significativa. Isto significa que as duas quebras empregadas separadamente podem sanar o problema de quebra estrutural, neste caso, a preferência foi dada por empregar a variável de quebra de inclinação por ser mais significativa nos testes efetuados.

Após todos os testes realizados, foram estimadas as regressões. A Tabela 5.6 ilustra os resultados obtidos para as regressão com os três modelos.

Tabela 5.6. Resultado da regressão para o modelo CKA, linear e log-log.

Modelo CKA Variáveis independentes	Variável dependente: <i>d.CO</i> ₂		
	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z
<i>d.PIB</i>	2,0256	0,5347	0,000
<i>d.PIB</i> ²	-4,14e-05	3,09e-05	0,179
<i>d.PIB</i> ³	2,98e-10	5,53e-10	0,590
<i>d.POP</i>	0,0016	0,0002	0,000
<i>C</i>	-1626,0900	495,6610	0,001
<i>Cq</i>	-1139,7110	389,8252	0,003
<i>D2</i>	-3196,1700	809,4141	0,000
<i>D3</i>	292,5962	733,0176	0,690
<i>D4</i>	-7986,1200	8114,377	0,325
<i>D5</i>	-1947,0280	894,8720	0,030
<i>D6</i>	-16521,4600	3286,4770	0,000
<i>D7</i>	265,0164	547,702	0,628
<i>D8</i>	3124,2090	1898,088	0,100
<i>D9</i>	-303,5955	1157,8140	0,793
<i>D10</i>	-1094,4520	796,5171	0,169
<i>D11</i>	-617,0974	535,0053	0,249
<i>D12</i>	12367,8400	7123,4260	0,083
<i>D13</i>	-96,25687	645,4385	0,881
Medida de ajustamento global do modelo:		Wald χ^2	178,51
		Prob> χ^2	0,000

Continuação da Tabela 5.6.

Modelo Linear		Variável dependente: $d.CO_2$	
Variáveis independentes	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z
<i>d.PIB</i>	2,5819	0,4946	0,000
<i>d.POP</i>	0,0016	0,0002	0,000
<i>d.PIBq</i> *	-1,6247	0,4643	0,000
<i>C</i>	1115,8740	497,8539	0,025
<i>D2</i>	-3277,5160	821,1925	0,000
<i>D3</i>	388,8970	661,1988	0,608
<i>D4</i>	-8012,5590	8011,2220	0,317
<i>D5</i>	-1938,1950	901,3935	0,032
<i>D6</i>	-16676,2000	3350,7780	0,000
<i>D7</i>	278,8828	559,1407	0,618
<i>D8</i>	3027,0830	1967,5710	0,124
<i>D9</i>	-285,5514	1175,3410	0,808
<i>D10</i>	-1159,4230	809,4799	0,152
<i>D11</i>	-624,2482	512,7606	0,223
<i>D12</i>	12231,3100	6992,214	0,080
<i>D13</i>	-173,0299	597,5951	0,772
Medida de ajustamento global do modelo:		Wald χ^2	176,97
		Prob> χ^2	0,0000

Modelo Log-log		Variável dependente: $d.lnCO_2$	
Variáveis independentes	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z
<i>d.lnPIB</i>	0,1059	0,0154	0,000
<i>d.lnPOP</i>	2,9808	0,3597	0,000
<i>d.lnPIBq</i>	-0,0050	0,0015	0,000
<i>C</i>	-0,0143	0,0071276	0,045
<i>D2</i>	-0,0084	0,0102	0,408
<i>D3</i>	-0,0098	0,0079	0,217
<i>D4</i>	0,0223	0,0338	0,511
<i>D5</i>	-0,0027	0,0080	0,736
<i>D6</i>	0,0076	0,0069	0,271
<i>D7</i>	0,0332	0,0110	0,003
<i>D8</i>	0,0271	0,0133	0,043
<i>D9</i>	0,0463	0,0092	0,000
<i>D10</i>	-0,0161	0,0095	0,089
<i>D11</i>	0,0244	0,0104	0,019
<i>D12</i>	-0,0077	0,0077	0,319
<i>D13</i>	-0,0234	0,0079	0,003
Medida de ajustamento global do modelo:		Wald χ^2	572,68
		Prob> χ^2	0,0000

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: As variáveis estão em primeira diferença conforme indicado na seção 5.1.2.

As variáveis acompanhadas da letra “q” foi empregadas para captar os efeitos da quebra estrutural.

A constante *C* se refere ao intercepto da Austrália, as *dummies* *D2* até *D13* representam respectivamente Brasil, Canadá, China, Reino Unido, Índia, Itália, Japão, República da Coreia, México, Taiwan, USA e África do Sul. Para se obter o intercepto de um país representado pela variável binária, seu coeficiente deve ser somado à constante *C*.

Com base na estatística Wald, as três regressões apresentam um ajustamento adequado, sendo globalmente significativas a 1%. Os coeficientes $d.PIB^2$ e $d.PIB^3$ do modelo CKA são não significativos mesmo ao nível de 10%. O modelo CKA assume a forma linear monotonicamente crescente entre emissões de CO₂ e PIB. Isto significa que não há um ponto de reversão da curva, ou seja, as emissões não diminuirão após um certo patamar de crescimento econômico. Desta forma, é mais apropriado descartar o modelo CKA e utilizar o linear. Esse modelo foi implementado com a quebra estrutural apropriada e apresenta todos os coeficientes individualmente significativos ao nível de 1% de significância.

O modelo log-log também apresenta todos os coeficientes angulares estatisticamente diferentes de zero ao nível de 1% de significância. Uma característica comum é que os três modelos apresentam relação positiva entre as emissões e o PIB *per capita*, assim como entre as emissões e a população. Estes resultados eram esperados, pois tanto o aumento da produção quanto o aumento da população pressionam positivamente as emissões.

Grande parte dos interceptos ficou com o sinal negativo, esta é uma situação hipotética, pois não há emissão negativa. Não obstante, observando a diferença entre os interceptos é possível notar algumas particularidades dos países. Nos modelos CKA e linear, os EUA apresentaram o intercepto bem superior aos dos demais países, sendo seguido pelo Japão. No modelo log-log, os maiores interceptos foram da República da Coreia, Itália e Japão, neste modelo o coeficiente dos EUA foi não significativo. É importante destacar que o intercepto brasileiro é bem inferior à média dos interceptos nos três casos, mesmo que no último modelo sua *dummy* tenha sido não significativa.

Os resíduos das regressões são estacionários, não sendo as estimações espúrias. Pode se verificar na Tabela 5.7 que se rejeita a hipótese numa da presença de raiz unitária para todos os três modelos testados.

Tabela 5.7. Aplicação dos testes de raiz unitária aos resíduos das regressões.

Modelo	Levin, Lin e Chu		ADF-Fisher	
	Estatística t	Prob. > N	Estatística χ^2	Prob. > χ^2
CKA	-12,9475	0,0000	243,0040	0,0000
Linear	-15,0092	0,0000	256,6410	0,0000
Log log	-19,0201	0,0000	286,3750	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Isto indica que a aplicação do método regressivo em primeira diferença pelo MQGF com quebra estrutural foi suficiente para solucionar o problema de não estacionariedade das séries. Logo, é possível confiar nas estimações e fazer as inferências cabíveis. Antes de

proceder com uma análise mais minuciosa da magnitude dos efeitos de uma variável sobre outra, é conveniente selecionar o modelo com melhor ajuste.

5.1.4 A Escolha do Melhor Modelo – Teste Davidson-MacKinnon e os Critérios de Akaike e Schwarz

O primeiro critério utilizado é a aplicação do Teste Davidson-MacKinnon para escolha entre o modelo linear e o log-log, Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Significância dos coeficientes que compõem o Teste Davidson-MacKinnon

Modelo representado pelo coeficiente	Estatística z	Prob> z
Linear	2,79	0,005
Log-log	8,75	0,000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Pelo Teste Davidson-MacKinnon, pode-se aceitar qualquer um dos dois modelos analíticos, porém, o modelo log-log é preferencial sobre o linear, uma vez que apresenta maior estatística z. Na Tabela 5.9, encontram-se as saídas das estatísticas de Akaike e Schwarz, também utilizadas como critério de seleção dos modelos.

Tabela 5.9. Critérios de Akaike e Schwarz para escolha do modelo com melhor ajuste

Modelo	AIC	BIC
Linear	10676	10745
Log-log	-1891	-1823

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os critérios de Akaike e Schwarz confirmam o indício fornecido pelo Teste Davidson-MacKinnon. O modelo de melhor ajuste é o log-log, pois apresenta os menores valores para esses critérios. Utilizando os dados da regressão do modelo selecionado, expostos na Tabela 5.6, compõem-se as seguintes equações:

$$\ln(CO_{2it}) = 0,1059 \ln(PIB_{it}) + 2,9808 \ln(POP_{it}) \quad (5.1)$$

$$\ln(CO_{2it}) = 0,1009 \ln(PIB_{it}) + 2,9808 \ln(POP_{it}) \quad (5.2)$$

A Expressão 5.1 descreve a relação entre as variáveis estudadas até o ano de 1973 e a Expressão 5.2²⁴ representa esta relação a partir de 1974. A função entre emissões de CO₂ e PIB assume a forma logarítmica nas duas equações, uma vez que, o coeficiente angular da variável $\ln(\text{PIB})$ está entre 0 e 1, conforme representado na Figura 5.1.

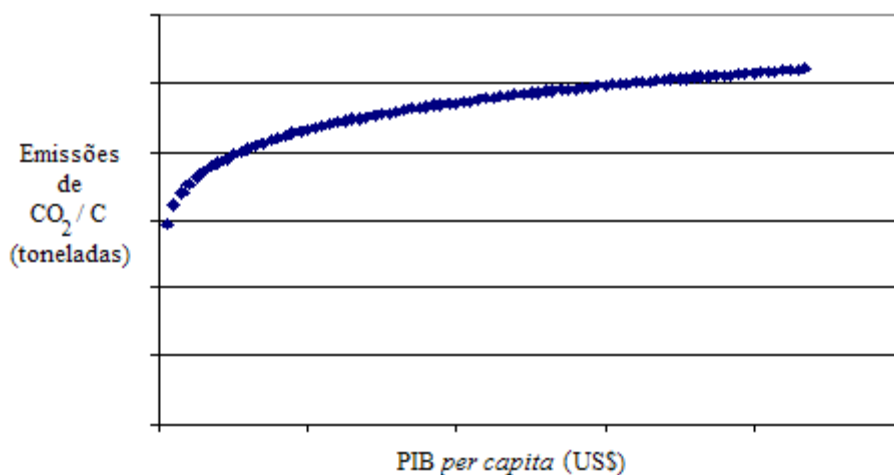


Figura 5.1. A relação entre PIB e emissões de carbono e de dióxido de carbono.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Segundo Greene (2003), em um modelo log-log, o coeficiente angular representa a elasticidade entre as variáveis dependente e explicativa. Assim, os resultados mostram que o aumento de 1% no acréscimo anual²⁵ do PIB *per capita* causa o aumento de aproximadamente 0,1% no acréscimo anual das emissões de carbono por combustíveis fósseis. Isso mostra que um aumento do PIB *per capita* gera um aumento nas emissões em magnitude proporcionalmente menor.

De forma geral, a forma funcional encontrada revela que o aumento do PIB gera um aumento nas emissões de carbono, porém, a uma taxa cada vez menor. É importante ressaltar que apesar das taxas decrescentes, os resultados não apontam para uma reversão da tendência ascendente. Nesse sentido, quando comparado com a literatura nacional, os resultados obtidos no presente estudo refutam a CKA, diferentemente de Arraes et al. (2006), em que se verificou a existência da Curva de Kuznets Ambiental para as emissões de diversos países. Resultados diferentes também foram encontrados em Carvalho e Almeida (2008), que

²⁴ Para se calcular o coeficiente 0,1009, foi necessário subtrair o valor do coeficiente de quebra (0,0050) do coeficiente referente ao $d.\ln\text{PIB}$ indicado na Tabela 5.6.

²⁵ Como as variáveis estão em primeira diferença, os impactos do PIB *per capita* sobre as emissões são medidos em acréscimos anuais, ou seja, são consideradas as mudanças nas diferenças entre um determinado ano e o ano seguinte.

verificou uma relação em formato N para as mesmas variáveis. Segundo Stern (2004), o formato N provavelmente é uma aproximação polinomial a uma função logarítmica, o que corroboraria os resultados do presente trabalho. Os resultados encontrados por Sampaio e Máximo (2007) mostram-se também semelhantes ao deste estudo, quando analisados os setores industrial e de transporte no Brasil.

5.2 Análise das Emissões Brasileiras

Nesta seção, são analisadas as emissões brasileiras de CO₂. Inicialmente é feita uma comparação entre o recente nível de emissões no Brasil com o nível estimado pela curva encontrada na seção anterior. Na sequência, previsões de PIB e população são usadas para projetar o nível de emissões brasileiras e, então, as emissões recentes e projetadas são confrontadas com o aspecto ambiental do desenvolvimento sustentável.

5.2.1 O Ajustamento da Função às Emissões Observadas no Brasil

O modelo log-log foi tomado para estimar as emissões de carbono para o Brasil no período de 1956 à 1998, as equações utilizadas foram:

$$\ln(CO_{2it}) = 0,0227 + 0,1059 \ln(PIB_{it}) + 2,9808 \ln(POP_{it}) \quad (5.3)$$

para o período de 1956 à 1973, e

$$\ln(CO_{2it}) = 0,0227 + 0,1009 \ln(PIB_{it}) + 2,9808 \ln(POP_{it}) \quad (5.4)$$

de 1974 até 1998.

Com o objetivo de avaliar o poder de previsão das funções encontradas, confronta-se as emissões observadas com as emissões estimadas. Observa-se que existe coincidência entre a trajetória dos dois tipos de emissões e que esta trajetória é semelhante à forma logarítmica (Figura 5.2).

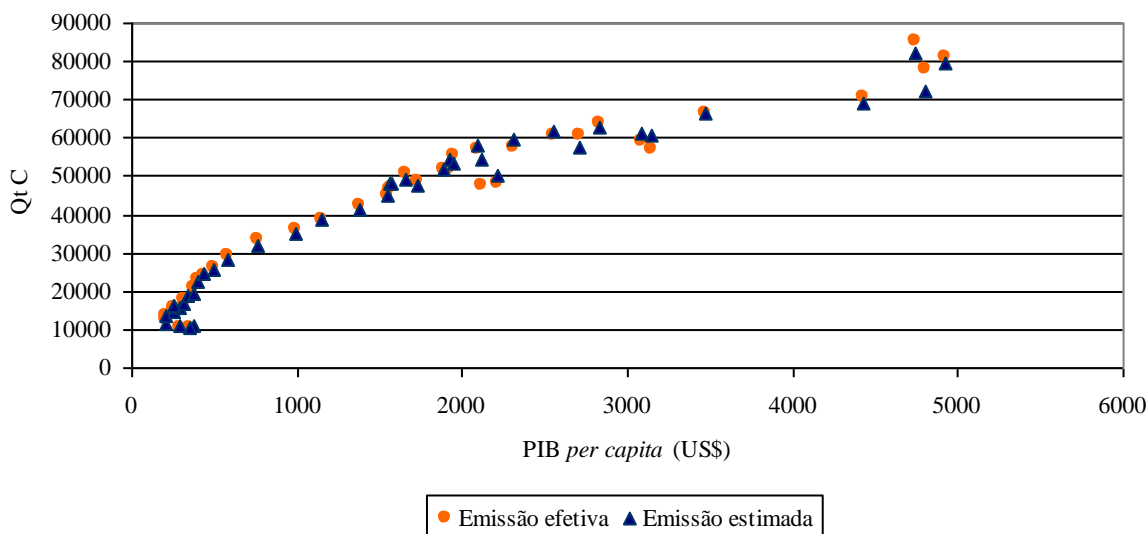


Figura 5.2. Emissões efetivas e estimadas de carbono.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Outra comparação importante pode ser visualizada na Figura 5.3, em que a dimensão temporal é inserida.

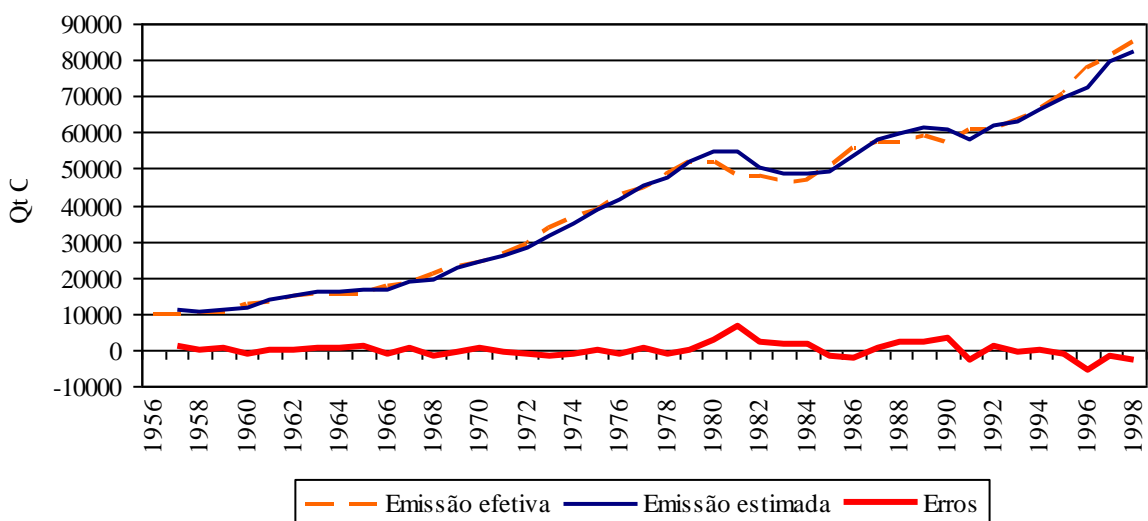


Figura 5.3. Emissões efetivas e estimadas de CO₂ e os erros ao longo do tempo.

Fonte: Resultados da pesquisa.

A proximidade das trajetórias e a minimização dos erros corroboram a boa qualidade do ajustamento das regressões. Este fato torna as projeções que serão feitas a partir das funções estimadas mais confiáveis, possibilitando assim, inferências mais seguras acerca do comportamento futuro das emissões brasileiras.

5.2.2 Sustentabilidade Ambiental das Emissões Brasileiras Recentes e Projetadas

Os dados mais recentes para emissões de CO₂ por combustíveis fósseis no Brasil são de 2004 (HESTON, 2002). Nesse ano, as emissões atingiram 0,49 t de carbono *per capita*, que equivale a 1,80 t de dióxido de carbono emitido por pessoa. O limite sustentável mundial²⁶ é de 3,9 t CO₂ *per capita*, o que mostra que o Brasil estaria em um nível de emissões sustentável.

A situação muda quando as emissões de CO₂ originárias de biomassa florestal são incluídas. As emissões absolutas excedentes passam a ser de 606.264 Qt CO₂, que podem ser expressas como 165.465 Qt C. As emissões *per capita* passam a ser 7,20 t CO₂²⁷, extrapolando o limite sustentável. Seguindo os critérios sugeridos em ONU (2007), pode-se dizer que se as emissões totais *per capita* brasileiras fossem seguidas pelas emissões mundiais, seriam necessários três planetas Terra para suportar o patamar de emissões observado no ano de 2004, pois, este nível está mais que duas vezes maior que o limite de emissões sustentáveis *per capita*.

Segundo a ONU (2007), as emissões *per capita* dos Estados Unidos eram, em 2004, de 20,6 t CO₂. Considerando a grande diferença²⁸ de renda entre o Brasil e os EUA, seus impactos ecológicos estão muito próximos. Existem dois fatores que podem explicar esse fato. Primeiro, a menor intensidade de poluição nos maiores níveis de renda, uma vez que, a função é logarítmica; e segundo, os EUA não emitiram CO₂ de florestas e ainda efetuaram o seqüestro de carbono através do aumento da biomassa florestal.

A mesma análise pode ser extrapolada para cenários futuros. Para isso, primeiro foram feitas as estimações do nível de emissões para as próximas décadas utilizando projeções²⁹ do PIB e da população brasileira e aplicando-as na função estimada pela Expressão 5.2. Em seguida, foram calculados os intervalos de confiança. O bom ajustamento das regressões refletiu em intervalos estreitos, ou seja, com pouca variabilidade, ainda que se tenha utilizado um nível de 99% de confiabilidade. Para enriquecer a análise, tomou-se os dois extremos dos intervalos de confiança com o objetivo de montar um cenário otimista, com emissões mais baixas, e um cenário pessimista com as maiores emissões. As projeções podem ser visualizadas na Tabela 5.10.

²⁶ Nível de emissões anuais sustentáveis no mundo seria de 25 Gt de CO₂ [PACALA e SOCOLOW (2004), STERN (2006)].

²⁷ Cálculo efetuado utilizando a proporção de emissões brasileiras de florestas contabilizadas pelo inventário brasileiro de emissões para o ano base 1994 que é 75% (MCT, 2006).

²⁸ O PIB *per capita* dos EUA é mais de onze vezes o PIB *per capita* brasileiro.

²⁹ Dados obtidos na Goldman Sachs (2007) e US Census Bureau (2009).

Tabela 5.10. As emissões para as próximas décadas

Anos	2020	2030	2040	2050
PIB <i>per capita</i> brasileiro (US\$)	10.375	16.694	29.026	49.759
População brasileira (em milhões)	212	223	228	228
Emissões brasileiras de combustíveis fósseis no cenário otimista (Mt CO ₂)	662	805	900	930
Aumento das emissões de combustíveis fósseis no Brasil no cenário otimista (% base 2004)	100	143	171	181
Emissões <i>per capita</i> brasileiras de combustíveis fósseis no cenário otimista (t CO ₂)	3,12	3,61	3,95	4,08
Emissões brasileiras de combustíveis fósseis no cenário pessimista (Mt CO ₂)	691	845	965	1.039
Aumento das emissões de combustíveis fósseis no Brasil no cenário pessimista (% base 2004)	108	155	191	213
Emissões <i>per capita</i> brasileiras de combustíveis fósseis no cenário pessimista (t CO ₂)	3,26	3,79	4,23	4,56
População mundial (em milhões)	7.662	8.379	9.005	9.536
Nível sustentável mundial em (Gt CO ₂)	25	25	25	25
Nível sustentável <i>per capita</i> (t CO ₂)	3,26	2,98	2,78	2,62

Fonte: Goldman Sachs (2007), US Census Bureau (2009), Stern (2007) e resultados da pesquisa.

As projeções obtidas revelam que as emissões anuais de dióxido de carbono por combustíveis fósseis no Brasil, mesmo no cenário otimista, aumentarão 100% até 2020 e cerca de 181% até 2050. Isto significa que essas emissões serão equivalentes a, aproximadamente, 4,08 toneladas de CO₂ em 2050. Considerando as projeções da população mundial, estimou-se o nível *per capita* sustentável de emissões por combustíveis fósseis. Essa informação serve como um limite sustentável de crescimento. Os resultados mostram que, em 2030, um planeta já não seria suficiente para suportar a quantidade emitida de carbono caso o nível de emissão previsto para o Brasil fosse o mesmo do mundo inteiro. As emissões médias estimadas e as emissões sustentáveis podem ser visualizadas na Figura 5.4.

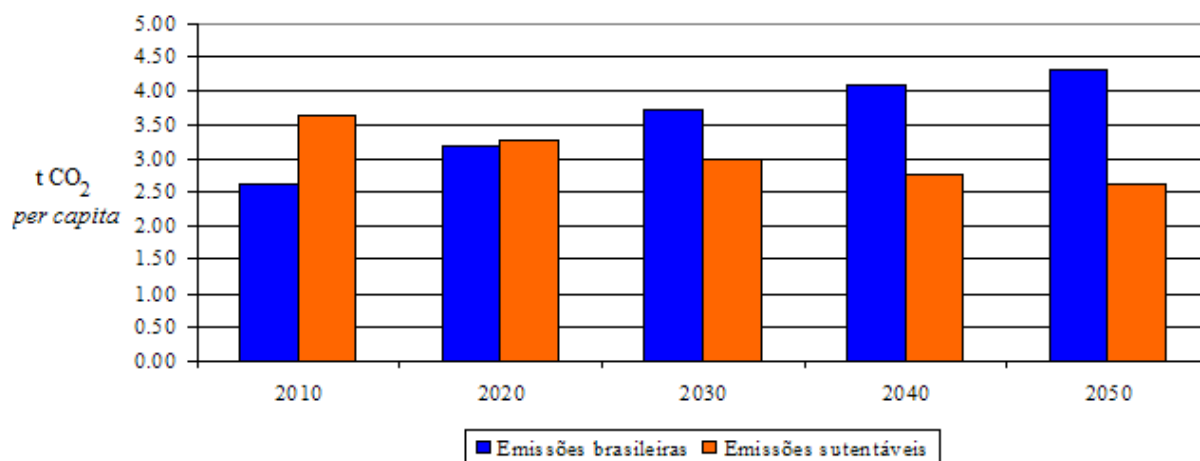


Figura 5.4 Projeções para as emissões brasileiras por combustível fóssil e as emissões sustentáveis *per capita*.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Observa-se que, em 2020, as emissões brasileiras estarão na iminência de se igualarem às emissões sustentáveis, ultrapassando-as nas projeções subseqüentes. É interessante salientar que, ao longo do tempo, aumenta-se a diferença entre as emissões até quase dobrar em meados do século XXI.

Para que o limite de sustentabilidade não seja ultrapassado, foram estabelecidos percentuais de redução com base nas emissões estimadas dos respectivos anos para os dois cenários esperados (Tabela 5.11).

Tabela 5.11. Necessidade de redução das emissões por combustíveis fósseis

Anos	2020	2030	2040	2050
Necessidade de redução no cenário otimista (Mt CO ₂)	-	140	267	333
% mínimo de redução no cenário otimista	-	17	30	36
Necessidade de redução no cenário pessimista (Mt CO ₂)	-	180	332	441
% mínimo de redução no cenário pessimista	-	21	34	42

Fonte: Resultados da pesquisa.

Se o nível das emissões obedecer o comportamento estimado, as emissões de dióxido de carbono por combustíveis fósseis ainda serão sustentáveis. Para o ano de 2030, seria necessário diminuir em 17% as emissões prováveis no cenário otimista e 21% no cenário pessimista. De forma semelhante, esta redução precisaria ser de 36% em 2050 no cenário otimista e 42% no pessimista. O problema se agrava, caso as emissões por queimadas venham a manter as mesmas proporções (75%) frente às emissões totais nas próximas décadas. A

Tabela 5.12 mostra os resultados encontrados para a necessidade de redução das emissões totais considerando esta hipótese.

Tabela 5.12. Necessidade de redução das emissões totais

Anos	2020	2030	2040	2050
Necessidade de redução no cenário otimista (Mt CO ₂)	1956	2556	2967	3123
% mínimo de redução no cenário otimista	74	79	82	84
Necessidade de redução no cenário pessimista (Mt CO ₂)	2073	2716	3226	3557
% mínimo de redução no cenário pessimista	75	80	84	86

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Emissões totais inclui emissões por combustíveis fósseis e por biomas florestais. Para isto, o nível de emissões por combustíveis fósseis foi projetado e então adicionado as emissões por biomas florestais, mantendo as proporções das emissões totais brasileiras de 1994.

Neste caso, a diferença entre os cenários é muito pequena uma vez que esta se aplica ao caso das emissões por combustíveis fósseis, que representam somente 25% das emissões totais. Ao se incluir as emissões de florestas na análise, as previsões indicam que é necessário reduzir no mínimo 74% do volume esperado para 2020. Utilizando o limite sustentável mundial de 25 Gt de CO₂, estima-se que seriam necessários sete planetas Terra para suportar as emissões brasileiras em 2050, caso o volume *per capita* mundial seguisse o comportamento atual.

Diante dos resultados expostos, é necessário que as medidas para conter as emissões por biomas florestais tenham caráter emergencial, pois o atual paradigma já é insustentável quando se tratam das emissões totais. No caso das emissões por combustíveis fósseis, que estão fortemente relacionadas à renda, a situação recente se mostra sustentável. No entanto, se o crescimento das emissões por esses combustíveis seguirem o comportamento esperado, em ambos os cenários, o nível sustentável será ultrapassado na década de 2020. Estas projeções foram feitas observando os efeitos dos crescimentos econômico e populacional nas emissões, com dados anteriores aos efeitos palpáveis de políticas públicas³⁰ sobre as emissões de CO₂.

Como se observou, o crescimento econômico por si só não leva a um desenvolvimento sustentável no quesito emissões de dióxido de carbono. É necessária a participação do Estado para a condução deste caminho através de medidas regulatórias e incentivos que propiciem o desenvolvimento tecnológico capaz de aumentar a eficiência ambiental. É importante ressaltar

³⁰ O último ano da série histórica utilizada no presente trabalho foi 1998, ano de assinatura do Protocolo de Quioto. Nacionalmente, a primeira medida pública visando mitigação dos problemas relacionados ao efeito estufa é a criação do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima em 1997. O maior esforço nesse sentido ocorreu em 2008 com a criação da Política Nacional sobre Mudança do Clima. Estas políticas têm o objetivo de diminuir as emissões dos GEE. Para maiores detalhes ver www.mct.gov.br.

que as projeções foram feitas com base em dados observados do passado, incluindo países já desenvolvidos na amostra. Esta situação reflete o paradigma dos países estudados, seus modelos de desenvolvimento, suas condições tecnológicas, políticas e econômicas no período. Os cenários previstos para as emissões brasileiras podem ser modificados, pois o país encontra-se em processo de desenvolvimento. Portanto, os resultados devem ser encarados como uma oportunidade para se melhorar as condições para toda a sociedade no futuro.

6. Resumo e Conclusões

O aquecimento global é um grande desafio para a sociedade contemporânea e suas causas estão relacionadas principalmente à grande concentração de gases do efeito estufa na atmosfera. O dióxido de carbono é o gás de maior contribuição para o efeito estufa. Sua concentração aumentou aproximadamente 50% desde o período pré-industrial (ONU, 2007).

O presente trabalho se propôs a verificar a relação existente entre crescimento econômico e emissão de dióxido de carbono por combustíveis fósseis nos países selecionados, analisando as perspectivas para o caso brasileiro. Inicialmente, refutou-se a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental para o caso das emissões estudadas. Em seguida, estabeleceu-se que a curva que relaciona crescimento econômico e emissões de CO₂ descreve uma trajetória logarítmica, ou seja, uma função crescente com taxas de crescimento decrescentes.

Caso o comportamento mundial seja semelhante ao verificado nos treze países estudados, a trajetória das emissões tornaria a situação insustentável no longo prazo e também no curto prazo, uma vez que o nível de emissões mundial já precisa ser reduzido.

Analisando o caso brasileiro no ano de 2004, o nível de emissões de CO₂ de combustíveis fósseis estava em um patamar sustentável. A situação muda quando se adiciona as emissões de CO₂ originadas de mudanças no uso da terra e florestas. Considerando o nível máximo de emissões sustentáveis em 25 Gt de CO₂ no mundo, pode-se dizer que se as emissões *per capita* brasileiras, incluindo as emissões por queimadas, fossem reproduzidas em todo mundo, seriam necessários três planetas Terra para suportar essas emissões.

As projeções mostram que as emissões de CO₂ de combustíveis fósseis permanecerão sustentáveis até 2020, mas sem que haja uma mudança na tendência, seriam necessários dois planetas Terra para suportar a pressão ambiental se a quantidade de emissões *per capita* brasileiras fosse reproduzida por todo mundo em 2050. Utilizando o mesmo critério e adicionando as emissões provenientes de florestas nas mesmas proporções do último inventário nacional de emissões, seriam necessários sete planetas Terra.

Os resultados revelam informações importantes sobre o comportamento futuro das emissões, permitindo implementar a melhor condução da política pública para a manutenção do desenvolvimento sustentável. O estudo pode ainda ser complementado em diversas dimensões a fim de enriquecer o conhecimento sobre o assunto. Uma lacuna que ainda está por ser preenchida é a análise do comportamento das emissões de dióxido de carbono proveniente de queimadas, que sejam baseados em dados referentes à mudança no uso da terra e ofereçam maior confiabilidade a estas estimativas. Deve-se também ampliar o estudo aos

demais gases do efeito estufa. Por fim, outra questão importante que deve ser estudada é o isolamento do efeito do progresso tecnológico e do ambiente institucional sobre a redução de emissões.

A partir dos resultados encontrados, é possível inferir que o crescimento econômico, por si só, não é capaz de promover um desenvolvimento sustentável em termos de emissões de dióxido de carbono. No caso brasileiro, políticas de redução de CO₂ devem ser implementadas com urgência, para promover a sustentabilidade ambiental. Considerando que a partir da década de 2020, as emissões por combustíveis fósseis nacionais deixam de ser sustentáveis, uma medida preventiva seria o estímulo a investimentos em novas tecnologias poupadoras de recursos naturais não-renováveis. Este é o caminho necessário para crescer de forma sustentável e garantir condições favoráveis para as próximas gerações.

Referências

AGRAS, J.; CHAPMAN, D. “A dynamic approach to the Environmental Kuznets Curve hypothesis.” *Ecological Economics*, New York, v. 28, p. 267-277, 1999.

ANSUATEGI, A.; ESCAPA, M. “Economic growth and greenhouse gas emissions.” *Ecological Economics*, v. 40, p. 23-37, 2002.

ARRAES, R. A., DINIZ, M. B., DINIZ, M. J. T. “Curva ambiental de *Kuznets* e desenvolvimento econômico sustentável.” *Revista de Economia Rural*, vol 44, p. 525 – 547, 2006.

ARROW, K.; BOLIN, B.; CONSTANZA, R.; DASGUPTA, P.; FOLKE, C.; HOLLING, C.S.; JANSON, B.O.; LEVIN, S.; MÄLER, K.; PERINGS, C.; PIMENTEL, D. “Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment”. *Science* n.268, 1995.

BARBIERI, L. (2006), “Panel Unit Root Tests: A Review”, *Quaderni del Dipartimento di Scienze Economiche e Sociali, Serie Rossa, n.43*, Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza.

BARROS, F. H. G. E., MUELLER, Bernardo Pinheiro Machado, NOGUEIRA, Jorge Madeira. “Crescimento Econômico e Meio Ambiente: O que Está Faltando para Entender o Elo Entre Eles?” *Anais da ANPEC*, v.37. Recife, 2007.

BAUMERT, K.A.; HERZOG, T.; Pershing, Jonathan. “Navigating the numbers – Greenhouse Gas Data and International Climate Policy.” *World Resources Institutes*, 2005.

BAUMOL, W. J.; OATES, W. E. “The theory of environmental policy.” *Cambridge: Cambridge University Press*, 1988.

BERRENS, R. P.; GRIJALVA, T.; LI, H. “Economic growth and environmental quality: a meta-analysis of Environmental Kuznets Curve studies.” *Economics Bulletin*, v. 17, n. 5, p. 1-11, 2007.

CALLAN, S. J.; THOMAS, J. M. “Environmental economics and management – Theory, policy and applications.” *Canada, Thomson South-western*, 4 Edition, 2007.

CARVALHO, T. S. ; ALMEIDA, E. S. “A Hipótese da Curva de Kuznets Ambiental Global: uma perspectiva econométrica espacial.” In: Encontro Nacional de Economia da ANPEC, 2008, Salvador, BA. Anais do 36º Encontro Nacional de Economia da ANPEC, 2008.

CAVIGLIA-HARRIS, J. L.; CHAMBERS, D.; KAHN, J.R.; “Taking the “U” out of Kuznets – A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation.” *Ecological Economics*, v. 68, n. 4, p. 1149-1159, 2008.

CHOI, I. “Unit root tests for panel data”, *Journal of International Money and Finance*, v. 20, p. 249-272, 2001.

CIRINO, J.F. “Valoração contingente da Área de Proteção Ambiental (APA) São José: um estudo de caso.” Viçosa, MG. DER-UFV, 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada).

COASE, R. “The problem of Social Cost” *Journal of Law and Economics*, v. 3, p. 1-44, 1960.

D’ARGE, R.C.; KOGIKU, K. “Economic Growth and the Environment.” *Review of Economic Studies*, v.40, p. 61-77, 1973.

DALY, H. “Beyond Growth – The Economics of Sustainable Development.” Beacon Press, Boston, 1996.

DASGUPTA, S.; LAPLANTE, B.; WANG, H.; WHEELER, D. “Conforming the Environmental Kuznets Curve” *The Journal of Economic Perspectives*, v. 16, n. 1, p. 147-168, 2002.

DE BRUYN, S. M.; Bergh, J.C.J.M; Opschoor, J.B. “Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves.” *Ecological Economics* 25, 761–175, 1998.

DIAS, J.; DIAS, M.H.A. “Crescimento Econômico e as Políticas de Distribuição de Renda e Investimento em Educação nos Estados Brasileiros: Teoria e Análise Econométrica.” *Est. Econ.* v.37, n.4, p.701-743. São Paulo: 2007.

DIJKGRAAF, E.; VOLLEBERGH, H.R.J. “A Note on Testing for Environmental Kuznets Curves with Panel Data.” OCFEB: Milão, 2001.

DRUKKER, D. M. "Testing for serial correlation in linear panel-data models." *The Stata Journal*, n. 2, p. 168-177, 2003.

EKINS, P. "The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth: Examining the Evidence." *Environment and Planning*, v.29, p. 805-830, 1997.

EPE. "Balanço Energético Nacional." Ministério de Minas e Energia, 2008. Disponível: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2008.aspx>> Acesso em: 20/11/2008.

FRIEDL, B.; GETZNER, M. "Determinants of CO₂ emissions in a small open economy." *Ecological Economics*, v. 45, p. 133-148, 2003.

FRITZ, O. M.; SONIS, M.; HEWINGS, G. J. D. "A Miyazawa analysis of interactions between polluting and non-polluting sectors." *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 9, p. 289-305, 1998.

GEORGESCU-ROEGAN, N. "The entropy law and the economic process." Cambridge: Harvard University Press, 1971.

GOMES, S.C. "Análise Econométrica da Produtividade Total dos Fatores na Amazônia Legal, 1990 – 2004." Viçosa: 2007. 224p.

GOLDMAN SACHS. "BRICs and Beyond. 2007." Disponível: <<http://www2.goldmansachs.com/ideas/brics/BRICs-and-Beyond.html>> Acesso em: 15/11/2008.

GREENE, W. H. "Econometric Analysis." 5ª Edição. New Jersey: Pearson Education Inc, 2003. 828p.

GROSSMAN, G; KRUEGER, A. "Environmental Impacts of North American Free Trade Agreement." NBER Working Paper Series n. 3914, Cambridge: 1991.

G. GROSSMAN; KRUEGER, A. "Environmental impacts of a North American free trade agreement" *The U.S.-Mexico Free Trade Agreement*, Cambridge: The MIT Press, 1993.

GROSSMAN, G; KRUEGER, A. "Economic Growth and the Environment." *Quarterly Journal of Economics*, v.110, n.2, p.353-377, 1995.

GUJARATI, D. N. "Econometria Básica." 4ª edição. São Paulo: Makron Books, 2006. 812p.

HANLEY, N.; SHOGREN, J. F.; WHITE, B. "Environmental Economics in Teory and Praticce." Oxford University Press: New York, 1997.

HARBAUGH, W.; LEVINSON, A.; WILSON, D. "Reexaming The Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve." NBER Working Paper 7711, 2001

HART, S. "How green production might sustain the world." Journal of the northwest environmental, 1994, 10: 4-14.

HESTON, A.; SUMMERS R.; ATEN, B. "Penn World Table." Pennsylvania: 2002. Disponível: <<http://pwt.econ.upenn.edu/Downloads/index.htm>> Acesso em: 05/01/2008.

HOLTZ-EAKIN, D.; SELDEN, T. M. "Stoking the fires? CO₂ emissions and economic growth." Journal of Public Economics, v. 57, p. 85-101, 1995.

IPCC. "Summary for Policymakers." In: "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate *Change*." Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

KNEESE, A. V.; AYRES, R. RU.; D'ARGE, R. C. "Economics and the environment: A materials balance aproach." Washington DC: Resources for the future, 1970.

KUZNETS, S. "Economic Growth and Income Inequality." American Economic Review, v.45, p.1-28. 1955.

LEE, C.; LEE, J. "Income and CO₂ emissions: Evidence from panel unit root and cointegration tests." Energy Policy, n. 37, p. 413-423, 2009.

LEVIN, A.; LIN, C.F.; CHU, C.S.J "Unit root tests in panel data: asymtotic and finite-sample properties." Journal of Econometrics, v. 108, p. 1-24, 2002.

MADDISON, D. "Environmental Kuznets curves: A spatial econometric approach." Journal of Environmental Economics and Management, London, vol. 51, p. 218-230, 2005.

MARLAND, G.; BODEN, T.; ANDRES, R. J. "Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions." In: "Trends: A Compendium of Data on Global Change." Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy,

Oak Ridge, Tenn., U.S.A. Disponível: <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/CSV-FILES/nation.1751_2004.csv> Acesso em: 20/12/2007.

MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; BENGOCHEA-MORANCHO, A. “Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO₂.” *Economics Letters*, v. 82, p. 121-126, 2004.

MARTINS, A. R. P. “Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise das Limitações do Índice de Desenvolvimento Humano para Refletir da Sustentabilidade Ambiental.” Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Niterói, 2006.

MATTOS, C. “Desenvolvimento sustentável nos territórios da globalização: alternativa de sobrevivência ou nova utopia?” In: BECKER, Bertha K.; MIRANDA, Mariana (Org.). “A geografia política do desenvolvimento sustentável.” Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997, p. 103– 126.

MCT. “Efeito estufa e a convenção sobre a mudança no clima.” 1999. Disponível: <www.mct.gov.br> Acesso em: 10/12/2008

MCT. “Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.” 2006. Disponível: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/25441.html>> Acesso em 02/12/2008.

MEADOWS, D. H.;MEADOWS, D. L.;RANDERS, J.;BEHRENS, W.W. “The Limits To Growth.” New York: Universe Books, 1972.

MUNASINGHE, M. “Is Environmental Degradation an Inevitable Consequence of Economic Growth: Tunneling Through the Environmental Kuznets Curve.” *Ecological Economics* n.39 p. 89-109, 1999.

NORDHAUS, W. D. “Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem.” *The American Economic Review*, v. 67, n.1, p. 341-346, 1977.

NORDHAUS, W. D. “To slow or not to slow: The Economics of the Greenhouse Effect” *The Economic Journal*, v. 101, n. 407, p. 920-937, 1991.

ONU. “Relatório de Desenvolvimento Humano 2007/2008 – Combater as alterações climáticas: solidariedade humana num mundo dividido.” Coimbra: Edições Almedina, 2007.

PACALA, S.; SOCOLOW, R. “Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies.” *Ciencemag*, v. 305, p.968, 2004.

PANAYOTOU, T. “Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development” ILO Technology and Employment Programme Working Paper, WP238 (Geneva), 1993;

PANAYOTOU, T. “Economic Growth and the Environment.” Harvard University and Cyprus International Institute of Management, 2003.

PEARCE, D. W e TURNER, R. K. “Economics of Natual Resources and The Environment.” Baltimore: The Jorns Hopkins University Press, 1990.

PEDRONI, P. “Panel Cointegration; Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests, with an Application to the PPP Hypothesis” *Indiana University Working Papers in Economics*, n. 95-013, 1995.

PEDRONI, P. “Panel Cointegration; Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests, with an Application to the PPP Hypothesis: New Results” Working Paper, Indiana University, 1997.

PEREIRA, A.; MAY, P. “Economia do aquecimento global.” In : May, Peter; Lustosa, Maria Cecília; Vinha, Valéria da (orgs.), “Economia do meio ambiente: teoria e prática.” Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

REDCLIFT, M. “Sustainable Development – Exploring the Contradictions.” Londres: Richard Clay Ltd, 1992.

ROMERO-ÁVILA, D. “Questioning the empirical basis of the environmental Kuznets curve for CO₂: New evidence from a panel stationarity test robust to multiple breaks and cross-dependence.” *Ecological Economics*, v. 64, p. 559-574, 2008.

RUTHERFORD, T.; MONTGOMERY, W.; BERNSTEIN, P. “CETM: a dynamic general equilibrium model of global energy markets, carbon dioxide emissions and international trade.” Working Paper 97-3 , Boulder: University of Colorado, 1997.

SACHS, I. “Meio-ambiente e desenvolvimento: estratégias de harmonização.” In: ANDRADE, M.C et al. “Meio-ambiente, desenvolvimento e subdesenvolvimento.” Hucitec, São Paulo, 1975.

_____. “Recursos, emprego e financiamento do desenvolvimento: produzir sem destruir – o caso do Brasil.” Revista de economia política, 10 (1): 111-132, jan-mar, 1990.

_____. “Estratégias de transição para o século XXI.” In: BURSZTYN, M (org.) “Para pensar o desenvolvimento sustentável.” Editora Brasiliense, São Paulo, 1993. p. 29-56.

SAMPAIO, D. O. ; MAXIMO, P. “Curva Ambiental de Kuznets para a Emissão de CO2 no Brasil - 1970 - 2002.” In: XLV Congresso da Sociedade de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2007, Londrina. XLV Congresso da Sober, 2007.

SELDEN, T.M.; SONG, D. “Environmental Quality and Development: is there a Kuznets Curve for air Pollution Emission ?” Journal of Environmental Economics and Management, v. 27, p.147-162, 1994.

SEROA DA MOTTA, R. . “Economia Ambiental.” Rio de Janeiro: FGV Editora, 2006.

SHAFIK, N; BANDYOPADHYAY, S; “Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Cross-Country Evidence.” World Development Report Working Papers, 1992.

SHAFIK, N. “Economic Development and Environmental Quality: An Econometric Analysis,”. Oxford Economic Papers, 1994. v. 46, p. 757-773.

STATA. Disponível: < <http://www.stata.com/>> Acesso em: 10/02/2008.

STERN, D. I; PERMAN, R. “Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve dos not exist.” The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, n. 47:3, p. 325-347, 2003.

STERN, D. I. “The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve.” World Development, v. 34, n. 8, p. 1419-1439, 2004.

STERN, N. “The economics of climate change: The Stern Review.” Cambridge University Press, 2006.

SURI, V.; CHAPMAN, D., “Economic Growth, Trade and Energy: Implications for the Environmental Kuznets Curve” *Ecol. Econ.*, v.25, p. 195-208, 1998.

UNFCCC. “Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.” Disponível: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> Acesso em: 20/05/2008.

UNFCCC. “Kyoto Protocol status of ratification.” Disponível: <unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php> Acesso em: 07/02/2009.

UNRUH, G.; MOOMAW, W. “An alternative analysis of apparent EKC-type transitions”, *Ecological Economics*, Vol. 25, Issue 2, May 1998;

US. Census Bureau. “International Data Base.” Disponível: <<http://www.census.gov/prod/www/abs/popula.html#popest>> Acesso em: 20/01/2009.

XEPAPADEAS, A. “Economic Growth and the Environment.” In: MÄLER, K.G.; VINCENT, J.R. “Handbook of Environmental Economics”, v.3, p.1220-1271, Elsevier, 2005.

WCED. “Our Common Future.” Oxford: Oxford University Press, 1987. Disponível: <<http://www.ourcommonfuture.org/>> Acesso em: 10/10/2008.

WORLD BANK. “World Development Indicators database.” Disponível: <www.worldbank.org/data> Acesso em: 05/12/2008.

WOOLDRIDGE, J. M. “Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data.” MIT: 2002.

WOOLDRIDGE, J. M. “Introductory Econometrics – A modern approach.” South-Western College Pub, 2004.

ANEXO 1 – Correlação entre as variáveis.

A tabela a seguir mostra informações importantes sobre as variáveis que compõem o modelo.

Tabela A.1. Índice de correlação entre as variáveis

Variável	<i>CO₂</i>	<i>PIB</i>	<i>POP</i>	<i>DEND</i>
<i>CO₂</i>	1			
<i>PIB</i>	0.35	1		
<i>POP</i>	0.33	-0.21	1	
<i>DEND</i>	-0.20	0.02	-0.01	1

Fonte: Resultados da pesquisa

Nota: A densidade demográfica está representada pela variável DEND.

ANEXO 2 – Regressões preliminares.

Seguem abaixo as saídas do programa STATA para as regressões preliminares.

Tabela A.2. Resultado da regressão para o modelo CKA, linear e log-log.

Modelo CKA		Variável dependente: CO_2		
Variáveis independentes	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z	
<i>PIB</i>	7,3637	2,2532	0,001	
<i>PIB</i> ²	-0,0001	0,0002	0,495	
<i>PIB</i> ³	1,88e-09	3,17e-09	0,553	
<i>POP</i>	0,0009	0,000	0,000	
<i>C</i>	-11449,7600	7746,3030	0,140	
Medida de ajustamento global do modelo:		F(4,542)	241,96	
		Prob> <i>F</i>	0,000	

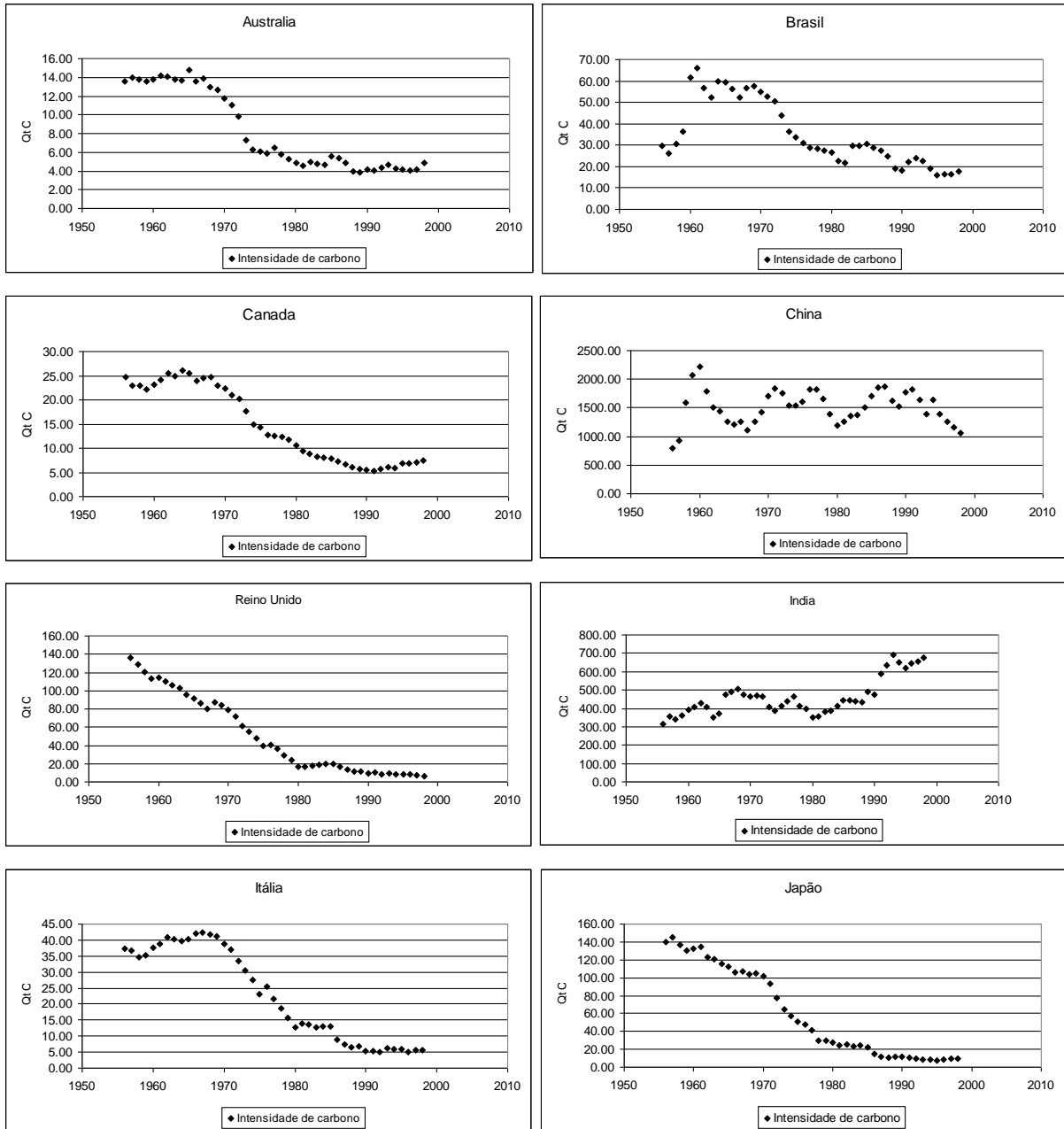
Modelo Linear		Variável dependente: CO_2		
Variáveis independentes	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z	
<i>PIB</i>	5,7362	0,4287	0,000	
<i>POP</i>	0,0009	0,0000	0,000	
<i>C</i>	-9079,8120	7040,3350	0,198	
Medida de ajustamento global do modelo:		F(4,544)	484,93	
		Prob> <i>F</i>	0,0000	

Modelo Log-log		Variável dependente: $\ln CO_2$		
Variáveis independentes	Coefficientes	Erro padrão	Prob> z	
<i>lnPIB</i>	0,2347	0,0159	0,000	
<i>lnPOP</i>	1,1793	0,0811	0,000	
<i>C</i>	-22,8880	1,3717	0,000	
Medida de ajustamento global do modelo:		F(4,544)	1772,85	
		Prob> <i>F</i>	0,0000	

Fonte: Resultado da pesquisa.

ANEXO 3– A intensidade de carbono no tempo.

Na figura abaixo estão representadas as intensidades de carbono de cada país que compõe a regressão.



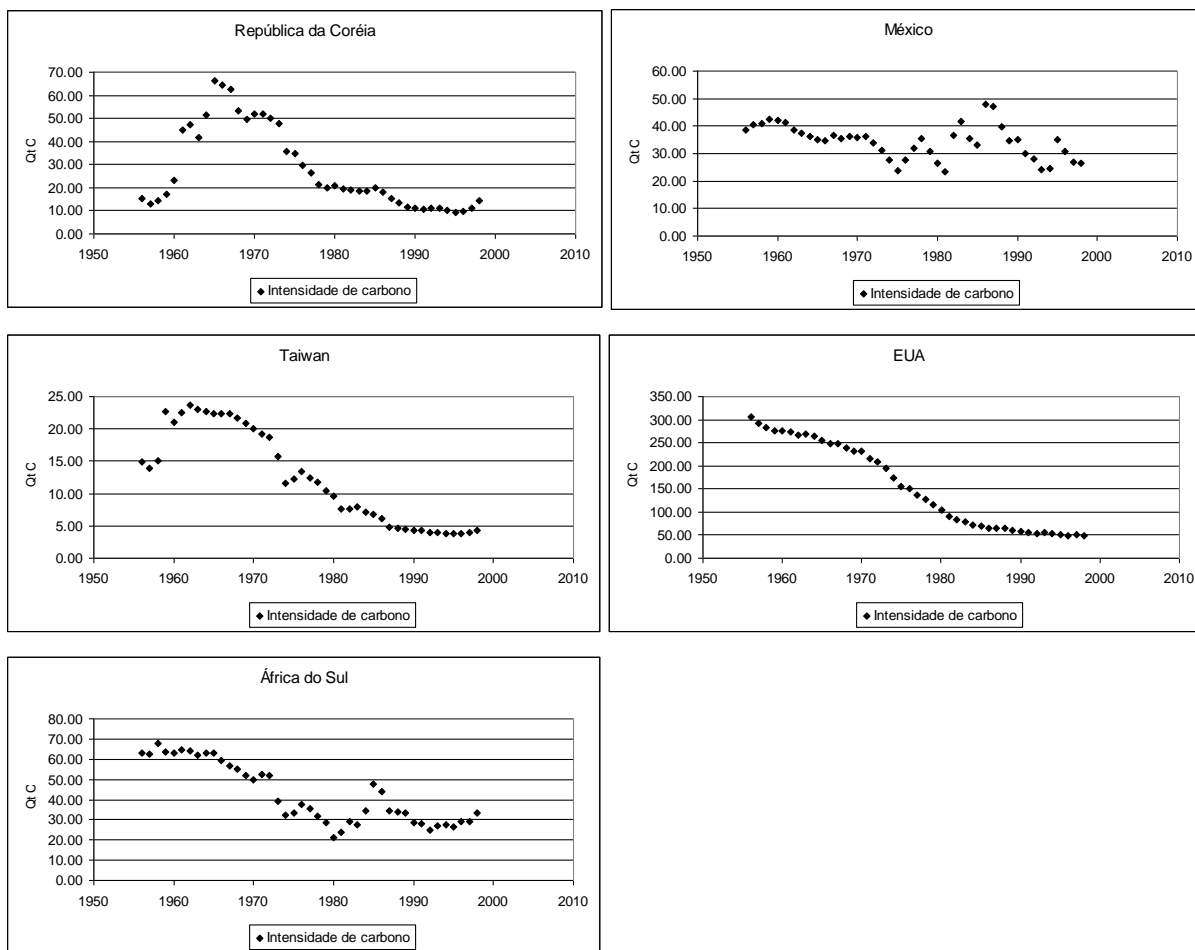


Figura A.1. O comportamento da intensidade de carbono nos países estudados.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: A intensidade de carbono foi calculada dividindo-se as emissões de carbono pelo PIB *per capita* disponibilizadas pela CDIAC (MARLAND, 2007).