

# OBSERVAÇÕES SOBRE A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL NO BRASIL PARA GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA

*Rafael Duregger<sup>1</sup>*

*Álvaro Martins Siqueira<sup>2</sup>*

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é verificar o respaldo empírico da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) referente à relação entre a emissão de carbono equivalente e o Produto Interno Bruto per capita no período de 1994 a 2013. A hipótese da CKA tem, desde sua formulação inicial por Grossman e Krueger, gerado controvérsias nas correntes teóricas que se dedicam a compreender os problemas ambientais a partir da economia. No centro do referido debate, disputa-se a forma da equação para variáveis ambientais – se é, de fato, em formato de ‘U’ invertido ou em formato de ‘N’. Os dados coletados tem por referência principal o quinto relatório do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC – AR5) e indicam, a partir de uma estimação de Mínimos Quadrados Ordinários, que a CKA não tende assumir o formato de ‘U’ invertido, mas um formado de 'N'. Assim, não é razoável sustentar a validade de hipótese da CKA para os gases causadores do efeito estufa emitidos no Brasil no período selecionado.

**Palavras-chave:** Curva de Kuznets Ambiental; Crescimento Econômico; Efeito Estufa.

**Abstract:** The objective of this article is to verify the empirical evidence of the Environmental Kuznets Curve (EKC) in relation to the equivalent carbon dioxide and the Gross Domestic Product per capita between 1994 and 2013. The EKC hypothesis has, since Grossman and Krueger initial formulation, caused controversy among the ambiental and ecological economics schools. Central to this debate is the shape of the relationship of economic and ambiental measures – if it has an inverted U-shape or a N-shape. The collected data’s groundwork is the fifth report of the International Panel for Climate Change (IPCC – AR5) and suggest, based on a Least Ordinary Squares estimation that the EKC tends not to follow the U-shaped form, but the N-shaped form. Therefore, it is not reasonable to sustain the validity of the EKC hypothesis for the brazilian greenhouse effect gases emission in the chosen period.

**Keywords:** Environmental Kuznets Curve; Economic Growth; Greenhouse Effect

**Área 4: Economia Agrária e Ambiental**

**JEL Classification:** Q00, C22, Q57.

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Araraquara-SP- Brasil. Mestrando em Economia. rafaelduregger@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Araraquara-SP- Brasil. Mestrando em Economia. alvaro\_martins\_siqueira@hotmail.com

## Introdução

A hipótese da chamada Curva de Kuznets Ambiental se disseminou nas discussões em economia principalmente a partir de dois artigos elaborados em coautoria por Gene Grossman e Alan Krueger em 1991 e 1995. O primeiro desses trabalhos consiste em um texto para discussão proposto pelos autores para fundamentar (favoravelmente) a instauração de um acordo de livre comércio para a América do Norte. No segundo, deu-se sequência ao estudo da relação empírica entre renda nacional e medidas de qualidade ambiental.

Em Grossman e Krueger (1991), alega-se que os impactos ambientais da liberalização comercial dependem não apenas do efeito escala, motor de degradação ambiental, mas também dos efeitos composição e tecnologia (técnica). Em outras palavras, é possível que a composição setorial da indústria se modifique, ampliando a composição “limpa” da produção e que as economias se beneficiem do aumento do produto com a incorporação de tecnologias poupadoras do meio ambiente. Esses dois últimos efeitos, segundo Grossman e Krueger (1991; 1995), seriam capazes de mais que compensar o efeito escala.

Apesar dos autores não anunciarem formalmente esta hipótese como a da “Curva de Kuznets Ambiental”, foi sob esta nomenclatura que a curva se tornou conhecida na teoria econômica. A inspiração quanto para nome se deve ao fato de que a curva de Kuznets (que lhe rendeu em 1971 o prêmio Nobel em economia) prevê que a relação entre crescimento do produto e desigualdade de renda assume a forma de parábola, retratando a tendência das economias emergentes de conseguir reduzir os níveis de desigualdade de renda a partir de um ponto de inflexão para a composição de qualificação da mão de obra. Num sentido análogo, a Curva de Kuznets Ambiental (doravante CKA) supõe uma relação entre crescimento econômico e indicadores ambientais que assume o formato de parábola. Na CKA, então, o crescimento econômico é capaz de gerar um efeito escala que no longo prazo traz benefícios para o meio ambiente.

Apesar das numerosas críticas dirigidas à formulação inicial de Grossman e Krueger (e principalmente às interpretações posteriores baseadas nessa formulação inicial), o direcionamento dos resultados empíricos está longe de ser conclusivo, como procuramos discutir mais adiante. O argumento da CKA ocupa, também, um lugar relevante no debate entre as correntes da Economia Ambiental e Economia Ecológica. Estas são as principais correntes de pensamento que interpretam e propõe soluções econômicas para os problemas ambientais causados, principalmente, pela própria atividade econômica.

Os economistas ambientais procuram equacionar ou exacerbar a lógica de mercado com o meio ambiente, seja defendendo a valoração econômica de recursos naturais ou propondo a instituição de direitos de propriedade para esses recursos. Os economistas ecológicos, por sua vez, partem um referencial significativamente interdisciplinar e têm como importante diferença da economia ambiental o caráter de sustentabilidade forte de suas concepções.

Barreto (2009, p. 4) aponta que a Economia Ambiental pode ser caracterizada pelos fundamentos de i) substituíbilidade perfeita dos recursos, ii) sinalização de preços como mecanismo eficiente de preservação, e iii) forte otimismo tecnológico. Já a Economia Ecológica tem por principais fundamentos a i) substituíbilidade limitada dos recursos, ii) a existência de limites ambientais absolutos para a expansão da produção e consumo, e iii) o limite relativo dos efeitos tecnológicos para aliviar as pressões ao meio ambiente. De forma sucinta, o cerne da crítica dos economistas ecológicos aos ambientais está na necessidade de reconhecer os limites dos mecanismos de mercado para a preservação do meio ambiente.

Embora estas não sejam as únicas interpretações em circulação sobre a temática do meio ambiente, são as mais difundidas e, como dito, têm na confirmação ou rejeição empírica da CKA uma de suas plataformas de disputa<sup>3</sup>. A Curva Ambiental de Kuznets costuma, desde Grossman e Krueger (1991),

---

<sup>3</sup> Barreto (2009, p. 20), por exemplo, apresenta uma perspectiva marxista da crise ambiental na qual argumenta que a crítica ambiental às abordagens econômicas tradicionais é indispensável, mas que é preciso, ainda, romper com a concepção generalizada (aistórica, hipostasiada) de produção. Para isso faz-se necessário entender o modo de produção como “um todo

comporta as interações entre crescimento econômico e uma variedade de medidas de qualidade ambiental. O presente estudo, no entanto, está focalizado no efeito do crescimento econômico sob os gases causadores do efeito estufa por três razões. Em primeiro lugar este enfoque deve-se ao caráter preliminar desta pesquisa sobre a CKA. Além disso, parece razoável conferir prioridade aos gases causadores, pois o tema do aquecimento global, através de relatórios importantes como os do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC), se revela uma discussão cada vez menos prorrogável e, por fim, foi justamente esta variável que Grossman e Krueger consideraram como a omissão mais importante de sua pesquisa.

Os três relatórios do IPCC analisados (1995; 2007; 2013) são consensuais ao apresentar uma perspectiva de agravamento progressivo do efeito estufa. De acordo com o IPCC (1995, p. 16), desde a era pré-industrial, a concentração dos gases causadores do efeito estufa como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O cresceram cerca de 30%, 145%, e 15%, respectivamente. Além disso, a tendência de crescimento pode ser atribuída "em grande parte a atividades humanas, sobretudo ao uso de combustíveis fósseis, mudança no uso da terra e agricultura".

O quarto relatório do IPCC (2007, p. 13), além de reiterar o avanço da concentração desses gases, constata que a concentração anual, em lugar de diminuir, cresce nos últimos 10 anos (1995-2005). Enquanto a média de crescimento era de 1,4 ppm (partes por milhão) entre 1960 e 2005, entre 1995 e 2005 a taxa de crescimento média alcança 1,9 ppm. Aqui, mais uma vez, tem-se o uso de combustíveis fósseis e alteração no uso da terra importantes fatores para explicar a crescente concentração de dióxido de carbono.

Em sentido contrário ao que se tem observado nas pesquisas recentes do IPCC, o comportamento esperado da Curva de Kuznets Ambiental sugere a diminuição em efeito escala desses indicadores. Como forma de investigar, a partir das evidências mais recentes, se é possível sustentar a hipótese da CKA, este trabalho propõe uma estimação do efeito do crescimento econômico na evolução de emissão dos gases causadores do efeito estufa no Brasil entre os anos de 1994 e 2013.

Então, para cumprir o objetivo deste trabalho, que é discutir a hipótese da CKA à luz da evidência empírica para um conjunto de gases do efeito estufa no Brasil, o restante do trabalho está dividido em três seções. Na primeira, será feita uma revisão da bibliografia recente sobre a Curva de Kuznets Ambiental. Na segunda, apresentamos os métodos utilizados, fontes e especificações técnicas dos dados, e os resultados obtidos. Na terceira, são apresentadas algumas considerações sobre o estudo feito e, em particular, procura-se explicar a razão dos resultados obtidos. Ao final do artigo são apresentados em anexo os resultados detalhados dos testes.

## **1– O Referencial Teórico Recente**

Nesta seção faremos um breve retrospecto da relação histórica entre crescimento econômico e degradação ambiental e, além disso, uma revisão bibliográfica recente de autores que afirmam ou discordam que a relação entre ambas as variáveis assuma a forma quadrática (Curva de Kuznets Ambiental) ou cúbica.

Historicamente a relação entre crescimento econômico, que pode ser mensurado, por exemplo, por PIB per capita, é considerada uma relação linear positiva. No final do século XIX, com o afloramento do estudo e discussão da ecologia, área da biologia que estuda a interação entre os seres vivos e o meio ambiente, em especial na Inglaterra e Alemanha, países que passavam por um forte processo de industrialização e urbanização, a correlação entre as duas variáveis certamente eram consideradas positivas. Exemplos podem ilustrar isso, como o caso das borboletas pretas de Manchester, que além de

---

orgânico, como uma totalidade com dinâmica própria” que impõe suas tendências e determinações para a relação entre humanidade e natureza.

servir de evidência para a contemporânea publicação “A origem das espécies” de Charles Darwin, mostra como o impacto humano no meio ambiente, inerente ao processo de crescimento, pode gerar degradação ambiental, em 1948, menos de 2% da população de borboletas eram pretas, mas devido à geração de poluição nos céus da Inglaterra em 1898 mais de 95% das borboletas eram pretas, pois foram às únicas que se adaptaram à nova realidade, diversas espécies de borboletas acabaram por ser extintas no processo de crescimento econômico.

Nos anos 60, a discussão ambiental ganha força, com o movimento hippie que de certa forma é o precursor da ideia moderna de sustentabilidade, e que tinha como principal ideal a crítica ao processo de exploração e opressão da sociedade capitalista conservadora contra a natureza e o ser humano.

Em livro publicado em 1962, chamado Primavera Silenciosa, Rachel Carson, levanta a problemática do uso indiscriminado de pesticidas e da poluição do meio ambiente. Sendo considerado um marco, levou ao banimento do pesticida DDT em 1972 nos Estados Unidos. Desde então diversas organizações nacionais e internacionais tem defendido mudanças que visem compatibilizar a estrutura de produção com as demandas por proteção ambiental.

Economistas Ecológicos, como Georgescu-Roegen (1971) consideram que o aumento da poluição leva inevitavelmente a degradação ambiental, fundamentado na segunda lei da termodinâmica “A quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a incrementar-se com o tempo, até alcançar um valor máximo”. Esta perspectiva defende a interpretação de que a Terra é um sistema isolado e que não há como gerar produção sem gerar dano irreversível “[n]a grande espaçonave Terra”. Argumenta-se que a humanidade precisa buscar novas formas de desenvolvimento através da cultura, lazer e empatia e não do crescimento econômico tradicional.

No início da década de 1990, autores começaram a questionar esta relação linear, principalmente após o estudo de Grossman e Krueger (1991) sobre os impactos ambientais do acordo de livre comércio da America do Norte, segundo os autores a relação entre as duas variáveis irá depender de três efeitos, o efeito escala, o efeito composição e o efeito técnico ou tecnológico.

É de se esperar que a pressão sobre o meio ambiente aumente conforme haja um aumento de produção (efeito escala). Essa maior pressão, entretanto, pode ser anulada pelo resultado dos outros dois efeitos. Pode ser que o crescimento econômico se dê primordialmente em setores que poluem menos (efeito composição) ou que os avanços tecnológicos na produção compensem o nível de produto maior (efeito técnico). Portanto, não há motivos, *a priori*, para a qualidade ambiental piorar com o crescimento econômico (CARVALHO, ALMEIDA, 2010, p.591).

Desde então diversos trabalhos têm sido feitos com o intuito de verificar a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental, como Selden e Song (1994), que analisando 30 países, a maioria da OCDE, através de dados em painel, concluiu que em níveis altos de renda a poluição tenderia a zero. Já para Fonseca e Ribeiro (2005), em seu estudo do percentual de áreas preservadas nos estados brasileiros, a relação entre as duas variáveis depende essencialmente do tipo de proxy de degradação ambiental utilizada.

Em estudo recente Sousa, Sousa e Santos (2016) elaboraram um modelo no qual a emissão de CO<sub>2</sub> per capita é considerada variável dependente, e algumas variáveis de crescimento econômico como o PIB per capita são consideradas variáveis independentes. Este estudo levou em conta dados de 51 países entre 2005 e 2010, e concluiu que é possível interpretar a relação estudada como uma CKA em forma de N. Além disso, os autores ressaltam a importância da América Latina para a redução de emissão de CO<sub>2</sub> no mundo, especialmente devido a sua composição espacial que é abundante em florestas, e que o impacto ambiental cresce em função do desenvolvimento das economias, rejeitando, portanto, a CKA.

## 2– Dados, Método e Resultados

### 2.1 – Dados

Para este trabalho foi usada como a variável ambiental a ser explicada o carbono equivalente em potencial de aquecimento global conforme o quinto relatório do painel internacional de mudanças climáticas – CO<sub>2</sub>e GWP (AR5), com início da série histórica em 1994 e término em 2013. Também verificamos o mesmo resultado para todas as metodologias disponíveis (AR2 e AR4, GWP e GTP), como será apresentado na Tabela 2. O carbono equivalente mede o impacto de gases causadores do efeito estufa em termos de CO<sub>2</sub>, o que possibilita a aglutinação de vários elementos nocivos à camada de ozônio em uma única medida. Em particular, o índice avaliado corresponde aos efeitos do gás carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e os hidrofluorcarbonetos (HFCs). Todos esses gases são, em determinada medida, causadores do efeito estufa. Cada tonelada de metano, por exemplo, corresponde a 28 toneladas de carbono equivalente nesta metodologia (SEEG, 2017).

O potencial de aquecimento global (GWP, em inglês) é uma medida que considera o efeito dos gases no balanço energético do planeta. Uma outra medida é a de potencial de alteração na temperatura global (GTP), que considera a influência que a emissão desses gases pode causar na temperatura. Tanto o GWP quanto o GTP são medidos para um prazo de cem anos. O equivalente em GWP é a medida que tem sido mais utilizada na literatura. As proporções podem ser observadas na tabela abaixo:

**Tabela 1 – Equivalência de gases em GTP e GWP AR5**

Gás	GTP-100	GWP-100
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	4	28
N <sub>2</sub> O	234	265
HFC-23	12.700	12.400
HFC-32	94	677
HFC-125	967	3.170
HFC-134a	201	1.300
HFC-143a	2.500	4.800
HFC-152a	19	138
CF <sub>4</sub>	8.040	6.630
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	13.500	11.100
SF <sub>6</sub>	28.200	23.500

Fonte: SEEG Brasil.

Essa paridade é fundamentada no quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), lançado em 2013. O IPCC foi criado por trabalho conjunto da Organização Mundial de Meteorologia e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. O relatório tem por objetivo investigar as informações científicas disponíveis sobre o meio ambiente, estudar os impactos socioeconômicos das mudanças climáticas e formular estratégias de resposta a essas mudanças. A variável utilizada neste trabalho, o CO<sub>2</sub>e GWP (AR5), leva em conta os efeitos dos gases causadores do aquecimento global conforme o segundo relatório do IPCC.

Para o crescimento econômico a variável utilizada foi o produto interno bruto (PIB) per capita, obtido através dos dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Existe certa controvérsia sobre se o PIB constitui uma medida apropriada para a estimação da CKA. O segundo relatório do IPCC (1995) revela que há um consenso sobre o fato de o PIB, apesar de não constituir uma medida de bem-estar por si próprio, é uma boa proxy para o crescimento econômico, agregando produtos e serviços que certamente influenciam no bem-estar. Optamos então pelo PIB por ser uma variável disponível e adequada para representar o crescimento econômico.

## 2.2 – Método

Para estudar a relação entre a emissão per capita de gases causadores do efeito estufa e do PIB per capita, i. é, entre poluição ambiental e crescimento econômico, foi utilizado a metodologia dos mínimos quadrados ordinários (MQO). Esta metodologia é a mesma utilizada por Serrano et al. (2015), Almeida e Carvalho (2009). Sousa et al. (2016) e Teixeira et al (2012), por outro lado, utilizam os modelos de mínimos quadrados generalizados e de defasagem e erro espacial, respectivamente. Dada a referência encontrada e os objetivos compatíveis (mas não idênticos), adotamos a metodologia utilizada no primeiro grupo de autores.

Como afirmam Grossman e Kruger, a utilização de equações em formato reduzido não permite identificar a razão específica do da CKA. Apesar de não poder esclarecer a relação entre renda e poluição, identificar a presença (ou inexistência) da relação proposta é “um importante passo inicial” (1995, p. 360). Além disso, uma equação reduzida como aqui apresentada tem duas vantagens sobre a abordagem de equações estruturais. Em primeiro lugar, nos é permitido identificar o efeito em rede, global, da produção (brasileira) sobre a poluição (entendida como emissão de gases do efeito estufa). De acordo com Grossman e Krueger, a abordagem na forma reduzida, ao contrário da abordagem de estrutura, não tem como condição necessária um trabalho de recomposição dos efeitos separados sobre a poluição. Em segundo lugar a forma simplificada tem a vantagem de não depender diretamente de dados sobre incorporação tecnológica e sobre o efeito de políticas de preservação, escassos e, em alguns casos, pouco confiáveis (1995, p. 359).

O objetivo do artigo, como já anunciado, é confirmar ou rejeitar a hipótese levantada por Grossman e Krueger (1991; 1995), de que no longo prazo seria prevista uma relação negativa entre o crescimento econômico e o impacto ambiental. Os autores, no entanto, para avaliar os componentes referentes à poluição do ar, não dispunham de representantes dos gases causadores do efeito estufa. Grossman e Krueger (1995, p. 5) afirmam, logo após anunciar a ausência de algumas importantes formas de poluição do ar em seu trabalho, que “talvez mais importante seja a omissão de poluentes do ar que afetam a atmosfera global e o efeito estufa”. Sendo, por isso mesmo, feita a escolha por verificar a hipótese de Grossman e Krueger (1995), mas com relação aos gases do efeito estufa.

A equação utilizada foi a seguinte:

$$CO_2eC = \alpha + \beta_1 PIBC + \beta_2 PIBC^2 + \beta_3 PIBC^3 + u$$

O argumento defendido por Grossman e Krueger é o de que ao longo do tempo, com o crescimento econômico, a poluição se intensifica, mas ao atingir um determinado nível de renda per capita a poluição ambiental se reduz apresentando o formato de um “U” invertido. Para que a evidência empírica aponte para a ocorrência do U invertido, é preciso que o coeficiente  $\beta_1$  seja estatisticamente significativo e positivo e que  $\beta_2$  seja significativo e tenha sinal negativo. Estes resultados são necessários para indicar que o crescimento produz um efeito danoso ao meio ambiente, mas que o efeito escala da produção sobre a poluição ambiental tende a ser mitigado e superado pelos efeitos técnica e composição. Para confirmar a hipótese é preciso ainda que  $\beta_3$  seja estatisticamente não significativo, pois caso seja significativo, aponta não para o formato de U invertido, mas para o formato de N. Neste caso o resultado obtido figuraria uma contra evidência dos resultados de Grossman e Krueger.

## 2.3 - Resultados

Devido à existência de diferentes metodologias para o cálculo dos gases de efeitos estufa, realizamos o teste da CKA em todas as possíveis metodologias propostas pela SEEG. No entanto, não houveram discrepâncias significativas. Então, para fins de explicação da metodologia estatística optamos por utilizar o GWP AR (5), mas o leitor tem acesso aos testes estatísticos de todas as metodologias no Anexo 1.

**Tabela 1- Comparação das metodologias**

GWP 5				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,65225e+011	1,89924e+011	-2,450	0,0262
PIB	6,41699e+010	2,68398e+010	2,391	0,0295
PIB <sup>2</sup>	-2,91146e+09	1,25807e+09	-2,314	0,0343
PIB <sup>3</sup>	4,37005e+07	1,95603e+07	2,234	0,0401
GWP 4				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,63173e+011	1,89367e+011	-2,446	0,0264
PIB	6,38868e+010	2,67611e+010	2,387	0,0297
PIB <sup>2</sup>	-2,89870e+09	1,25438e+09	-2,311	0,0345
PIB <sup>3</sup>	4,35099e+07	1,95029e+07	2,231	0,0403
GWP 2				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,59371e+011	1,88243e+011	-2,440	0,0267
PIB	6,33608e+010	2,66022e+010	2,382	0,0300
PIB <sup>2</sup>	-2,87493e+09	1,24693e+09	-2,306	0,0349
PIB <sup>3</sup>	4,31529e+07	1,93871e+07	2,226	0,0407
GTP 5				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,37368e+011	1,81972e+011	-2,403	0,0287
PIB	6,03142e+010	2,57161e+010	2,345	0,0322
PIB <sup>2</sup>	-2,73695e+09	1,20539e+09	-2,271	0,0373
PIB <sup>3</sup>	4,10764e+07	1,87413e+07	2,192	0,0435
GTP 4				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,39649e+011	1,82730e+011	-2,406	0,0286
PIB	6,06305e+010	2,58231e+010	2,348	0,0321
PIB <sup>2</sup>	-2,75128e+09	1,21041e+09	-2,273	0,0372
PIB <sup>3</sup>	4,12921e+07	1,88193e+07	2,194	0,0433
GTP 2				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
const	-4,39649e+011	1,82730e+011	-2,406	0,0286
PIB	6,06305e+010	2,58231e+010	2,348	0,0321
PIB <sup>2</sup>	-2,75128e+09	1,21041e+09	-2,273	0,0372
PIB <sup>3</sup>	4,12921e+07	1,88193e+07	2,194	0,0433

Fonte: Cálculo dos autores, através do software GRETL, tendo como fonte SEEG e IPEA.

Para assegurar a não estacionaridade conjunta das variáveis da série temporal utilizada, os resíduos do modelo foram submetidos ao teste de raiz unitária de Dickley-Fuller aumentado com uma defasagem. Os resultados atestam a não estacionaridade dos dados utilizados, com estatística de teste  $\tau_c(1) = -3,73406$  e p-valor assintótico 0,003679

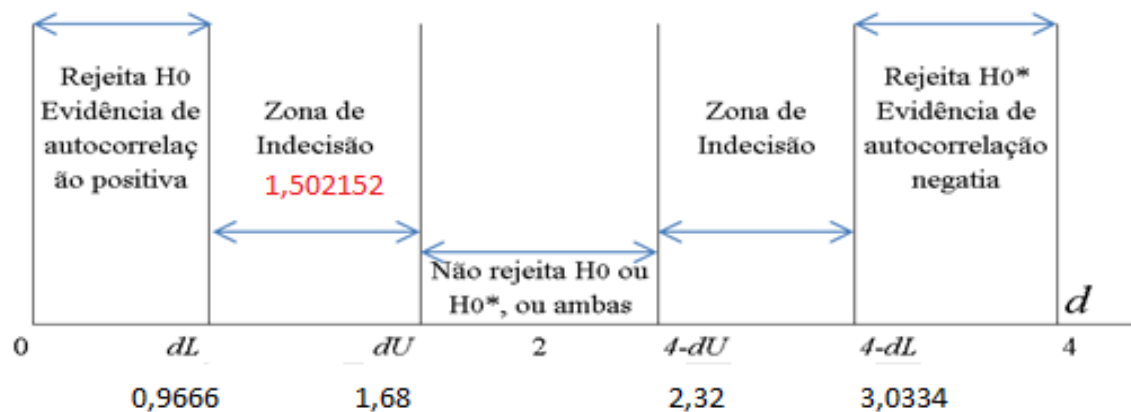
As estimativas principais para o modelo estão apresentadas na primeira parte da Tabela 1. A significância dos coeficientes, diferente do previsto pela hipótese de Grossman e Krueger, indica de fato uma relação cúbica (e não quadrática) para o efeito escala do PIB per capita sobre o CO<sub>2</sub>e. O coeficiente estimado para o PIB per capita ao cubo apresenta um valor muito significativo (4,37) e, principalmente, não pode ser rejeitado à um nível de significância de 5%, como mostra o p-valor (0,0401).

O modelo também apresentou um R<sup>2</sup> de 0,508664 e um R<sup>2</sup> ajustado de 0,416539, sinalizando que aproximadamente 51% da variação de CO<sub>2</sub>e é explicada pelas variáveis independentes usadas. O teste Breusch-Pagan para heteroscedasticidade retornou a estatística de teste LM= 4,46757 com p-valor de 0,215201, e o teste de White apresentou a estatística de teste de 8,84128 com o p-valor de 0,182703. Ambos os testes indicam a homocedasticidade dos erros do modelo.

Para garantir a ausência de autocorrelação nas estimativas e, portanto, que o modelo seja eficiente, foi observada a estatística de Durbin-Whatson que já é computada ao estimar o modelo. O valor do teste de Durbin-Whatson (1,502152) indica a ausência de correlação positiva ou negativa, como pode ser visto na Imagem 2, com valores tabelados à nível de 1% de significância, onde  $H_0$ : Não há autocorrelação positiva e  $H_0^*$ : Não há autocorrelação negativa. A estatística DW se posicionou na zona de indecisão. O teste de normalidade para os resíduos, por fim, informa a estatística qui-quadrado de 2,68853 e o p-valor de 0,260732, o que assegura que os erros têm distribuição normal.

Com isso, não é confirmada a forma de 'U' invertido para esta estimativa, mas o formato de 'N', com a significância de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , e os sinais esperados para o formato em 'N'. Em posse deste resultado, a tendência em formato cúbico do comportamento do PIB e da emissão de CO<sub>2</sub>e pode ser ilustrada como no Gráfico 1.

**Imagem 1 – Estatística d de Durbin-Watson com os valores tabelados.**



Fonte: Gujarati (2003, p. 469; 972), reprodução de imagem e valores tabelados.

### 3- Análise Qualitativa dos Resultados Encontrados

Para a compreensão dos resultados estatísticos encontrados, se faz necessário comentar sobre a metodologia de estimação dos gases do efeito estufa (GEE) e a representatividade de cada setor para essa emissão. Em nosso artigo, utilizamos as estimativas de emissão de carbono equivalente do SEEG (Sistema de Estimativas de Gases do Efeito Estufa) que utiliza o arcabouço do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) para estabelecer as taxas de equivalência.

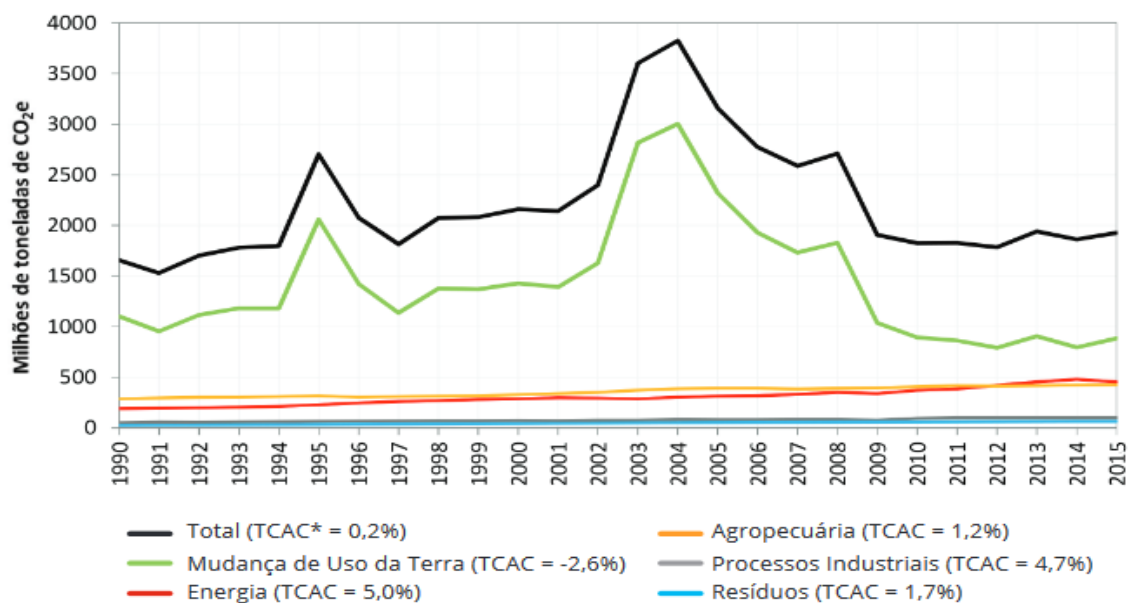
São considerados cinco setores de emissão de GEE, sendo: Agropecuária, Energia, Mudanças de uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. Observe (no Gráfico 1) que o setor Mudanças de uso da Terra foi predominante para a determinação da relação em N (cíclica) dos GEE com a renda per capita. No gráfico percebemos que os setores de Energia, Agropecuária, Processos Industriais e Resíduos



mantiveram uma tendência crescente ao longo do tempo, apenas o setor de Mudança de Uso da Terra obteve um caráter cíclico, neste setor são considerados três tipos de GEE, sendo: CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano) e N<sub>2</sub>O (óxido nitroso).

Segundo o relatório da SEEG 2017, “essas emissões estão fortemente associadas a processos de desmatamento da cobertura florestal original nesses biomas [Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica]”, isso ocorre, pois com a derrubada da floresta, o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) contido nas árvores é liberado, aumentando sua concentração na atmosfera, o que contribui para o efeito estufa. (Miller, 2015)

**Gráfico 1 - Emissões de CO<sub>2</sub> equivalente distribuído pelos setores da SEEG e total**

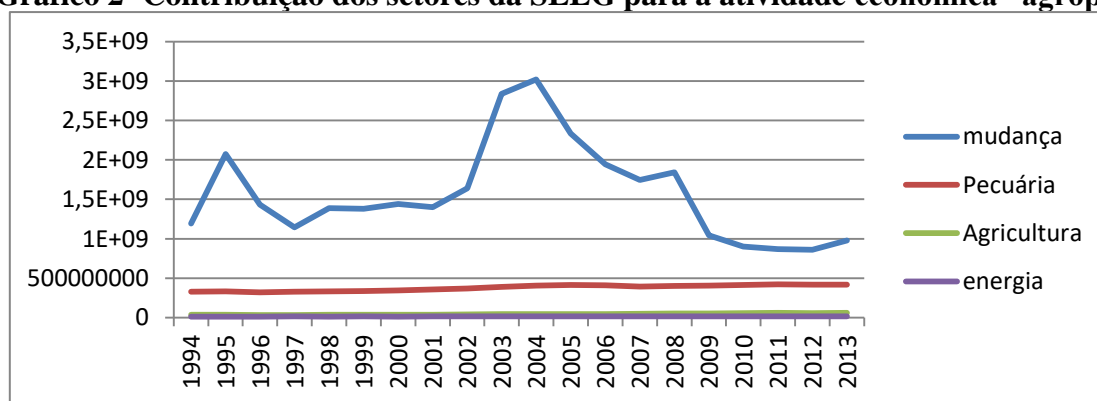


Fonte: SEEG 2017

Os ciclos de elevação do nível de desmatamento do Brasil, em 1995 e de 2003-2004 estão relacionados à expansão da fronteira agropecuária. No Gráfico 2, podemos observar a contribuição dos GEE seguindo a divisão de setores da SEEG, para atividade econômica “agropecuária”. O gráfico mostra o quanto a Mudança de Uso da Terra foi devido à agropecuária, o quanto atividades diretamente relacionadas à pecuária, como por exemplo, a fermentação entérica contribuiu nas emissões de GEE no setor econômico, e assim por diante.

No período de 2003/2004 houve na região da Amazônia um aumento atípico, mas não inédito, do desmatamento, tal elevação que pode ser vista no Gráfico 3 rendeu a Blairo Maggi, conhecido empresário rural e atual ministro da agricultura, o prêmio motosserra de ouro, oferecido pela ONG ambientalista *greenpeace*, por sua contribuição para o extermínio do futuro da Amazônia. Podemos também perceber o crescimento do desmatamento na Mata Atlântica, que antes desde período era pouco representativo.

**Gráfico 2- Contribuição dos setores da SEEG para a atividade econômica “agropecuária”**

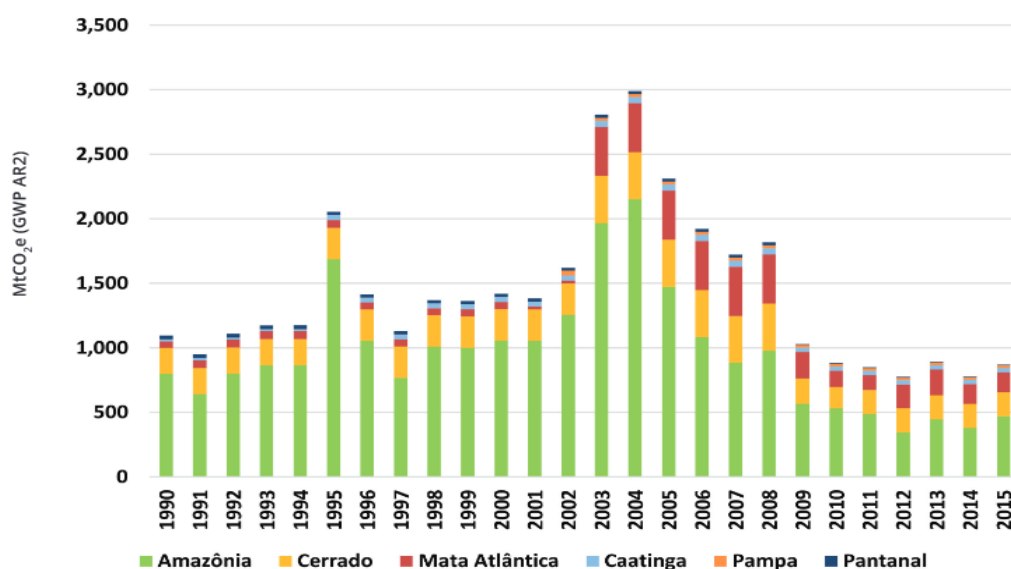


Fonte: Elaborado pelos autores com dados da SEEG 5.0

Tal elevação inflou a demanda de ONGs, entidades do poder público e iniciativas da sociedade civil por maior combate ao desmatamento, em especial na Amazônia, o que pode ser observado pelos resultados de emissão de carbono. No caso da Mata Atlântica o aumento do desmatamento continuou até 2008 e mesmo em dados mais recentes não voltou ao nível pré- 2003. O relatório da SEEG 2017 cita algumas ações que ajudaram a reduzir a o desmatamento entre 2005 e 2012 de 19 mil para 4,5 mil quilômetros quadrados.

As ações incluíram: a criação de áreas protegidas, o foco da fiscalização em municípios críticos, a restrição do crédito rural para produtores irregulares, a moratória da soja e o acordo dos frigoríficos contra a carne de origem ilegal (SEEG, 2017, p.21).

**Gráfico 3 - Emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por bioma**



Fonte: SEEG 2017

Finalizando esta seção, comentaremos mais especificamente a questão da moratória da soja. A moratória da soja veta a compra de soja de propriedades devastadas recentemente e passou a valer após 2006, devido aos escândalos já relatados do crescimento do desmatamento da Amazônia.

Dois anos antes de ser estabelecido, 30% da área plantada de soja eram em áreas recentemente devastadas, sete anos depois esse número foi para 1%. Como a moratória só acontece no bioma da Amazônia, outros biomas como o cerrado mantiveram sua expansão do desmatamento para o plantio da soja.

## Considerações finais

O intuito deste trabalho foi estimar uma Curva de Kuznets Ambiental para os gases causadores do efeito estufa no Brasil entre 1994 e 2013. Para isto, foi utilizado o método dos Mínimos Quadrados Ordinários, que encontra respaldo na literatura recente e, além disso, permite verificar a existência da CKA – apesar de não ser capaz de explicar os motivos que induzem tal relação. Os argumentos de Grossman e Krueger (1995) sobre as vantagens dessa abordagem para o princípio de uma pesquisa sobre a CKA nos parecem suficientes para justificar o método utilizado. Um próximo estágio da pesquisa exigirá, contudo, uma análise estrutural para investigar as determinações da relação aqui evidenciada.

Na estimação da CKA utilizamos como variável dependente o Carbono Equivalente em relação ao potencial de aquecimento global, relativo ao quinto e mais recente relatório do IPCC. Esta é uma medida que permitiu analisar a emissão de um conjunto de gases causadores do efeito estufa valores equivalentes a toneladas de carbono. Como variável independente, foi utilizado o Produto Interno Bruto em sua forma normal per capita, ao quadrado, e ao cubo. Isso nos permitiu verificar o formato da relação entre o carbono e o produto da economia brasileira para o período de 1994-2013. Foi encontrada uma relação de formato de ‘N’, rejeitando o formato proposto pela hipótese (‘U’ invertido).

No argumento de Grossman e Krueger (1995), os primeiros efeitos da intensificação da atividade econômica (no caso específico, advindas de um acordo de livre comércio) em geral seriam, de fato, impactos negativos no meio ambiente, ou uma relação positiva entre PIB e poluição. No entanto, após determinado nível de crescimento, a economia teria sido capaz de reverter a composição industrial e incorporar tecnologias não agressivas ao meio ambiente, mais que superando o efeito escala. Em outras palavras, o coeficiente do quadrado do PIB deveria assumir um valor significativo e negativo (tornando a função uma parábola) e o cubo do PIB deveria ser estatisticamente não significativo. Encontrou-se, porém, um coeficiente significativo para o Produto Interno Bruto per capita ao cubo. A relação entre crescimento econômico e emissão de gases causadores do efeito estufa apresenta uma tendência cíclica para todas as metodologias disponíveis dos relatórios do Painel Internacional de Mudanças Climáticas.

A principal conclusão do trabalho foi de que a tendência cíclica do modelo CKA aplicado aos gases do efeito estufa deriva dos ciclos de desmatamento no Brasil, que acontecem em períodos de expansão da área agrícola, como entre 2003 e 2004. Isso ocorre devido a predominância dos gases originários do desmatamento no grupo de gases de efeito estufa no Brasil.

## 6 – Referências Bibliográficas

- BARRETO, E. S. **Crise ambiental e a Ciência Econômica: uma crítica à teodiceia do capitalismo “verde”**. Disponível em: <<http://www.uff.br/iacr/ArtigosPDF/52T.pdf>> Acessado pela última vez em 24/09/2017.
- CARVALHO, T. S. e ALMEIDA, E. S. A hipótese da curva de Kuznets ambiental global: uma perspectiva econométrico-espacial. **Estudos Econômicos**, vol. 40, n.3, 2010.
- FONSECA, L. N.; RIBEIRO, E. P. **Preservação ambiental e crescimento econômico no Brasil**. In: VII Encontro de Economia da Região Sul. Rio Grande do Sul, 2005.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. **Entropy and the economic process**. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1971.
- GROSSMAN, G.; KRUEGER, A. **Environmental impacts of a North American free trade agreement**. NBER, Cambridge, MA, 1991. (National bureau of Economic Research Working Paper 3914).

GUJARATI, D. N. **Basic Econometrics**. Fourth Edition: McGraw Hill Gujarati, DN, (2003).

HOUGHTON, John T. (Ed.). **Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 1996.

IPCC (2013) Summary for policymakers. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) **Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, pp 3–29

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. Economia ou economia política da sustentabilidade. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Editora Campus, p. 1-29, 2003

SEEG. **Metodologia**. Disponível em: < <http://seeg.eco.br/metodologia/>>. Acesso pela última vez em: 24/09/2017.

SELDEN, T. M.; SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets Curve for air pollution emissions? **Journal of Environmental Economics and Management**, New York, v. 27, n. 2, p. 147-162, 1994.

SERRANO, André Luiz Marques; LOUREIRO, Paulo RA; NOGUEIRA, Jorge Madeira. Evidência da curva de kuznets ambiental no brasil: uma análise do crescimento econômico e poluição. **Revista Economia e Desenvolvimento**, v. 13, n. 2, 2015.

SOLOMON, Susan (Ed.). **Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC**. Cambridge University Press, 2007.

SOUSA, Luciana Cristina Romeu; SOUSA, David Silva Pereira; SANTOS, Ricardo Bruno Nascimento. Curva Ambiental de Kuznets: Uma Análise Macroeconômica entre Crescimento Econômico e Impacto Ambiental de 2005 A 2010. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 227-246, 2016.

TEIXEIRA, R. F. A. P.; BERTELLA, M. A.; ALMEIDA, L. T. de. Curva de Kuznets ambiental para o Estado de Mato Grosso. **Análise Econômica**, p. 313-337, 2012.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

## Anexo 1- Testes Estatísticos

GWP 5	
White	Estatística de teste: LM = 8,84128 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 8,84128) = 0,182703
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,46757 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,46757) = 0,215201
Durbin- Watson	1,502152
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,68853 com p-valor = 0,260732
ADF nos resíduos	Estatística de teste: tau_c(1) = -3,73406 p-valor assintótico 0,003679
R <sup>2</sup>	0,508664
Estatística F	F(3, 16) 5,521429 P-valor(F) 0,008502
GWP 4	

White	Estatística de teste: LM = 8,8541 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 8,8541) = 0,181951
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,45597 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,45597) = 0,216251
Durbin- Watson	1,503435
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,66081 com p-valor = 0,264371
ADF nos resíduos	estatística de teste: tau_ct(1) = -3,88688 p-valor assintótico 0,01256
R <sup>2</sup>	0,508574
Estatística F	F(3, 16) 5,519432 P-valor(F) 0,008514

#### GWP 2

White	Estatística de teste: LM = 8,87684 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 8,87684) = 0,180624
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,43331 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,43331) = 0,218316
Durbin- Watson	1,506409
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,61565 com p-valor = 0,270407
ADF nos resíduos	estatística de teste: tau_ct(1) = -3,89754 p-valor assintótico 0,01214
R <sup>2</sup>	0,509326
Estatística F	F(3, 16) 5,536065 P-valor(F) 0,008416

#### GTP 5

White	Estatística de teste: LM = 9,02372 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 9,02372) = 0,172248
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,29981 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,29981) = 0,230857
Durbin- Watson	1,523785
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,35406 com p-valor = 0,308193
ADF nos resíduos	estatística de teste: tau_ct(1) = -3,9568 p-valor assintótico 0,01003
R <sup>2</sup>	0,515395
Estatística F	F(3, 16) 5,672194 P-valor(F) 0,007655

#### GTP 4

White	Estatística de teste: LM = 9,01532 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 9,01532) = 0,172719
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,3065 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,3065) = 0,230213
Durbin- Watson	1,521912
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,37029 com p-valor = 0,305701
ADF nos resíduos	estatística de teste: tau_ct(1) = -3,95222 p-valor assintótico 0,01018
R <sup>2</sup>	0,514405
Estatística F	F(3, 16) 5,649760 P-valor(F) 0,007775

#### GTP 2

White	Estatística de teste: LM = 9,01532 com p-valor = P(Qui-quadrado(6) > 9,01532) = 0,172719
Breusch-Pagan	Estatística de teste: LM = 4,3065 com p-valor = P(Qui-quadrado(3) > 4,3065) = 0,230213
Durbin- Watson	1,521912
Teste de normalidade	Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 2,37029 com p-valor = 0,305701
ADF nos resíduos	estatística de teste: tau_ct(1) = -3,95222 p-valor assintótico 0,01018
R <sup>2</sup>	0,514405
Estatística F	F(3, 16) 5,649760 P-valor(F) 0,007775

Fonte: Cálculo dos autores, através do software GRETL, tendo como fonte SEEG e IPEA.