

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

**A RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO ECONÔMICO E AS EMISSÕES DE CO₂:
UMA ANÁLISE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL PARA PAÍSES
DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO**

**THE RELATIONSHIP BETWEEN ECONOMIC GROWTH AND CO₂ EMISSIONS:
AN ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE FOR DEVELOPED
AND DEVELOPING COUNTRIES**

Camila Albornoz Brufao

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar a relação entre o crescimento da renda *per capita* e as emissões de CO₂ *per capita* em países em desenvolvimento – Brasil e China – e países desenvolvidos – Estados Unidos e Alemanha – entre 1971 e 2009, tendo como base a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) em suas duas versões, a CKA em formato de U-invertido e a CKA em formato de N. A primeira sugere que, à medida que o crescimento da renda ocorre, os danos ambientais tendem a diminuir, apresentando, assim, um formato de U-invertido. A segunda sugere que, embora o crescimento da renda *per capita* cause, em certo momento a uma diminuição de danos, após alcançar um nível de renda muito elevado, esse aumento faz com que os danos ambientais voltem a crescer, que a curva apresente um novo ponto de inflexão e retome uma trajetória ascendente. Os resultados obtidos diferem entre os países. Entre os países em desenvolvimento, enquanto o Brasil apresentou uma relação linear monotônica crescente, a China apresentou uma relação em formato de N. Já entre os países desenvolvidos, enquanto os Estados Unidos apresentaram uma relação em formato de N, a Alemanha apresentou uma relação em formato de U-invertido.

Palavras-chave: crescimento da renda, emissões de CO₂, Curva de Kuznets Ambiental.

ABSTRACT

This study aims to analyze the relationship between the growth of income per capita and CO₂ emissions per capita in developed countries - the United States and Germany - and developing countries - Brazil and China - between 1971 and 2009 based on the hypothesis of the Environmental Kuznets Curve (EKC) in its two versions , the CKA U-inverted shaped and the EKC shaped N. The first version suggests that as the income growth occurs in many countries, environmental damage tends to decrease, showing thus an inverted-U shape. The second version, on the other hand, suggests that while the growth of per capita income take, at first to a reduction of environmental damage, after reaching a very high level, this increase in income causes environmental damage will grow back, the curve presents a new point inflection and resume an upward trajectory. The results obtained differ between countries. Among developing countries, while Brazil presented a linear monotonic relationship, China presented a N-shaped relationship. Among the developed countries, while the United States presented a N-shaped relation, Germany presented a relation in the format of U-inverted.

Keywords : income growth, CO₂ emissions, Environmental Kuznets Curve.

1 INTRODUÇÃO

O debate que envolve o sistema econômico e as emissões dos gases de efeito estufa (GEE) tem adquirido grande relevância nas discussões sobre o crescimento econômico nos últimos anos. As mudanças climáticas que tem sido verificadas vêm demonstrando, cada vez mais, a importância da atividade humana nesse processo. Nesta linha, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) apontou que são as emissões de gases do efeito estufa (GEE), geradas pela queima de combustíveis fósseis em processos produtivos e de consumo, as principais causadoras da recente aceleração das alterações climáticas.

Entre as discussões, o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso são os contribuintes gasosos da atmosfera que mais têm sido debatidos (BNDES, 1999). No entanto, atenção prioritária tem sido dedicada ao dióxido de carbono, uma vez que o volume de suas emissões para a atmosfera representa algo em torno de 55% do total das emissões de gases de efeito estufa e o tempo de sua permanência na atmosfera é de pelo menos dez décadas.

As emissões antrópicas de CO₂, o gás que mais contribui à intensificação do efeito estufa, decorrem principalmente da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), em usinas termoeletricas e indústrias, veículos em circulação e sistemas domésticos de aquecimento.

Essa discussão é frequentemente encontrada na literatura, sendo a hipótese que relaciona as emissões de CO₂ e o crescimento de renda *per capita* denominada Curva de Kuznets Ambiental (CKA), a qual trata da existência de uma relação em formato de “U” invertido entre renda *per capita* e a poluição e, sugere que o *trade-off* entre essas variáveis é mais uma questão do estágio econômico no qual determinada economia se encontra do que uma impossibilidade absoluta de “crescimento limpo”. Isso quer dizer que, enquanto economias menos desenvolvidas se encontram no trecho ascendente da curva, crescendo às custas de maiores danos ambientais, as economias desenvolvidas crescem com base em um novo formato de desenvolvimento, com tecnologias mais limpas, que levam a economia ao trecho descendente da curva. Assim, a contribuição dos países às emissões de gases com efeito de estufa que se acumulam na atmosfera é variável.

Decorrente deste preâmbulo, o objetivo do presente trabalho centra-se em testar empiricamente a hipótese da CKA para Brasil, China, Estados Unidos e Alemanha, no período de 1971 a 2009, relacionando as emissões de CO₂ e o PIB *per capita* dos países selecionados. Para tanto, são testadas a abordagem tradicional da CKA, a qual se apresenta com formato de U-invertido e uma abordagem alternativa, que apresenta a relação entre crescimento econômico e danos ambientais com formato de N, que sugere que após certo nível de renda, haveria um novo ponto de inflexão que tornaria a trajetória da curva ascendente novamente, sugerindo que a degradação ambiental voltaria a aumentar em altos níveis de crescimento.

Para alcançar o objetivo proposto, o texto está disposto da seguinte maneira: na seção dois apresenta-se o referencial teórico referente à CKA em suas diversas abordagens, na terceira seção analisa-se a trajetória de crescimento dos países estudados bem como sua relação com as emissões de CO₂ e as fontes de energia predominantemente utilizadas no processo de crescimento. Na quarta, expõe-se a metodologia e suas decorrências; na quinta são discutidos os resultados e por último, as conclusões.

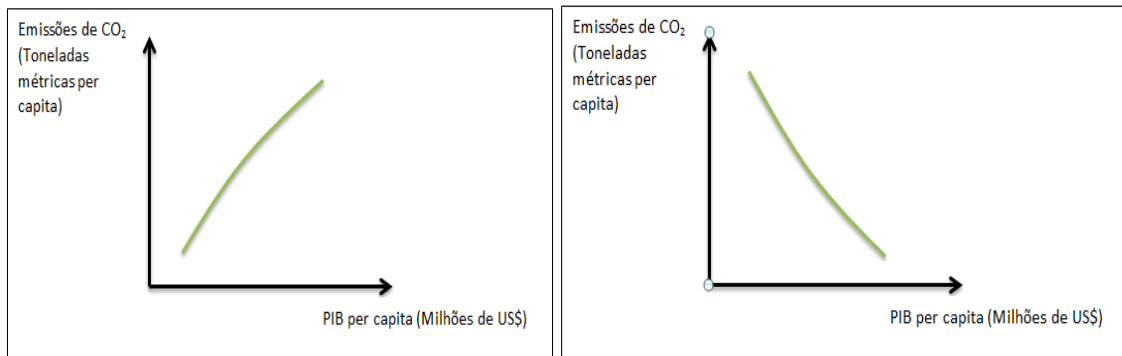
2 A HIPÓTESE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL: RELAÇÃO ENTRE O CRESCIMENTO ECONÔMICO E AS EMISSÕES DE CO₂

O debate envolvendo o sistema econômico e as emissões de GEE vem adquirindo relevância nas discussões sobre o crescimento econômico. De acordo com Tuan (1999), a

questão central a ser respondida é se o crescimento econômico deve continuar como prioridade e a proteção ambiental uma questão secundária que deve ser resolvida mais tarde, ou se as políticas ambientais para controlar a degradação ambiental tanto em âmbito local, nacional quanto global devem representar uma prioridade.

De acordo com De Bruyn *et al.* (1998), a relação entre a renda *per capita* e a pressão ambiental pode ser apresentada de várias maneiras. Em um primeiro nível, pode-se distinguir entre as curvas monotônicas e não-monotônicas. As monotônicas podem mostrar tanto o aumento quanto a diminuição da poluição, com o aumento da renda (ver Figura 1).

Figura 1 - Relações linear monotônica crescente e decrescente



Fonte: Elaborado pela autora.

Por outro lado, entre as não-monotônicas, as que têm sido sugeridas com maior frequência são a curva com formato de U-invertido e a curva a curva em forma de N, sendo ambas versões da conhecida Curva de Kuznets Ambiental (CKA). O conceito de CKA surgiu no começo da década de 1990, inspirado no trabalho original de Kuznets sobre a relação do crescimento econômico e a distribuição de renda.

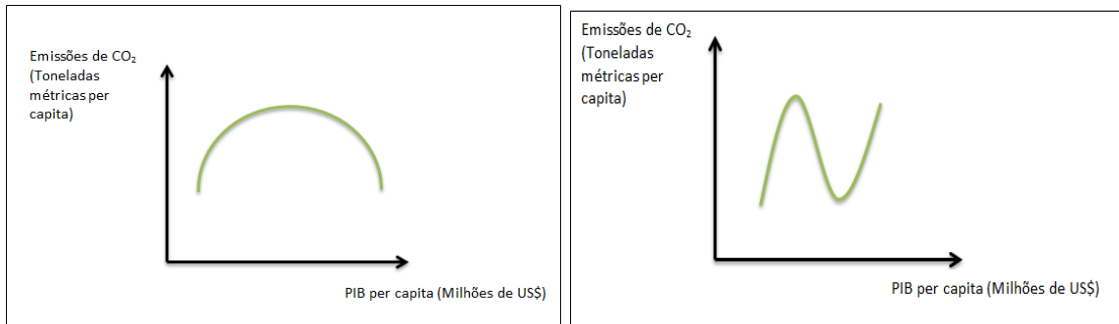
A chamada Curva de Kuznets Ambiental, em sua versão com formato de U-invertido, determina que os aumentos de eficiência energética levariam, no longo prazo, a uma diminuição na utilização de energias poluidoras e como consequência traria uma diminuição das emissões de gases poluidores, levando os países a processos de crescimento econômico mais limpos e sustentáveis. Por sua vez, a CKA em formato de N sugere que, após um nível muito elevado de renda, haveria um novo ponto de inflexão que faria com que a curva tornasse a mostrar uma trajetória ascendente.

De acordo com Tuan (1999), na fase inicial de crescimento econômico, o aumento das emissões de poluentes é considerado como um aspecto inevitável e aceitável. Entretanto, a partir de certo nível de renda, passa a se dar maior importância ao meio ambiente, tornando possível a criação de novas instituições e regulamentos para a proteção ambiental.

2.1 A análise da Curva de Kuznets Ambiental

A Curva de Kuznets Ambiental (CKA) apresenta uma trajetória bem definida, com um trecho ascendente e outro descendente, como pode ser verificado por meio da Figura 2. Nas fases iniciais de crescimento do econômico, a poluição aumenta, não só porque a expansão da produção gera mais emissões de poluentes, mas também porque o crescimento econômico é posto à frente do controle da degradação ambiental. À medida que o país alcance suficiente grau de afluência, sua prioridade muda para preservação da qualidade ambiental, o que o conduz ao trecho descendente da curva (CARVALHO e ALMEIDA, 2010).

Figura 2 - Exemplo de uma Curva de Kuznets Ambiental em formato de U-invertido e em formato de N



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com essa ideia, países em desenvolvimento, de menor renda, preferem o crescimento econômico ao controle dos danos ambientais, encontrando-se no trecho ascendente da curva, dado que utilizam no seu processo de produção tecnologias mais baratas e poluidoras. Por outro lado, os países desenvolvidos, cuja renda é maior, têm acesso a tecnologias menos poluidoras e encontram-se no trecho decrescente da curva, visto que já alcançaram um grau de afluência tal que seu principal objetivo não consiste mais em atingir crescimento econômico a qualquer custo.

Grossman e Krueger (1991) relacionam as mudanças nas inclinações da CKA aos efeitos-renda (ou efeito-escala), composição e tecnologia. O efeito-renda ocorre devido à pressão negativa do aumento da renda sobre o meio ambiente, ou seja, à medida que a renda aumenta, a degradação do ambiente também se eleva. 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 a exemplo do setor de serviços. O efeito-tecnologia também é responsável por diminuir o impacto ambiental e acontece quando o progresso tecnológico propicia um processo produtivo mais eficiente no uso dos recursos, reduzindo o dano ambiental. Logo, a curva passa a apresentar uma inclinação negativa no momento em que os efeitos composição e tecnologia se sobrepõem ao efeito-renda. Por sua vez, o ponto em que os efeitos se anulariam seria o ponto de inflexão da curva.

Uma das críticas feitas à abordagem da Curva de Kuznets Ambiental diz respeito justamente ao trecho descendente da curva. De acordo com Grossman e Krueger (1995), neste trecho, os países deixariam de produzir bens intensivos em poluição passando a importá-los, ou transmigrariam suas plantas produtivas intensivas em poluição para países em desenvolvimento, nos quais as regulamentações ambientais fossem menos rígidas. Esse é um artifício que não poderá ser replicado pelos países em desenvolvimento, porque, quando eles chegarem a ser desenvolvidos, não haverá outros países dispostos a acolher suas plantas intensivas em poluição. Assim sendo, a degradação ambiental não estaria diminuindo, mas sendo exportada, o que não poderá acontecer indefinidamente.

Outra crítica feita 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 (SANTOS, 2009). Esse problema envolve também, de acordo com ARROW *et al.* (1995), a questão do efeito limiar, uma vez que um ponto de reversão muito alto pode atingir um nível ambientalmente irreversível.

Ainda de acordo com Arrow *et al.* (1995), a relação de U invertido não é válida para o dióxido de carbono (CO₂), dado que este é um poluente persistente no longo prazo e seus custos são mais dispersos. Ansuategui e Escapa apud Santos (2009) atribuíram esse comportamento do CO₂ ao fato de que esse poluente gera uma desutilidade global e não local

As propriedades químicas e físicas do CO₂, incluindo a sua não toxicidade, as suas concentrações atmosféricas e seus impactos espaciais e temporais tornam improvável que os agentes exijam medidas de controle como resultado dos problemas locais. Assim, os países têm poucos incentivos para executar um esquema unilateral de controle de poluição.

Além disso, autores como De Bruyn *et al.* (1998) argumentam que a CKA não se sustenta no longo prazo. O formato de “U” invertido seria apenas um estágio inicial da relação entre crescimento econômico e pressão ambiental. Após certo nível de renda, haveria um novo ponto de inflexão que tornaria a trajetória ascendente novamente, e o formato da CKA seria similar ao de um “N”, sugerindo que a degradação ambiental voltaria a aumentar em altos níveis de crescimento, o que se justificaria pelo fato de que maiores níveis de renda *per capita* elevariam o consumo em termos absolutos, ainda que eles se reduzissem em termos *per capita* (ver Figura 2).

Do ponto de vista empírico, a literatura da CKA ofereceu evidências consideráveis sobre a relação entre o crescimento econômico e poluição ambiental sinalizando que a hipótese da CKA é amplamente satisfeita para os poluentes locais como óxidos de azoto, dióxido de enxofre e de metais pesados. Entretanto, os resultados empíricos para o CO₂ estão longe de ser conclusivos (ver Carson, 2010).

Este fato se torna relevante dado o papel crucial que o CO₂ tem como um dos principais gases determinantes do efeito estufa. Há diversas razões para este resultado controverso. De acordo com William e Gregory (1997), as emissões de poluentes crescem na baixa renda porque os agentes não estão dispostos a sacrificar o seu consumo em favor de um aumento do investimento na qualidade ambiental (WILLIAM e GREGORY, 1997).

3 A relação entre o crescimento da renda, as emissões de CO₂ e as principais fontes da matriz energética dos países desenvolvidos e em desenvolvimento

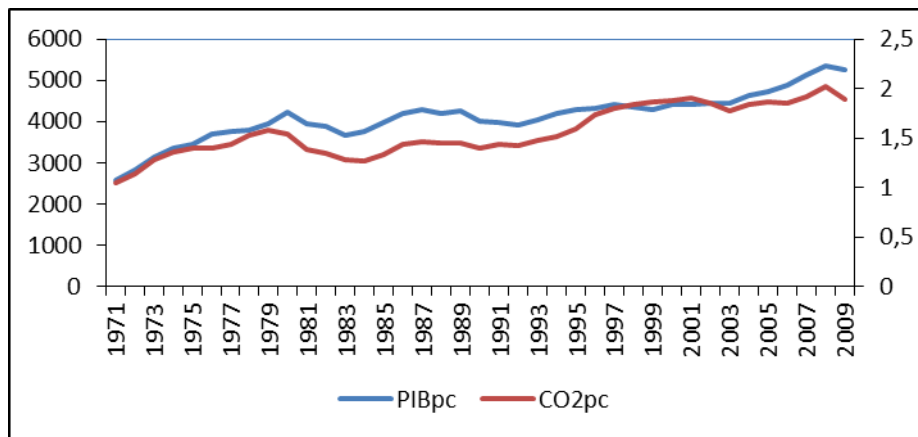
A relação entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂ apresenta distintas tendências dependendo do estágio de desenvolvimento de cada país. Em geral, espera-se que o crescimento econômico nos países desenvolvidos seja acompanhado de uma diminuição das emissões de CO₂. Já nos países em desenvolvimento, o processo de crescimento econômico, geralmente, é acompanhado de um aumento das emissões de CO₂, dada a sua tecnologia mais poluidora.

Nos países analisados (Brasil, China, Estados Unidos e Alemanha), há diferenças na relação entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂. Buscando caracterizar tais diferenças, as subseções seguintes apresentam a evolução do PIB *per capita* e as emissões de CO₂, além da matriz energética de cada um dos países.

3.1 Brasil

Entre 1971 e 2009, a economia brasileira passou de um Produto Interno Bruto *per capita* de US\$2.577,30 para US\$5.271,14, conforme Banco Mundial (2012), já as emissões de CO₂ *per capita* passaram, no mesmo período, de 1,04 toneladas métricas *per capita* em 1971, para 1,90 em 2009, demonstrando que a renda cresceu quase que invariavelmente acompanhada pelo crescimento das emissões de CO₂ (ver Figura 3).

Figura 3 - PIB e CO₂ para o Brasil, em termos per capita, entre 1971 e 2009, a preços de 2000

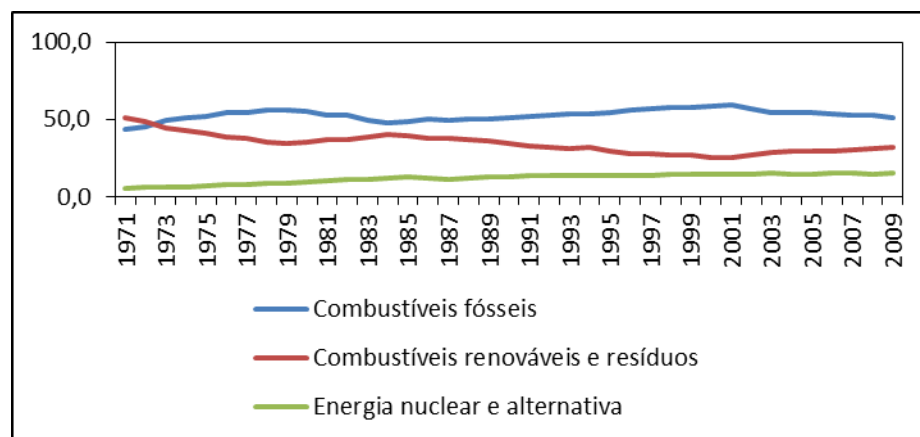


Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2012.

De acordo com o EIA (2012), o Brasil é o nono maior consumidor de energia do mundo e o terceiro maior do hemisfério ocidental, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e do Canadá. O consumo total de energia primária aumentou em cerca de um terço entre 2000 e 2010, devido ao seu crescimento econômico. Além disso, o Brasil fez grandes progressos no aumento da sua produção total de energia, principalmente petróleo e etanol, as quais as fontes de energia mais relevantes da sua matriz produtiva, embora continue sendo majoritariamente dependente de combustíveis de origem fóssil como o petróleo (ver Figura 3).

Verifica-se que, entre 1971 e 1973, a matriz energética brasileira apresentou uma inversão, passando de ter como principal fonte energética os combustíveis renováveis e resíduos a basear a sua produção em combustíveis de origem fóssil (BANCO MUNDIAL, 2013). Essa inversão na matriz energética de combustíveis renováveis para combustíveis fósseis pode ajudar a explicar o aumento nas emissões e CO₂ do país nesse período.

Figura 4 - Fontes de energia consumidas, em % do total, para o Brasil, entre 1971 e 2009



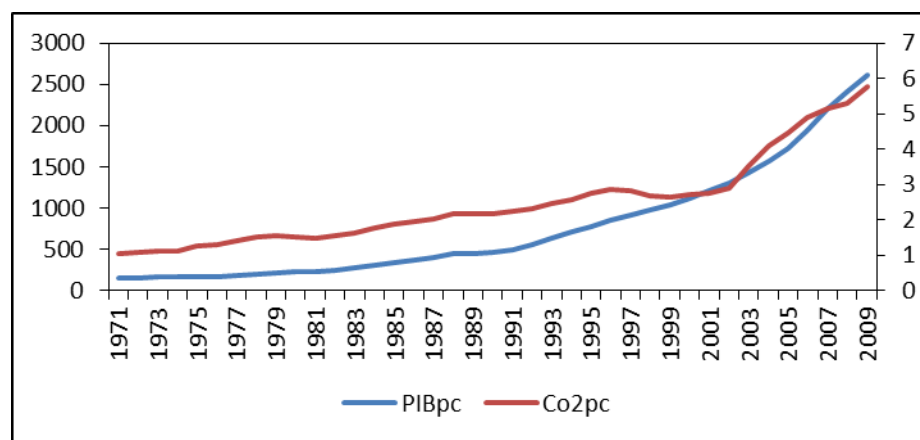
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2013.

Embora a matriz produtiva brasileira seja majoritariamente dependente de combustíveis de origem fóssil como o petróleo, também utiliza energia hidrelétrica e fontes energéticas renováveis em seu processo de crescimento, o que torna o seu crescimento mais limpo do que o de países como a China que tem no carvão – um combustível altamente poluidor – a sua maior fonte de energia.

3.2 China

Desde a abertura económica no final da década de 1970, a economia chinesa tem crescido a um ritmo de cerca de 10% ao ano. O consumo energético também tem crescido, apesar de em um ritmo mais lento, porém em 2009 a China se tornou o maior consumidor mundial de energia. Entre 1971 e 2009, o PIB *per capita* da China passou de US\$150,52 para US\$2.611,40, enquanto que as emissões de CO₂ *per capita* passaram de 1,04 toneladas métricas *per capita* para 5,77 toneladas métricas *per capita* (ver Figura 5).

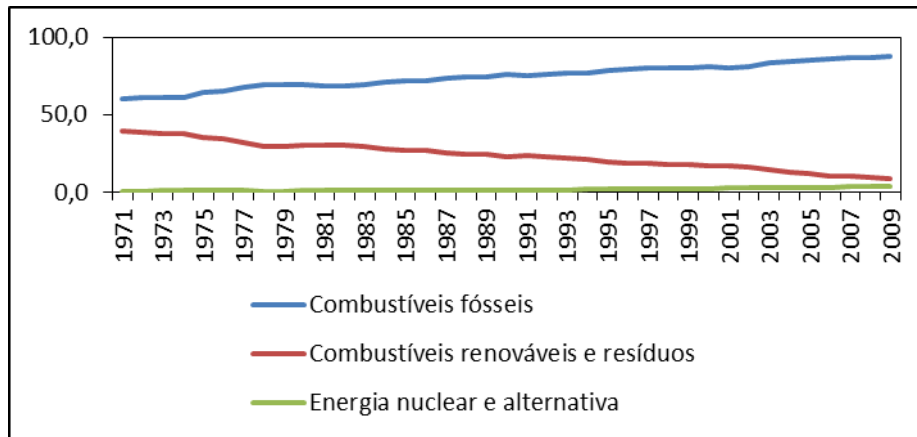
Figura 5 - PIB, FBKF e CO₂ para a China, em termos per capita, entre 1971 e 2009, a preços de 2000



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2012.

Embora o uso de gás natural esteja aumentando rapidamente na China, o combustível ainda compunha menos de 4% do consumo total de energia primária do país em 2009, sendo que a principal fonte de energia ainda é o carvão vegetal. O país asiático é o maior produtor e consumidor de carvão do mundo, sendo responsável por quase a metade do consumo de carvão do mundo e maior responsável pela energia total consumida no país. Entre os usos está a geração de eletricidade que continua sendo dominada por fontes de combustíveis fósseis, especialmente pelo carvão.

Figura 6 - Fontes de energia consumidas, em % do total, para a China, entre 1971 e 2009



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2013.

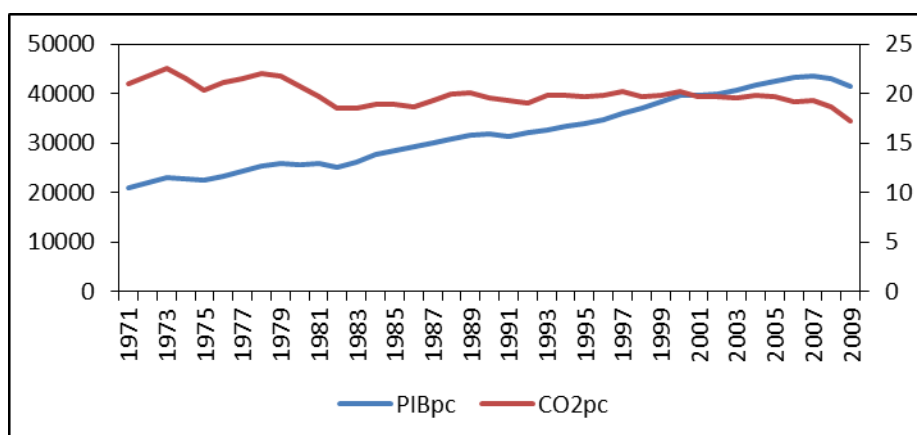
A análise das principais fontes de energia da China demonstra que ao longo do período analisado a energia renovável vem sendo substituída pela energia de origem fóssil. Essa substituição de combustíveis renováveis por combustíveis de origem fóssil torna a matriz energética chinesa muito mais suja e poluidora (ver Figura 6).

3.3 Estado Unidos

Nos Estados Unidos, a trajetória do PIB *per capita* demonstrou crescimento constante no período analisado, passando de US\$20.991,42 em 1971 para US\$41.366,29, em 2009. A trajetória das emissões de CO₂ *per capita*, por outro lado, apresenta recorrentes oscilações finalizando em 2009 com um valor inferior ao que apresentava em 1971 –17,27 toneladas métricas *per capita* contra 20,98 toneladas métricas *per capita* no primeiro ano da análise (ver Figura 7).

As fontes energéticas utilizadas nos Estados Unidos tem, assim como na China, sofrido uma substituição, só que no caso do país norte-americano, a substituição tem sido no sentido de tornar a matriz energética do país mais limpa.

Figura 7 - PIB e CO₂ para a Estados Unidos, em termos per capita, entre 1971 e 2009, a preços de 2000

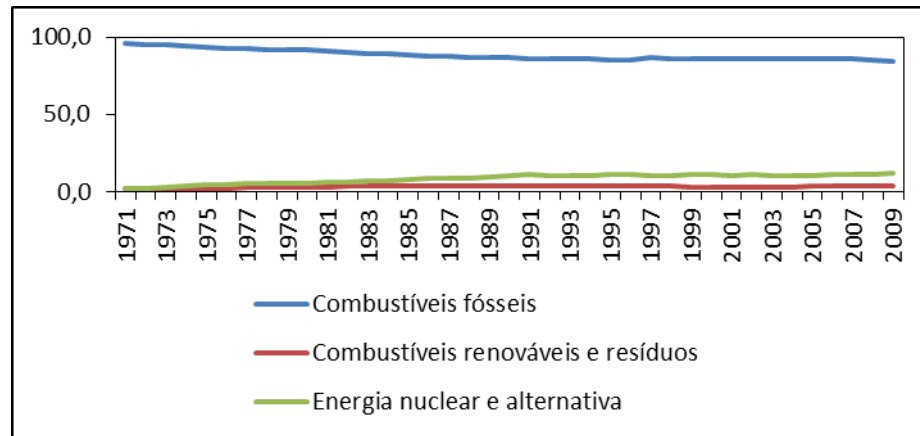


Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2012.

Nos Estados Unidos, ao contrário do que se verificou na China, a energia proveniente de combustíveis fósseis vem diminuindo sua importância relativa e vem sendo substituída por

energia proveniente de combustíveis renováveis e resíduos, e principalmente, por energia nuclear e outras energias alternativas.

Figura 82 - Fontes de energia consumidas, em % do total, para os Estados Unidos, entre 1971 e 2009



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2013.

Temporalmente, em 1971 os combustíveis fósseis representavam 95,6% do total das fontes de energia consumidas, enquanto que os combustíveis renováveis constituíam um 2,2% e a energia nuclear e alternativas um 2,1% do total. Em 2009, esse cenário se inverteu e os combustíveis fósseis foram responsáveis pelo 84,2% do total das fontes de energia consumidas no país, enquanto que os combustíveis renováveis ficavam com um 3,9% e a energia nuclear e alternativas passaram a ser responsáveis por 11,8% do total de combustíveis consumidos (ver Figura 8).

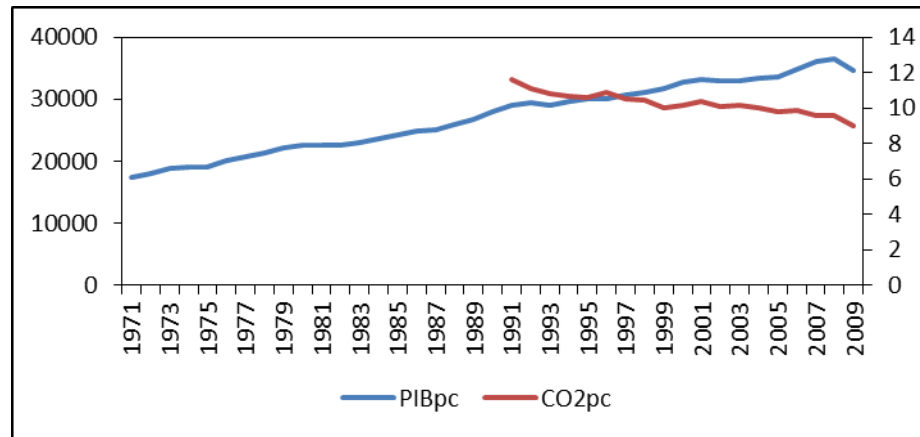
3.4 Alemanha

A Alemanha é o maior consumidor de energia na Europa (não incluindo a Rússia), e o sétimo maior consumidor de energia globalmente, além de ser a quarta maior economia do mundo em PIB nominal, depois dos Estados Unidos, China e Japão (IEA, 2012). Seu tamanho e localização lhe fornecem influência considerável sobre o setor de energia da União Europeia, no entanto, o país depende das importações para atender a maioria de sua demanda de energia.

Embora o carvão seja o recurso energético mais abundante na Alemanha, o seu papel como fonte de energia, embora significativo, tem diminuído progressivamente ao longo do tempo.

As trajetórias do PIB *per capita* e das emissões de CO₂ da Alemanha tem se mostrado opostas, enquanto o produto demonstrou trajetória crescente durante todo o período analisado, as emissões de CO₂ *per capita* apresentaram trajetória decrescente. Entretanto, as informações sobre as emissões de CO₂ *per capita* estão disponíveis apenas a partir de 1991, sendo que observa-se constante decréscimo, passando de 11,63 toneladas métricas *per capita* para 8,97 (ver Figura 9).

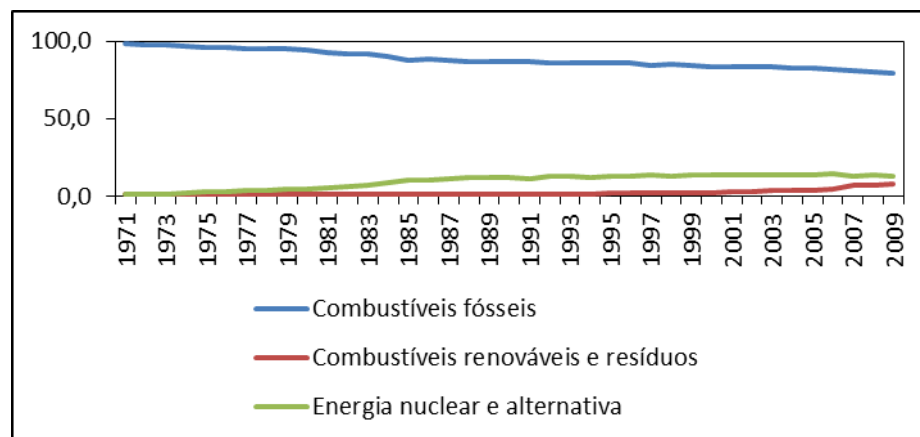
Figura 9 - PIB, FBKF e CO₂ para a Alemanha, em termos per capita, entre 1971 e 2009, a preços de 2000



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2012.

Esse decrescimento das emissões pode ser explicado pela substituição da energia proveniente de combustíveis de origem fóssil, mais poluidora por energia proveniente dos combustíveis renováveis e principalmente pela energia nuclear e energia alternativa ocorrida entre 1971 e 2009.

Figura 10 - Fontes de energia consumidas, em % do total, para a Alemanha, entre 1971 e 2009



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Banco Mundial, 2013.

Durante todo o período, a matriz energética da Alemanha foi se tornando mais limpa e, em 2009, a energia proveniente dos combustíveis de origem fóssil constituía 79,4% da energia total. A energia proveniente dos combustíveis renováveis, por outro lado, representava 7,8% e as energias nuclear e energia alternativa consistiam 13,1% do total da energia utilizada no país (ver Figura 10).

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo teórico

A relação entre as emissões de CO_2 *per capita* e o PIB *per capita* de cada um dos países seleccionados, representada pela CKA em suas duas versões (formato de u-invertido e formato de N), foi estimada pela equação em (1):

$$Y_i = \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \beta_3 X_i^3 + u_i \quad (1)$$

Esta equação consiste na forma reduzida da equação testada nos estudos de Shafik e Bandyopadhyay (1992) e Grossman e Krueger (1995). Em relação a esses trabalhos, a proposta apresentada limitou a análise apenas a relação entre emissões de CO₂ e crescimento do PIB *per capita*, excluindo quaisquer outras variáveis eventualmente utilizadas.

4.2 Modelo Empírico

Empiricamente foi estimada a equação:

$$CO_2 = \beta_1 PIB_i + \beta_2 PIB_i^2 + \beta_3 PIB_i^3 \quad (1b)$$

em que CO₂ são as emissões de dióxido de carbono em toneladas métricas *per capita* do país, o PIB é o Produto Interno Bruto, elevado ao quadrado e ao cubo (PIB² e PIB³ respectivamente).

Em termos analíticos, se na equação em (1b) $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$ a relação entre o CO₂ *per capita* e o PIB *per capita* denota uma relação linear monotônica crescente, indicando que o aumento da renda *per capita* está associado com o aumento dos níveis de emissões de CO₂ *per capita*; se $\beta_1 < 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$ a relação entre o CO₂pc e o PIBpc apresenta uma relação linear monótona decrescente, indicando que o aumento da renda *per capita* está associado com diminuições dos níveis de emissões de CO₂pc; se $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 = 0$ a relação entre o CO₂pc e o PIBpc se caracteriza como uma relação quadrática, representando a CKA com formato de U-invertido e; se $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$ a relação entre o CO₂pc e o PIBpc revela um polinômio cúbico, o que representa a figura da CKA em formato de N.

A equação foi estimada para o Brasil, a China, os Estados Unidos e a Alemanha¹, com dados anuais, entre 1971 e 2009.

4.3 Modelo e hipóteses

A primeira etapa à aplicação das regressões para cada um dos países passa pela realização dos testes de estacionariedade das séries temporais, cujo objetivo é identificar as características das variáveis econômicas utilizadas. Para esse objetivo, foi aplicado o teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF). O teste ADF permite verificar a presença ou ausência de raiz unitária nas séries, sendo conduzido por meio do aumento das equações precedentes pelo acréscimo dos valores defasados da variável dependente ΔY_t .

Após verificada a estacionariedade das séries proceder-se-á à realização das regressões para cada um dos países selecionados visando testar as seguintes hipóteses:

Hipótese 1: CKA em formato de U-invertido.

Hipótese 2: A Curva de Kuznets Ambiental em formato de N.

4.4 Variáveis e dados utilizados

¹ Os valores das emissões de CO₂ para a Alemanha só são fornecidos a partir de 1991. Para fins da estimação do modelo, nos anos onde não se possuía o valor exato das emissões foi incluída uma média de todas as observações.

Os dados utilizados à análise foram o PIB *per capita* em US\$ constantes a preços de 2000, e a Emissão de CO₂ em toneladas métricas *per capita*. Ambas as séries foram tem como fonte do banco de dados do Banco Mundial.

A escolha dos países selecionados pode ser justificada pelo fato de que, de acordo com o Ministério de Agricultura, Pesca e Abastecimento (2013), existe um consenso de que os maiores emissores de gases responsáveis pelo efeito estufa são Estados Unidos, União Europeia, China, Rússia, Japão e Índia. Entre essas economias, a norte-americana lidera as emissões *per capita*. Já a China ultrapassou os norte-americanos em termos de emissões absolutas no ano de 2006. Brasil e China são analisados como representantes dos BRICs – países em desenvolvimento, Estados Unidos como representantes dos países desenvolvidos e Alemanha como país desenvolvido e representante da União Europeia.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a identificação das características das séries, procedeu-se à realização das regressões propostas para cada um dos países com as variáveis em termos absolutos. Os resultados encontrados são analisados separadamente nas próximas subseções.

5.1 Brasil

Os resultados da regressão estimada para testar a hipótese da CKA para o Brasil encontram-se na Tabela 1. Verifica-se que, ao nível de 5% de significância somente o coeficiente β_1 se mostrou significativo (β_2 e β_3 não são estatisticamente diferentes de zero), indicando que no caso do Brasil não se confirma a hipótese da CKA nem em formato de U-invertido, nem em formato de N. Neste caso, o que se constata é uma relação linear monotônica crescente, indicando que no Brasil, os aumentos no nível de renda *per capita* estão associados a aumentos dos níveis de emissões de CO₂ *per capita* ao longo de todo o período analisado.

Tabela 1- Resultados da regressão da CKA estimada para o Brasil

| Co ₂ | Coef. | Std. Err. | T | P< t |
|------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| Pib | .0004494 | .000181 | 2.48 | 0.018 |
| Pib ² | -3.38e-08 | 8.54e-08 | -0.40 | 0.695 |
| Pib ³ | 4.04e-12 | 1.00e-11 | 0.40 | 0.689 |

Fonte: Resultado de pesquisa, elaborado pela autora.

A interpretação mostra que um aumento de US\$1 no PIBpc brasileiro provoca um aumento de 0,0004 toneladas métricas *per capita*s nas emissões de CO₂ do país. Entretanto, não há nada que demonstre que a partir de certo nível de renda a trajetória das emissões de CO₂ se torne negativa, o que indica que a relação de emissões de CO₂pc e crescimento do PIBpc no Brasil.

De acordo com trabalhos, caso de Carvalho e Almeida, (2010), esse padrão de crescimento ocorre, em geral, em uma primeira etapa, quando a economia do país está em um processo de transição de uma economia agrícola para uma economia industrial, fazendo com que o crescimento econômico implique uma pressão cada vez maior sobre o meio ambiente, resultado da criação e ampliação do parque industrial, o que se assemelha muito ao caso da economia brasileira. Logo, após o período de transição o atendimento das necessidades básicas permite o crescimento de setores menos intensivos em recursos e poluição, e as

melhorias técnicas começam a reduzir a intensidade de matéria/energia e rejeitos da produção, o que leva ao crescimento com diminuição dos danos ambientais.

5.2 China

Os resultados à China se encontram na Tabela 2 e demonstram que, ao nível de 5% de significância, todos os coeficientes se mostraram estatisticamente significativos, sendo que $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$, o que indica que na economia chinesa a relação entre aumento da renda *per capita* e emissões de CO₂pc é representada por uma função cúbica, o que sugere que na China as emissões de CO₂pc voltam a crescer após um certo nível de renda *per capita* muito elevado.

Tabela 2 - Resultados da regressão da CKA estimada para a China

| CO ₂ | Coef. | Std. Err. | T | P< t |
|------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| Pib | .0061375 | .0003413 | 17.98 | 0.000 |
| Pib ² | -3.94e-06 | 4.52e-07 | -8.71 | 0.000 |
| Pib ³ | 9.64e-10 | 1.36e-10 | 7.09 | 0.000 |

Fonte: Resultado de pesquisa, elaborado pela autora.

Interpretando, pode-se sugerir que em um primeiro momento um aumento de US\$1 no PIBpc da China leva a um aumento de 0,006 toneladas métricas *per capita* nas suas emissões de CO₂. Após determinado nível de renda, essa relação se torna negativa, e um aumento de US\$1 no PIBpc da China passa a causar uma diminuição de $-3,94 \times 10^{-6}$ toneladas métricas *per capita* nas emissões de CO₂ do país – o que mostra que nesse trecho da curva, o país está crescendo com diminuição de emissões. Com o contínuo crescimento da renda a relação torna a se inverter e volta a ser positiva. Assim, em níveis de renda ainda mais elevados um aumento de US\$1 no PIBpc do país causa um aumento de $9,64 \times 10^{-10}$ toneladas métricas *per capita* nas suas emissões de CO₂.

Essa evidência vai de encontro à justificativa de De Bruyn *et al.* (1998), de que maiores níveis de renda *per capita* elevariam o consumo em termos absolutos, ainda que eles se reduzissem em termos *per capita*, fazendo com que após um certo nível de renda as emissões de CO₂ retomem a sua trajetória ascendente.

5.3 Estados Unidos

Assim como à China, as estimativas para os Estados Unidos também apresentaram, ao nível de 5 % de significância, todos os coeficientes estatisticamente significativos e diferentes de zero, como pode ser verificado a partir da Tabela 3. A relação evidenciada pelos parâmetros mostra $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$, o que sugere que, embora possa haver uma diminuição nas emissões de CO₂ à medida que a renda *per capita* do país cresce, em níveis de renda elevados as emissões de CO₂ apresentam um novo ponto de inflexão e retomam a sua trajetória ascendente, apresentando então uma curva em formato de N.

Tabela 3 - Resultados da regressão da CKA estimada para os Estados Unidos

| Co ₂ | Coef. | Std. Err. | T | P< t |
|------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| Pib | .0022903 | .0001376 | 16.65 | 0.000 |
| Pib ² | -8.05e-08 | 8.42e-09 | -9.57 | 0.000 |
| Pib ³ | 8.80e-13 | 1.25e-13 | 7.06 | 0.000 |

Fonte: Resultado de pesquisa, elaborado pela autora.

Assim, pode se dizer que, igualmente a economia chinesa, a relação entre crescimento da renda *per capita* dos Estados Unidos e as emissões de CO₂ do país é representada por uma curva em formato de N. Especificamente, no primeiro trecho, um aumento de US\$1 no PIBpc tem como consequência um aumento de 0,002 toneladas métricas *per capita* das emissões de CO₂. No segundo trecho – trecho descendente – um aumento de US\$1 do PIBpc causa uma diminuição de $-8,05 \times 10^{-8}$ toneladas métricas *per capita* nas emissões de CO₂.

Já em níveis de renda mais elevados a relação volta a se apresentar positiva e indica que um aumento de US\$1 no PIBpc causa um aumento de $8,80 \times 10^{-13}$ toneladas métricas *per capita* na nas emissões de CO₂. Esse aumento, entretanto é bastante menor do que aquele apresentado no primeiro trecho da curva, mas mesmo assim é positivo, o que mostra que após um nível elevado de renda o crescimento do PIBpc dos Estados Unidos se dá por meio de aumento nas emissões de CO₂pc.

Isso confirmaria novamente a teoria de De Bruyn *et al.* (1998) de que a CKA não se sustenta no longo prazo e após certo nível de renda, haveria um novo ponto de inflexão que tornaria a trajetória ascendente novamente, apresentando uma CKA em formato de N.

5.4 Alemanha

Os resultados da regressão estimada à economia da Alemanha estão apresentados na Tabela 4. Particularmente, a CKA mostra, como esperado para os países desenvolvidos, um formato de U-invertido dado que apenas os coeficientes β_1 e β_2 se mostraram estatisticamente significativos (β_3 não é estatisticamente diferente de zero) sendo $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$.

Tabela 4 - Resultados da regressão da CKA estimada para a Alemanha

| Co ₂ | Coef. | Std. Err. | T | P< t |
|------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| Pib | .0009599 | .0000621 | 15.45 | 0.000 |
| Pib ² | -2.63e-08 | 4.58e-09 | -5.75 | 0.000 |
| Pib ³ | 1.97e-13 | 8.21e-14 | 2.40 | 0.222 |

Fonte: Resultado de pesquisa, elaborado pela autora.

Os resultados sugerem que, no primeiro trecho da curva, a renda *per capita* da Alemanha cresce com aumento das emissões de CO₂pc, sendo que um aumento de US\$1 no PIBpc causa um aumento de 0,0009 toneladas métricas *per capita* nas emissões de CO₂. Porém, após um determinado nível de renda, a relação passa a ser negativa e o crescimento da renda do país passa a ocorrer por meio de diminuições de emissões de CO₂pc. Assim sendo, um aumento de US\$1 no PIBpc do país europeu causaria uma diminuição de $2,63 \times 10^{-8}$ toneladas métricas *per capita* nas emissões de CO₂ do país.

A análise da evolução das emissões de CO₂pc na economia alemã corrobora esse resultado, dado que a partir do ano que se tem registro (1991), o país vem apresentando um decréscimo das suas emissões de CO₂, o que estaria indicando que, ao contrário do Brasil, após crescer às custas de maiores danos ambientais, a economia alemã alcançou uma renda *per capita* suficientemente alta como para poder crescer com diminuição dos seus danos

ambientais e poder apresentar uma trajetória decrescente que de sua curva de relação entre crescimento da renda e emissões de CO₂ um formato de U-invertido.

Desse modo, de acordo com Grossman e Krueger (1991) CKA da Alemanha estaria apresentando um formato de U-invertido, pois seus efeitos composição e tecnologia estariam se sobrepondo ao seu efeito-renda.

6 CONCLUSÕES

O trabalho objetivou estimar a CKA, estudando a relação entre crescimento da renda *per capita* e emissões de CO₂ *per capita* do Brasil, China, Estados Unidos e Alemanha, entre 1971 e 2009. Para, a partir disso, verificar se nesses países a relação entre crescimento da renda e danos ambientais (especificamente emissões de CO₂pc) se enquadravam na hipótese da CKA, tanto na sua versão em formato de U-invertido quanto na sua versão alternativa em formato de N.

Os resultados variam de um país para outro, passando de curvas com formato de U-invertido, curvas com formato de N e curvas que não se encaixam em nenhuma das hipóteses. Quando analisada a relação entre crescimento da renda *per capita* e emissões de CO₂pc para o Brasil, constatou-se que a curva resultante não se encaixa em nenhuma das alternativas da CKA. No Brasil, as variáveis apresentam uma relação linear monotônica crescente, o que sugere que, durante todo o período analisado (1971 a 2009) os crescimentos de renda *per capita* provocaram aumentos nas emissões de CO₂pc, o que não está longe dos resultados esperados para países em desenvolvimento.

À China, os resultados sugerem que a relação entre o crescimento da renda e as emissões de CO₂ apresentam uma curva em formato de N, indicando que as emissões de CO₂ crescem em baixos níveis de renda, decrescem em um intervalo de rendas mais elevadas e, após atingir um patamar de renda elevado voltam a crescer.

Quanto aos Estados Unidos, o resultado demonstrou que uma relação entre crescimento da renda e emissões de CO₂ também em formato de N, o que sugere que os Estados Unidos alcançaram uma renda elevada o suficiente como para aumentar o consumo em termos absolutos (ainda que se reduzam em termos *per capita*) a ponto de voltar a ter um crescimento com aumento dos níveis de poluição.

À hipótese da CKA para a Alemanha encontrou-se uma relação quadrática, representada por meio de uma curva em formato de U-invertido. Isso quer dizer que, em baixos níveis de renda, o PIBpc cresce com aumento das emissões de CO₂pc. Após certo nível de renda, entretanto, a relação se inverte, e o crescimento do PIBpc do país se dá por meio de diminuições no nível das suas emissões de CO₂pc.

Cabe ressaltar, que os resultados obtidos permitem análises limitadas, tanto pela extensão do período analisado quanto pelo poluente escolhido para análise, de forma que analisar esta relação considerando um período mais extenso e outros poluentes, torna-se objeto de estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ARROW, K. et al. **Economic growth, Carrying Capacity, and the Environment.** Science, v. 268, 28 april 1995.

BANCO MUNDIAL. Banco de dados. Disponível em:
<http://www.worldbank.org/pt/country/brazil>.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Efeito estufa e a convenção sobre mudança do clima.** Setembro, 1999.

CARSON, R., 2010. The Environmental Kuznets Curve: seeking empirical regularity and theoretical structure. *Rev. Environ. Econ. Policy*, v. 4 n. 1, p. 3-23.

CARVALHO, T. S.; ALMEIDA, E. **A hipótese da Curva de Kuznets Ambiental Global:** uma perspectiva econométrico-espacial. *Est. Econ.*, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 587-615, jul-set 2010.

CROPPER, M.; GRIFFITHS, C. **The interaction of population growth and environmental quality.** *American Economic Review*, v. 84, p. 250-254, 1994.

DE BRUYN, S. M.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M.; OPSCHOOR, J. B. **Economic growth and emissions:** reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, v. 25, p. 161-175, Amsterdam, 1998.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Disponível em:
<http://www.eia.gov/>. Acesso em: 19/ago/2013.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. **Environmental impacts of North American free trade agreement.** Nber working paper series. Working paper n.3914 National Bureau of economic research. Cambridge: November, 1991.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. **Economic growth and the environment.** *The Quarterly Journal of Economics*, v. 110, n. 2, p. 353-377, may, 1995.

KUZNETS, S. S. **Economic growth and income inequality.** *The American Economic Review*, v.45 n. 1, p.1-28, mar, 1955.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PESCARIA E ABASTECIMENTO. **Quais são os países que mais emitem gases do efeito estufa?** Disponível em:
http://www.aquecimento.cnpm.embrapa.br/conteudo/historico_aq_paises.htm Acesso em: 25/abr/2013.

SANTOS, J. F. **Crescimento econômico e emissões de CO₂ por combustíveis fósseis:** uma análise da hipótese da Curva de Kuznets Ambiental. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais: 2009.

TUAN, N.A. **Evidences of Environmental Kuznets Curve from CO₂ Emissions in Six-Country Analysis,** Working Paper, Institute d’Economie et de Polique de L’Energie (IEPE), França, 1999.

WILLIAM, R.; MOOMAW e GREGORY C. UNRUH (1997). **Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO₂ emissions.** *Environment and Development Economics*, 2, pp 451-463 doi:10.1017/S1355770X97000247.