

## A HIPÓTESE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL GLOBAL: UMA PERSPECTIVA ECONOMÉTRICO-ESPACIAL

**Terciane Sabadini Carvalho**

Mestranda da UFJF

[tercianesabadini@yahoo.com.br](mailto:tercianesabadini@yahoo.com.br)

**Eduardo Almeida**

Professor Adjunto da UFJF e pesquisador do CNPq

[eduardo.almeida@ufjf.edu.br](mailto:eduardo.almeida@ufjf.edu.br)

**Resumo:** As questões sobre o meio ambiente, ano após ano, vêm desempenhando um destacado papel no debate global sobre o futuro do planeta. Com o objetivo de averiguar a relação entre crescimento da renda e o aquecimento global, este trabalho estima uma curva de Kuznets ambiental global para uma amostra de 187 países por meio de uma abordagem econométrica espacial. Usando dados *cross-section* para o ano de 2004, é estimada uma CKA convencional para emissões de CO<sub>2</sub> per capita contra a renda per capita e seu termo ao quadrado, controlando para exportações per capita, consumo de energia per capita, uma variável *dummy* indicando os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto e os efeitos espaciais. Os resultados inicialmente sugerem que existem evidências de uma CKA na forma de “U” invertido, isto é, crescimento reduz o impacto ambiental da atividade econômica. Porém, a incorporação de um termo cúbico para a renda revela que as emissões eventualmente voltam a aumentar em níveis muito elevados de crescimento, fazendo que a CKA estimada para os países do mundo tenha a forma de N. Além disso, outra descoberta foi a evidência de que os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto reduziram significativamente suas emissões de CO<sub>2</sub> per capita.

**Palavras-chave:** Curva de Kuznets Ambiental, emissões de CO<sub>2</sub> per capita, econometria espacial, Protocolo de Kyoto

**Classificação JEL:** Q53, C21.

**Abstract:** Over the years environmental issues have been playing a remarkable role in the global debate about the Earth future. With the aim of checking the relationship between income growth and global warming, the present study estimates a global environmental Kuznets curve for a sample of 187 countries through a spatial econometric approach. Using cross-section data for the year 2004, an EKC for conventional per capita CO<sub>2</sub> emissions was run on per capita income and its square value, controlling for per capita exports, per capita energy consumption, a dummy variable indicating the countries that ratified the Kyoto Protocol and spatial effects. The results initially suggested that there is evidence of an inverted U shaped EKC, that is, growth reduces the environmental impact of economic activity. However, the incorporation of a cubic term for per capita income shows that emissions eventually return to increase at a very high level of growth, leading the estimated EKC has an N shape. Furthermore, another finding was that there are evidences that countries that ratified the Kyoto Protocol reduced significantly their per capita CO<sub>2</sub> emissions.

**Key words:** Environmental Kuznets Curve, per capita CO<sub>2</sub> emissions, spatial econometrics, Kyoto Protocol

**Área 10 – Economia Agrícola e do Meio Ambiente**

# A HIPÓTESE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL GLOBAL: UMA PERSPECTIVA ECONOMÉTRICO-ESPACIAL

## 1. Introdução

A ameaça da mudança climática provocada pelo aquecimento global é uma questão cuja relevância está sendo amplamente reconhecida por muitos especialistas e governos em todo o mundo. A *Earth Summit*, realizada no Rio de Janeiro em 1992 e a *Kyoto Summit* de 1997 têm chamado a atenção internacional sobre as conseqüências negativas de um aquecimento do planeta, bem como sobre os potenciais instrumentos para lidar com este problema (GALEOTTI e LANZA, 1999).

Devido à liberação de enormes quantidades de CO<sub>2</sub> na combustão de energias fósseis, as suas emissões são classificadas como uma das forças motrizes por trás do fenômeno do aquecimento global. Em todo o mundo, as emissões dos GEE<sup>1</sup> estão aumentando, apesar dos esforços comuns para implementar acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto.

As questões sobre o meio ambiente, ano após ano, vêm tomando um lugar de destaque no rol das preocupações sociais e econômicas. Por volta dos anos 70, existia uma crença generalizada de que o crescimento econômico de uma nação seria a fonte da maioria dos problemas ambientais. Entretanto, pode-se afirmar que a partir dos anos 90, alguns economistas começaram a argumentar que essa visão era extremamente pessimista na medida em que rejeita as alterações educacionais, tecnológicas, econômicas e políticas que acompanham o desenvolvimento de uma nação, que podem amenizar os problemas ambientais. Na verdade, o que se precisa saber, de fato, é se existe um *trade-off* entre crescimento e poluição, ou se é possível almejar um amadurecimento das economias sem que o meio ambiente seja por isto degradado (FONSECA e RIBEIRO, 2004).

A partir do relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*World Commission on Environmental and Development – WCED*), conhecido como Relatório *Brundtland* (WCED, 1987), foi apresentada a possibilidade de se alcançar a sustentabilidade sem que houvesse mudanças significativas no sistema econômico, lançando a idéia de desenvolvimento sustentável<sup>2</sup>. Passou-se a ver no desenvolvimento, entendido aqui como crescimento econômico, uma saída para os problemas ambientais no momento em que foram identificadas sinergias entre o crescimento e melhorias ambientais.

Segundo o Relatório *Brundtland*<sup>3</sup>, os riscos e as incertezas ambientais decorrentes de um consumo elevado de energia no futuro são inquietantes. Dentre os riscos, pode-se destacar a probabilidade de alteração climática devido ao “efeito estufa” causado por gases emitidos na atmosfera, sendo o mais importante deles o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é produzido pela queima de combustíveis fósseis e a poluição do ar urbano pelas indústrias. O acúmulo de CO<sub>2</sub> e de outros gases na atmosfera retém a radiação solar nas proximidades da superfície terrestre, provocando o aquecimento do planeta. Isso pode fazer com que o nível do mar, nas próximas décadas, se eleve ao ponto de inundar muitas cidades situadas em litorais e deltas de rio, assim como pode causar enormes transtornos à produção agrícola nacional e internacional e aos sistemas comerciais.

---

<sup>1</sup> GEE – Gases de efeito estufa.

<sup>2</sup> Desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que atende às necessidades presentes sem comprometer as necessidades futuras.

<sup>3</sup> O relatório *Brundtland* faz parte de uma série de iniciativas que reafirmam uma visão crítica de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e as nações em desenvolvimento, e ressaltam os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de sustentação dos ecossistemas.

Por volta dos anos oitenta, uma visão crítica começou a surgir entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento preocupados em como o crescimento econômico ocorria mundialmente e seus impactos no futuro do planeta. Assim, existe uma preocupação sobre o uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de sustentação dos ecossistemas de dispersar-se ao longo do mundo.

Nesse contexto, alguns autores investigaram uma relação que passaria a ser chamada de Curva de Kuznets<sup>4</sup> Ambiental (CKA), em que algumas medidas de degradação ambiental aumentariam nos momentos iniciais do crescimento econômico, porém eventualmente, diminuiriam quando certo nível de renda fosse alcançado.<sup>5</sup>

O conceito da CKA surgiu no começo da década de 1990 para descrever a trajetória no tempo que a poluição de um país seguirá como resultado do desenvolvimento econômico. Quando o crescimento ocorre em um país extremamente pobre, a poluição inicialmente cresce porque os aumentos na produção geram emissões de poluentes e porque o país, dado sua pobreza, coloca uma baixa prioridade sobre o controle da degradação ambiental. Uma vez que o país ganha suficiente grau de afluência, sua prioridade muda para proteção da qualidade ambiental. Se esse efeito renda é forte o suficiente, causará o declínio da poluição. Segundo Deacon e Norman (2004), tal raciocínio sugere que a melhoria ambiental não pode vir sem crescimento econômico.

Em consonância com essa idéia, os países passariam por estágios de desenvolvimento, regidos pelas forças de mercado e por mudanças na regulação governamental. No primeiro estágio, marcado pela transição de uma economia tradicional agrícola para uma industrializada, o crescimento econômico implica em uma pressão cada vez maior sobre o meio ambiente<sup>6</sup>, resultado da criação e ampliação do parque industrial. O estágio seguinte seria caracterizado pela maturação da sociedade e da infra-estrutura industrial. Nesse ponto, 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. Por fim, no terceiro estágio de desenvolvimento, ocorreria o “descolamento” (*de-linking*) entre o crescimento econômico e a pressão sobre o meio ambiente, a partir de quando o primeiro não mais implica em um aumento do segundo (GROSSMAN e KRUEGER, 1995; SHAFIK e BANDYOPADHYAY, 1992; SELDEN e SONG, 1994).

Isso tudo implica que o impacto ambiental é uma função na forma de “U” invertido na renda per capita, como é mostrado na Figura 1.

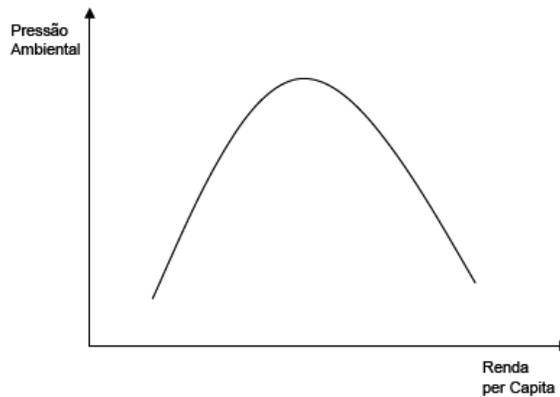
---

<sup>4</sup> A Curva de Kuznets Ambiental foi assim denominada depois de Kuznets (1966) que lançou a hipótese sobre uma relação na forma de “U” invertido entre a medida de desigualdade na distribuição de renda e o nível de renda per capita.

<sup>5</sup> De acordo com Stern (2004, p. 1419), “the EKC proposes that indicator of environmental degradation first rise, and then fall with increasing income per capita”.

<sup>6</sup> Por meio ambiente considera-se não apenas os ecossistemas *strictu senso* (expressos nas cadeias tróficas), mas o próprio ambiente natural onde suas relações e interrelações se estabelecem e seus componentes geofísicos. Em outras palavras, quando se refere aos impactos sobre o meio ambiente está-se referindo tanto à exploração de recursos naturais (geofísicos e biológicos – inclusive recursos energéticos), quanto à degradação do ambiente natural (geração de resíduos e poluição) e seus efeitos sobre os ecossistemas (LUCENA, 2005).

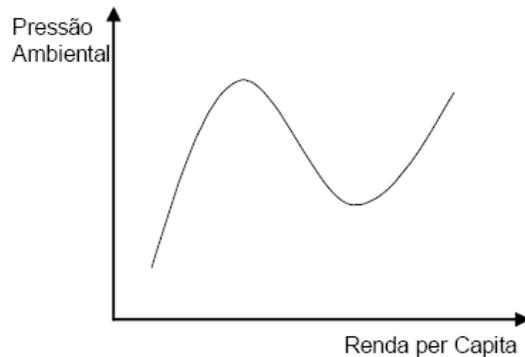
**Figura 1 – Curva de Kuznets Ambiental**



São vários os fatores identificados na literatura que são responsáveis pelo formato descrito pela CKA. A inversão da trajetória positivamente inclinada para uma negativamente inclinada foi atribuída por Selden e Song (1994) a: i) uma elasticidade renda positiva para qualidade ambiental, ou seja, conforme aumenta a renda, as pessoas tendem a querer mais qualidade ambiental; ii) mudanças na composição da produção e do consumo; iii) níveis maiores de educação ambiental e conscientização das conseqüências da atividade econômica sobre o meio ambiente; e iv) sistemas políticos mais abertos. Aumento na rigidez da regulação ambiental, melhorias tecnológicas e a liberalização comercial também são apontados como possíveis causadores do “descolamento” (COLE, 2004; STERN, 2004).

Contudo, alguns autores, assim como De Bruyn *et al* (1998) acreditam que a CKA não se sustenta no longo prazo. E então, 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 (vide Figura 2).

**Figura 2 – Curva de Kuznets Ambiental II**



A decomposição dos efeitos (efeito escala, efeito composição e efeito técnico) que regem a relação entre o crescimento econômico e qualidade ambiental, descrita por Grossman e Krueger (1991), é bastante útil para analisar as causas que estão por trás da CKA. 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 (TORRAS e BOYCE, 1998). Para Stern (2004), nos países industrializados, onde a taxa de crescimento econômico é baixa, o efeito escala pode ser compensado pelos outros dois efeitos. Isso não ocorre, porém, nos países em desenvolvimento, onde as taxas de crescimento são mais altas. Nesses países, os efeitos técnico e composição não conseguem se sobressair ao efeito escala.

Torras e Boyce (1998), no entanto, afirmam que a mudança na composição da produção não é suficiente para compensar o efeito escala de forma a criar uma trajetória similar à CKA. Desconsiderando o efeito técnico, isso só seria possível se os setores intensivos em poluição diminuíssem em termos absolutos – o que implicaria que os bens produzidos por eles fossem inferiores (isto é, cuja demanda cai conforme a renda aumenta) – ou se a sua produção fosse substituída por importações. Sendo a primeira opção improvável, o que se observa no efeito composição é apenas o deslocamento das atividades nocivas ao meio ambiente para outros países, em geral, países em desenvolvimento.

Tal conclusão está relacionada à Hipótese dos Portos de Poluição. Segundo Cole (2004), se essa hipótese é verdadeira, então uma CKA não existe. Ela representa apenas uma transferência de poluição entre nações de alta renda para nações mais pobres, o que, por sua vez, impede que a trajetória de desligamento entre crescimento e impacto ambiental seja replicada pelos países em desenvolvimento.

O sucesso na redução das emissões e concentrações de poluentes, tais como o dióxido de enxofre nos países desenvolvidos nas décadas de 1970 e 1980, ajudou a gerar a idéia da CKA no começo da década de 1990 (STERN, 2004). O conceito no qual a poluição, primeiro, aumenta, e então decresce com o crescimento da renda se fortaleceu em crenças pré-existentes que países em desenvolvimento são “muito pobres para serem verdes”.

Beckerman (1992) enfatizou que existe uma evidência clara de que, embora o crescimento econômico normalmente leve à degradação ambiental nos estágios iniciais do processo, no fim, o melhor e provavelmente o único caminho para se obter um meio ambiente decente na maioria dos países é tornando-se rico.

Se o total da poluição declina com a renda crescente, a mudança tecnológica provavelmente possui um papel chave. Hicks (1932) *apud* Torras e Boyce (1998) distinguiu entre inovações “autônomas” e “induzidas”: a primeira é exógena, enquanto que a segunda é endógena às forças econômicas. Se o efeito da tecnologia é forte o suficiente para causar um declínio na poluição total entre os países quando a renda aumenta, a causa provável são as inovações induzidas. Os sinais do mercado podem contribuir ao processo de indução, por exemplo, se os custos crescentes dos recursos encorajarem mudanças tecnológicas poupadoras de recursos, e se consumidores mais conscientes estimularem as firmas a adotarem tecnologias mais limpas. Mas suspeita-se que as políticas do governo que incluem padrões regulamentares, taxas de poluição e criação de permissões de emissões comercializáveis têm sido o incentivo mais potente para uma mudança tecnológica redutora de poluição (TORRAS e BOYCE, 1998).

Talvez mais importante do que os resultados encontrados nos estudos que testam empiricamente a CKA, sejam as implicações dessa relação em termos de política ambiental. Grossman e Krueger (1995), no entanto, alertam para o fato de que, mesmo para os indicadores de poluição que demonstram uma queda após certo nível de renda, nada garante que tal processo realmente ocorra. Portanto, crescimento econômico por si só não garante a cura para os problemas relacionados ao meio ambiente. As políticas ambientais apropriadas têm papel fundamental na inversão da trajetória dos poluentes que seguem a CKA.

Segundo Stern (2004), a CKA é um fenômeno essencialmente empírico, mas a maioria da literatura é econometricamente pouco sólida. De um modo geral, pouca ou

nenhuma atenção tem sido dispensada às propriedades estatísticas dos dados usados, tais como dependência espacial ou tendências estocásticas em séries de tempo, bem como pouca consideração tem sido dada às questões de adequação do modelo, tal como a possibilidade de vies de variáveis omitidas. A maioria dos estudos assume que, se os coeficientes da regressão são individualmente ou conjuntamente significativos e possuem os sinais esperados, então uma relação CKA existe (MADDISON, 2006; RUPHASINGA *et al.*, 2004).

De acordo com Agras e Chapman (1999), o fio comum de todos os modelos já realizados é a estimação de uma relação quadrática, ou log-quadrática, entre alguma medida de degradação ambiental (concentrações ambientais de SO<sub>2</sub>, emissões de CO<sub>2</sub> per capita, falta de água limpa, falta de saneamento urbano, desflorestamento e outros) e a renda per capita para testar o formato de “U” invertido da curva.

Recentemente, variáveis explanatórias têm sido incluídas a muitos destes modelos, tais como tarifas de eletricidade, dívida per capita, direitos políticos e comércio. Contudo, no final, a maioria dos estudos conclui que a renda possui o efeito mais significativo sobre a qualidade ambiental dentre todas as variáveis testadas.

Um parâmetro-chave desta literatura, segundo Perman e Stern (2003), é o chamado “ponto de inflexão”, isto é, o nível de renda per capita em que as emissões ou impactos ambientais atingem seu máximo e, então começam a declinar. Stern *et al* (1996), Stern (1998) e Stern e Common (2001) afirmam que existe um amplo intervalo entre esses pontos nos diversos estudos, de aproximadamente \$3.000 dólares em Paridade de Poder de Compra (PPC) para acima de \$100.000.

As equações estimadas usando concentrações ambientais apresentam menor “ponto de inflexão”, porque a descentralização urbana e industrial no curso do desenvolvimento econômico tende a concentrações de poluentes mais baixas, mesmo se o total de emissão aumentar. E usar a renda em PPC produzirá pontos mais altos do que a taxa de câmbio oficial. Além disso, variáveis explanatórias adicionais e formas funcionais diferentes também terão efeitos sobre o resultado. Stern e Common (2001) encontraram que essa variação também se relaciona ao intervalo dos níveis de renda incluídos na amostra dos diversos estudos. A grande variação de “pontos de inflexão” na literatura também pode indicar uma má especificação do modelo.

Outra questão, como lembra Stern *et al.* (1996), é que previsões baseadas na CKA supõem que a renda mundial é normalmente distribuída. Ao contrário, a renda média mundial está muito acima da renda mediana. Seria apropriado utilizar, portanto, a segunda medida para realizar previsões sobre a evolução do nível de poluição global.

Uma outra limitação dos modelos que utilizam uma equação única na forma reduzida com a renda como principal variável é que eles não fornecem explicações para as causas por trás da relação estudada. Os modelos utilizados, na grande maioria dos estudos, não fornecem nenhuma base para concluir se a CKA é resultado de mudanças autônomas na estrutura econômica e na tecnologia ou se ela deriva de políticas ambientais ambiciosas (por exemplo) que independem da renda (DE BRUYN *et al.*, 1998). Isso é particularmente relevante na formulação de políticas.

Sendo a CKA um resultado empírico, sua validade está sujeita aos seguintes fatores: limitações quanto à disponibilidade e comparabilidade dos dados; vieses relacionados à escolha (ou omissão) de variáveis explicativas e da forma funcional; limitações quanto à capacidade de explicação do modelo; problemas quanto à estacionariedade das séries, entre outros (STERN, 2005; MOOMAW e UNRUH, 1997).

A maioria dos trabalhos desenvolvidos nesta área apresenta dados mundiais, com amostras que incluem um grande número de países. O método de análise, quase sempre, é o de dados em painel, e em menor quantidade, alguns estudos utilizaram análises *cross-section*. A literatura passou a observar esse tema a partir de Grossman e Krueger (1991), e desde

então, diversos autores publicaram nesta área, com destaque para Shafik e Bandyopadhyay (1992), Stern *et al* (1996), Stern (2004), Selden e Song (1994), entre outros. No Brasil são poucos os trabalhos sobre a CKA, podendo-se destacar o trabalho de Lucena (2005), que estimou uma curva para o Brasil e Arraes (2006), que estimou uma curva para diversos países do mundo usando uma análise de dados em painel.

O Quadro 1 reúne as principais informações a respeito dos trabalhos empíricos realizados sobre a hipótese da CKA.

Portanto, os estudos descritos têm obtido resultados e conclusões muito distintos sobre a existência de uma CKA global. Os motivos podem ser amostras de países diferentes, indicadores de degradação ambiental diversificados, técnicas econométricas distintas e pouca análise estatística dos dados.

Além disso, a maioria dos trabalhos sobre a CKA utilizou um modelo de painel de dados sem considerar a presença dos efeitos espaciais. Como áreas geográficas formam a unidade básica da CKA, ignorar a dependência espacial existente pode levar a má especificação do modelo.

Ademais, trabalhos de econometria espacial envolvendo emissões de CO<sub>2</sub> não foram encontrados durante o período da elaboração deste artigo. Portanto, o presente estudo tentará cobrir essa possível lacuna da literatura e, então, estimar uma CKA global utilizando esse poluente como medida de degradação ambiental.

**Quadro 1 – Resumo dos trabalhos econométricos sobre a CKA**

<b>Autores</b>	<b>Região</b>	<b>Período</b>	<b>Variável dependente</b>	<b>Tipos de dados</b>	<b>Variáveis adicionais</b>	<b>Ponto de inflexão</b>	<b>Conclusões</b>
Grossman e Krueger (1991)	Até 52 cidades em até 32 países	1977, 1982, 1988	Concentração de SO <sub>2</sub> e SPM	Painel de dados	<i>dummy</i> de locais, tendência de tempo, e variável de comércio	entre \$4.000 e \$5.000	O crescimento econômico em níveis médios de renda melhoraria a qualidade ambiental, enquanto crescimento em altos níveis de renda seria prejudicial.
Shafik e Bandyopadhyay (1992)	149 países	1960-1990	ausência de água limpa, de saneamento urbano, SPM, óxido de enxofre, mudanças nas áreas florestais, oxigênio dissolvidos em rios, coliformes fecais em rios, resíduos municipais per capita e emissões de carbono per capita.	Painel de dados	Tendência de tempo, densidade populacional, comércio, <i>dummies</i> locais	Entre \$3.000 e \$4.000 para os poluentes do ar	Os dois poluentes do ar apresentaram a forma de “U” invertido conforme as hipóteses da CKA. Ambos resíduos municipais e emissões de carbono per capita foram crescentes com a renda
Panayotou (1993)	68 países na amostra de desflorestamento e 54 na amostra de poluição	1987-1988	Emissões de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SPM e desflorestamento	<i>Cross-section</i>	Para a CKA de desflorestamento: densidade populacional e uma <i>dummy</i> para países tropicais	\$ 3.000 para SO <sub>2</sub> , \$ 5.500 para NO <sub>x</sub> , e em torno de \$ 4.500 para SPM.	Todas as curvas estimadas apresentaram a forma de “U” invertido
Selden e Song (1994)	30 países (22 são países da OCDE)	Médias dos anos 1973-75, 1979-81, 1982-84	Emissões de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SPM e CO	Painel de dados	densidade populacional	\$8.709 para SO <sub>2</sub> , \$11.217 para NO <sub>x</sub> , \$10.289 para SPM e \$5.963 para CO	Em níveis suficientemente altos de renda, a poluição poderia cair a zero.
Kaufmann <i>et al</i> (1998)	23 países (13 países desenvolvidos e 10 em desenvolvimento)	1974-1989	Concentração de SO <sub>2</sub>	Painel de dados	Exportações/PIB, PIB/área	\$14.730	Os resultados indicam que existe uma relação na forma de “U” entre renda e concentração de SO <sub>2</sub> , e uma relação de “U” invertido entre a intensidade da atividade econômica e concentração de enxofre.

<b>Autores</b>	<b>Região</b>	<b>Período</b>	<b>Variável dependente</b>	<b>Tipos de dados</b>	<b>Variáveis adicionais</b>	<b>Ponto de inflexão</b>	<b>Conclusões</b>
Stern (2002)	64 países	1973-1990	Emissões de SO <sub>2</sub>	Painel de dados	Mix de insumos, mix de produtos, escala de produção, progresso tecnológico, uso de energia e estrutura industrial	\$73 milhões para a amostra do mundo, \$8.496 para países da OCDE e zero para países não-OCDE	Atribuiu as modificações nas emissões às mudanças nos fatores (mix de insumos, mix de produtos, escala, progresso técnico), em vez de atribuir ao formato da CKA causado pelo PIB per capita.
Halkos (2003)	73 países da OCDE e não-OCDE	1960-1990	Emissões de SO <sub>2</sub>	Painel de dados	Variável dependente defasada	Entre \$2.805 e \$6.230	A técnica econométrica é crucial na extração de “pontos de inflexão” e nas implicações de políticas associadas.
Perman e Stern (2003)	74 países	1960-1990	Emissões de SO <sub>2</sub>	Painel de dados	Tendência de tempo	\$16.254 para países da OCDE	Embora possam existir relações de cointegração em alguns países individuais, somente algumas dessas relações sustentam a CKA.
Fonseca e Ribeiro (2005)	26 estados do Brasil	1985,1990,1995 e 2000	Percentual de áreas estaduais preservadas	Painel de dados	Somatório do percentual de votos brancos e nulos em eleições para governador, o nível de escolaridade e o índice de Gini	_____	Dependendo do tipo de poluente, da forma funcional utilizada, e até mesmo da amostra, a relação entre crescimento econômico e poluição ambiental pode assumir um resultado diferente.
Moomaw e Unhruh (1997)	16 países	1950-1992	Emissões de CO <sub>2</sub>	Painel de dados	_____	\$12.813	Nem uma relação na forma de “U” nem na forma de “N” entre emissões e renda fornecem uma indicação confiável do comportamento futuro das emissões.
Cole <i>et al</i> (1997)	7 regiões do mundo	1960-1991	Emissões de CO <sub>2</sub>	Painel de dados	Uma <i>dummy</i> de intercepto, uma tendência linear de tempo e uma variável de intensidade de comércio	\$25.100	Os resultados demonstram que a natureza global do impacto das emissões de CO <sub>2</sub> tem fornecido pouco incentivo para as nações desenvolverem ações unilaterais para sua redução.

Autores	Região	Período	Variável dependente	Tipos de dados	Variáveis adicionais	Ponto de inflexão	Conclusões
Agras e Chapman (1999)	34 países	1971-1989	Emissões de CO <sub>2</sub> , e energia	Painel de Dados	Variáveis de comércio e a variável dependente defasada	\$62.000 para o modelo de energia e \$13.630 para CO <sub>2</sub>	O estudo encontrou o formato de U invertido entre renda e energia, bem como entre renda e emissões de CO <sub>2</sub> .
Dijkgraaf (2001)	países da OCDE	1960-1997	Emissões de CO <sub>2</sub>	Painel de dados	_____	\$15.704 e \$13.959	O fato de que muitos países não refletem o padrão CKA torna especialmente improvável que exista uma relação na forma de “U” invertido globalmente.
Arraes <i>et al</i> (2006)	países do mundo (não define a quantidade)	1980, 1985, 1990, 1995, 2000	Emissões de CO <sub>2</sub> e outros indicadores de desenvolvimento	Painel de dados	Uma <i>dummy</i> para os países da África Subsaara	_____	A variável de emissões de CO <sub>2</sub> apresentou a forma de “U” invertido.
De Bruyn <i>et al</i> (1998)	4 países (Holanda, Reino Unido, USA, Alemanha)	1960-1993	Emissões de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub>	Painel de dados	Preços de insumos relacionados	_____	Uma forma CKA não foi encontrada.
Lucena (2005)	Brasil	1970-2003	Emissões de CO <sub>2</sub>	Série temporal	Uma variável de abertura comercial	_____	Não foram encontradas evidências de uma CKA, no caso das emissões de CO <sub>2</sub> .
Maddison (2006)	135 países	1990 e 1995	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , VOC e CO	Painel de dados com dependência espacial	<i>dummies do Protocolo de Helsinki de 1985 e Protocolo de Sofia de 1988 e uma variável de tendência para mensurar o progresso tecnológico</i>	_____	Não foi encontrado um “U” invertido em nenhuma das equações apresentadas.
Rupasingha <i>et al</i> (2004)	Regiões do EUA	1997	Liberação de Tóxicos do EPA	Painel de dados com dependência espacial	densidade populacional, grau de escolaridade, etnia, desigualdade de renda, <i>dummies</i> para áreas urbanizadas e rurais, e uma variável de razão do emprego na manufatura pelo total da economia.	Entre \$21.000 e \$23.000	Corroborou as hipóteses da CKA, porém o termo ao cubo foi positivo, indicando que o crescimento contínuo da renda não garante um melhoramento contínuo da qualidade ambiental e que a relação CKA em relação à liberação tóxica é temporária.

<b>Autores</b>	<b>Região</b>	<b>Período</b>	<b>Variável dependente</b>	<b>Tipos de dados</b>	<b>Variáveis adicionais</b>	<b>Ponto de inflexão</b>	<b>Conclusões</b>
Poon <i>et al</i> (2006)	Regiões da China	1998 a 2004	Emissões de SO <sub>2</sub> ,	Painel de dados com dependência espacial	Variáveis de energia, transportes e comércio	_____	A análise encontra a forma de “U” invertido e os modelos de dependência espacial indicaram que o aumento das exportações per capita melhora a qualidade ambiental.
Stern (2000)	16 países da Europa Ocidental	1960-1990	Emissões de SO <sub>2</sub> ,	Painel de dados com dependência espacial	Tendência de tempo	\$8.195	As estimativas dos parâmetros auto-regressivos para os resíduos mostraram que é uma variável integrada e, conseqüentemente, o modelo não cointegra.

Fonte: Elaboração dos autores.

Assim, o objetivo deste artigo é contribuir para a literatura CKA fornecendo um modelo econométrico mais sofisticado, levando em consideração: as propriedades estatísticas do modelo, a importância das dimensões espaciais em medidas ambientais e, a expansão dos determinantes da poluição. As relações espaciais são muito importantes nas CKA's porque as emissões per capita dos países são afetadas por eventos ocorridos em países vizinhos. As muitas fontes dessa relação espacial são discutidas em Maddison (2006).

O presente estudo avança principalmente na discussão sobre a CKA em quatro aspectos. Em primeiro lugar, na revisão da literatura realizada não se encontrou um trabalho empírico de CKA com CO<sub>2</sub>, como indicador de degradação ambiental, controlando-se para efeitos espaciais. Em segundo lugar, pode-se salientar que nenhum estudo *cross-section* anterior apresentou esse tamanho amostral. Em terceiro lugar, a análise é aplicada para um ano recente (2004). E por fim, uma variável adicional é inserida na análise para investigar se um país que ratificou o Protocolo de Kyoto contribuiu efetivamente ou não para a redução das emissões.

Os resultados encontrados sugerem que existe uma relação CKA, porém em altos níveis de renda, este processo se reverte, e a poluição volta a aumentar. Além disso, existem evidências que os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto diminuíram suas emissões de CO<sub>2</sub> per capita.

Além desta introdução, este trabalho está organizado em outras quatro seções. A segunda seção descreve o método econométrico adotado para a estimação da CKA e a terceira apresenta o procedimento de preparação dos dados. Os resultados são analisados, interpretados e discutidos na quarta seção. Enfim, na última seção, tem-se a conclusão.

## 2. Especificação do Modelo

A especificação do modelo foi baseada em estudos anteriores da CKA que utilizaram algumas medidas de emissões de poluentes como variáveis dependentes, e o PIB per capita e o seu quadrado como as mais importantes variáveis explicativas. Neste trabalho, porém, somente uma medida de emissão será considerada, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), por ser o principal responsável pelo “efeito estufa” e, conseqüentemente, do fenômeno do aquecimento global.

Limitou-se a análise para examinar se relações espaciais existem para uma CKA com a existência de dados para o ano de 2004. Expandiram-se os determinantes das emissões de CO<sub>2</sub>, introduzindo duas variáveis explanatórias adicionais, ou seja, as exportações per capita e o consumo de energia per capita. Além destas, uma variável *dummy* também foi adicionada à regressão, assumindo o valor “um” para os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto, e “zero” caso contrário.

A forma funcional<sup>7</sup> do modelo de erro espacial apresenta a seguinte forma:

$$CO2_i = \beta_0 + \rho W_1 CO2_i + \beta_1 GDP_i + \beta_2 GDP2_i + \beta_3 GDP3_i + \beta_4 ENG_i + \beta_5 EXP_i + \beta_6 Kyoto_i + u_i \quad (1.a)$$

$$u_i = \lambda W_2 u_i + \varepsilon_i \quad (1.b)$$

na qual  $CO2_i$  representa as emissões de dióxido de carbono per capita no país  $i$ ;  $W_1 CO2_i$  é a defasagem espacial da variável dependente;  $GDP_i$  é o símbolo para o PIB per capita no país  $i$ ;  $GDP2_i$  é o quadrado da variável  $GDP_i$ ;  $ENG_i$  representa o consumo de energia per capita do país  $i$ ;  $EXP_i$  são as exportações per capita no país  $i$ ;  $Kyoto$  é uma variável *dummy* para os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto.  $W_1$  e  $W_2$  são matrizes de pesos espaciais, que tentam capturar a estrutura de dependência espacial. O termo de erro  $\varepsilon_i$  tem média zero e variância constante. As letras gregas são os parâmetros a serem estimados.

<sup>7</sup> Será estimada também, uma forma funcional cúbica do PIB *per capita*.

Se algumas restrições forem colocadas sobre a equação (1), têm-se alguns modelos econométricos espaciais, os quais consideram a autocorrelação espacial. Se  $\lambda = 0$  e  $\rho \neq 0$ , tem-se o modelo de defasagem espacial. Esse tipo de modelo representa os efeitos dos transbordamentos da degradação ambiental. Nesse caso, quando a variável dependente defasada espacialmente, que possui uma natureza endógena, é ignorada, os estimadores MQO serão viesados e inconsistentes. Para se evitar tais problemas, recomendam-se alguns métodos de estimação alternativos, como o uso de Variáveis Instrumentais (VI) e o método de máxima verossimilhança.

Se  $\rho = 0$  e  $\lambda \neq 0$ , o modelo de erro espacial é obtido. Tal modelo é mais apropriado quando existem fatores não modelados que se manifestam nos resíduos. Segundo Rey e Montouri (1999), se  $\lambda \neq 0$ , um choque ocorrido em uma unidade geográfica se espalha não só para seus vizinhos imediatos, mas por todas as outras unidades.

Para que a equação (1) se caracterize como um processo espacial nos termos de erro, os coeficientes apresentados devem seguir uma série de restrições. A literatura sobre o tema considera a dependência espacial nos erros uma espécie de ruído branco. Isso se dá pelo fato de que o termo de erro refletiria apenas o impacto de uma autocorrelação presente em processos com erros de medida ou em variáveis irrelevantes e, portanto, ausentes do modelo. Seria um fenômeno importante, porém de menor relevância do que o encontrado para o modelo espacial em que uma das variáveis independentes é a defasagem espacial da variável dependente.

O modelo irrestrito é um modelo que apresenta defasagem espacial e erro espacial.<sup>8</sup>

Para que a hipótese CKA na forma de um U invertido seja válida, o coeficiente  $\beta_1$  precisa ser positivo e significativo, ao passo que o coeficiente estimado  $\beta_2$  precisa ter o sinal negativo e significativo e o coeficiente  $\beta_3$  não ser significativamente diferente de zero. Se  $\beta_3$  for significativo e tiver o sinal positivo, isso representaria evidências de que a CKA possui a forma de N.

Teoricamente, as emissões de CO<sub>2</sub> devem aumentar quando o consumo de energia em um país também aumenta, por isso espera-se que o sinal de  $\beta_4$  seja positivo. No caso das exportações, como destaca Stern (1996), a mudança dos padrões internacionais de qualidade ambiental e mudanças estruturais dentro das economias levará os países a se especializarem em atividades que usam menos recursos naturais e energia, assim espera-se que o sinal de  $\beta_5$  seja negativo. E, por fim, como os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto se comprometeram a reduzir suas emissões em 5,2% até 2012, o coeficiente esperado para esta *dummy* também é negativo.

### 3. Dados

A amostra contém 187 dados *cross-section* para o ano de 2004. A variável dependente são as emissões de CO<sub>2</sub> per capita (em toneladas métricas). A escolha dessa variável como indicador de degradação ambiental se justifica porque esse poluente é o principal componente causador do “efeito estufa” e aquecimento global. A razão da escolha do indicador em “emissões” e não “concentração” é porque as emissões estão ligadas a níveis correntes de atividade econômica, então, elas medem o potencial para a atividade econômica de danificar o meio ambiente e/ou a saúde humana (KAUFMANN *et al*, 1998). Os dados são da Divisão de Estatísticas das Nações Unidas (*United Nations Statistics Division - UNSD*), o qual reúne informações de outras duas fontes, o CDIAC (*Carbon Dioxide Information Analysis Center*) e o MDG (*Millennium Development Goals*).

A principal variável explicativa, o PIB per capita, está medido em dólares a preços correntes e foi obtida das estimativas das Nações Unidas. Segundo Stern *et al* (1996) e Panayotou (1993), em altos níveis de crescimento econômico mudanças estruturais em direção às indústrias e serviços que são intensivas em informação, juntamente com uma maior conscientização e crescente regulamentação ambiental, maiores gastos ambientais e melhores tecnologias, resultam em um gradual declínio da degradação do meio ambiente. Portanto, essa variável tem como objetivo comprovar se existe a relação na forma de “U” invertido para a CKA global.

<sup>8</sup> Para mais informações sobre modelos espaciais, veja Anselin (1988) e Anselin e Bera (1998).

Os dados para a população foram extraídos das projeções anuais e estimativas da Divisão de População das Nações Unidas. O consumo de energia (em milhares de toneladas de petróleo equivalente) foi retirado da UNSD. Se a energia é usada em todos os lugares, e a maioria das formas de sua utilização liberam poluentes, seria necessário adicionar uma *proxy* para avaliar a relação entre energia e índices de degradação ambiental (AGRAS e CHAPMAN, 1999). Também, porque as emissões de CO<sub>2</sub> aumentam devido ao uso de combustíveis (energia) fósseis, o objetivo dessa variável é mostrar que o aumento do consumo de energia aumenta a quantidade de carbono emitida.

As exportações (em milhões de dólares F.O.B.) foram extraídas do FMI (*International Monetary Fund* – IMF). Segundo Stern *et al* (1996), grande parte da redução da razão energia/PIB nas economias individuais através do tempo, e as variações internacionais da razão energia/PIB, são devidas às mudanças estruturais dentro das economias e às diferenças estruturais entre elas. Ele afirma ainda, que a “suposição de que mudanças nas relações de comércio associadas com o desenvolvimento não tem efeito sobre a qualidade ambiental”, limita muito as conclusões alcançadas pelas análises CKA. Portanto, o objetivo desta variável é mostrar que quanto maior for a abertura comercial dos países, menor será a degradação ambiental na forma de emissões de CO<sub>2</sub>.

O Quadro 2 apresenta um resumo da descrição de todas as variáveis usadas no presente trabalho para a estimação de uma CKA global. E a Tabela 1 apresenta algumas estatísticas descritivas do conjunto de dados.

**Quadro 2 – Descrição das Variáveis**

Variável	Descrição	Sinal Esperado	Referencial Empírico	Fonte
$CO2_i$	Razão das emissões totais de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) de um país pela sua população		Agras e Chapman (1998), Cole <i>et al</i> (1997), Dijkgraaf (2001)	UNSD, CDIAC e MDG
$GDP_i$	Razão do Produto Interno Bruto de cada país pela sua população	+	Grossman e Krueger (1991), Selden e Song (1994), Kaufmann <i>et al</i> (1998)	Nações Unidas (UN)
$GDP2_i$	O quadrado da variável $GDP_i$	-	Grossman e Krueger (1991), Selden e Song (1994), Kaufmann <i>et al</i> (1998)	Nações Unidas (UN)
$GDP3_i$	A variável $GDP_i$ elevada ao cubo	*	Grossman e Krueger (1991), Moomaw e Unruh (1997), Maddison (2005)	Nações Unidas (UN)
$EXP_i$	Razão das exportações de cada país dividido pela população	-	Agras e Chapman (1998), Kaufmann <i>et al</i> (1998)	Fundo Monetário Internacional - IMF
$ENG_i$	Razão do consumo de energia medido em mil toneladas equivalentes de petróleo pela população	+	Cole <i>et al</i> (1997)	UNSD
<i>Kyoto</i>	Assume valor “1” para os países que a ratificaram o Protocolo de Kyoto e “0 (zero)”, caso contrário	-		IEA <sup>9</sup>

Nota: \* Espera-se que a variável  $GDP3_i$  apresente um coeficiente nulo, o que corroboraria a hipótese de um formato de “U” invertido da CKA, porém os estudos que incorporaram esta variável encontraram um coeficiente com sinal positivo, indicando que a CKA apresenta uma forma de “N”.

<sup>9</sup> IEA – Instituto de Economia Agrícola

**Tabela 1. Descrição do Conjunto de Dados**

Variável	Média	Desvio-Padrão	Máximo	Mínimo	Coefficiente de Variação
CO <sub>2</sub>	5.413	7.997	69.221*	0.013**	147%
GDP	9153.160	14062.268	73189.000	94.000	154%
ENG	1.933	3.153	29.082	0.004	163%
EXP	3573.528	8231.980	72219.802	6.326	230%

Fonte: Elaboração dos Autores.

Notas: \* O valor máximo foi encontrado para o Qatar; \*\* O valor mínimo foi encontrado para o Chad.

As estatísticas  $I$  de Moran,  $c$  de Geary e  $G$  de Getis-Ord fornecem uma indicação do grau de autocorrelação espacial. Contudo, para implementar esses indicadores é necessário escolher uma matriz de pesos espaciais  $W$ . Na literatura, existem muitos exemplos desses tipos matrizes. Com a finalidade de reduzir o problema de “ilhas”<sup>10</sup>, foi utilizada neste trabalho a matriz  $W$  baseada na idéia dos  $k$  vizinhos mais próximos,  $w_{ij}(k)$ . Para tornar a escolha do valor de  $k$  menos arbitrária, o procedimento de Baumont (2004) foi adotado. Por fim, definiu-se  $k = 2$ , pois este gerou o mais alto valor  $I$  de Moran.

As estatísticas  $I$ ,  $c$ , e  $G$  são reportadas na Tabela 2.

**Tabela 2. Indicadores de Autocorrelação Espacial**

Indicador	Coefficiente	Média	Desvio-Padrão	z-valor	P-valor
$I$ de Moran	0.624	-0.005	0.066	9.532	0.000
$c$ de Geary	0.626	1.000	0.072	-5.192	0.000
$G$ de Getis-Ord	0.0269	0.011	0.002	9.961	0.000

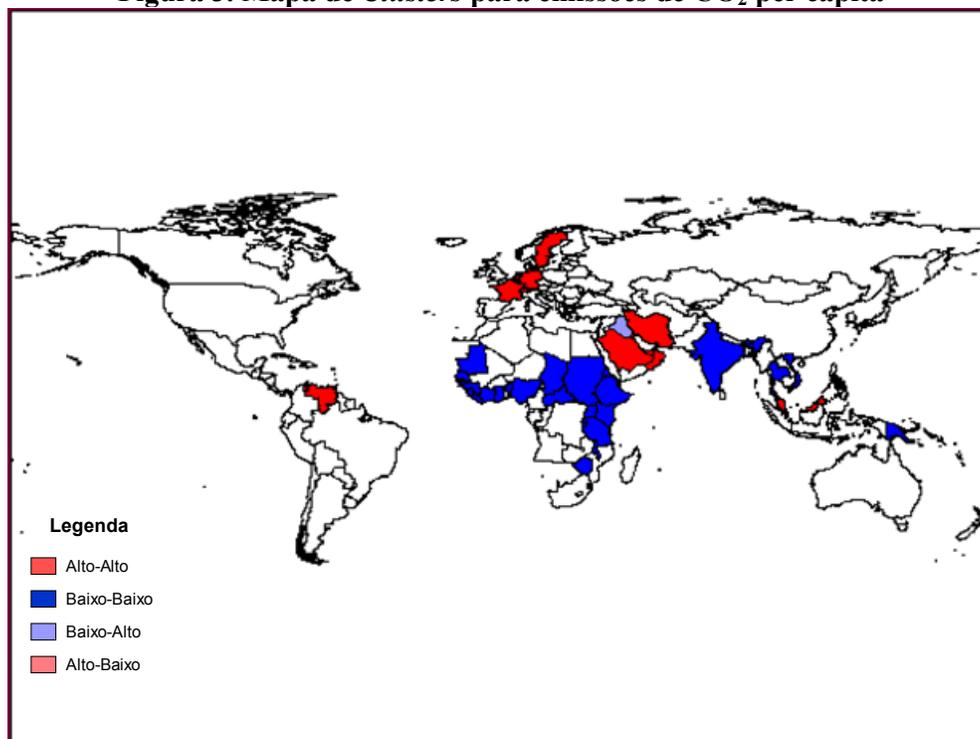
Fonte: Elaboração dos autores baseado no programa SpaceStat.

Por meio desses três indicadores de autocorrelação espacial, podemos rejeitar a hipótese de distribuição aleatória espacial das emissões de CO<sub>2</sub> per capita no mundo. Todos os coeficientes são altamente significativos e indicam uma autocorrelação positiva, sugerindo a existência de concentração de emissões de CO<sub>2</sub> per capita através do espaço. Quando as estatísticas  $I$  e  $c$  indicam autocorrelação positiva (concentração) significa que países com elevadas emissões per capita estão rodeados de países também com altas emissões per capita e/ou países com baixas emissões per capita são rodeados por países que também apresentam baixas emissões. Porém, o valor de  $G$  é positivo, indicando que essa concentração espacial é baseada no seguinte fato: países com elevadas emissões per capita são rodeados de países com altas emissões per capita. Portanto, a estatística  $G$  refina a informação sobre a concentração espacial fornecida pelos indicadores  $I$  e  $c$ .

Pode-se adotar também uma versão local do  $I$  de Moran<sup>11</sup> para indicar os *clusters* espaciais Alto-Alto (AA), Baixo-Baixo (BB), Alto-Baixo (AB) e Baixo-Alto (BA). Na Figura 3, observa-se que existem alguns *clusters* Alto-Alto na Europa (Alemanha, Suíça, França, Holanda), outros *clusters* Alto-Alto no Oriente Médio (Arábia Saudita, Omã, Irã, Emirados Árabes), um *cluster* Alto-Alto na América do Sul (na verdade, composto de somente um país, a Venezuela), um *cluster* Alto-Alto no Sudeste da Ásia (Malásia). Por outro lado, os *clusters* Baixo-Baixo se concentram na África (Chad, África Central, Eritreia, Etiópia, Guiné, Costa do Marfim, Quênia, Libéria, Malawi, Mauritânia, Moçambique, Nigéria, Senegal, Serra Leoa, Sudã, Togo, Tanzânia, Uganda, Burkina Faso), Índia e Sudeste da Ásia (Tailândia e Vietnã). Baseado nesses resultados exploratórios, não é possível verificar a hipótese da CKA. É necessário ir adiante à direção à abordagem econométrica espacial para extrair informações mais úteis.

<sup>10</sup> São chamadas “ilhas” aquelas regiões que não possuem fronteira geográfica com nenhuma outra localidade.

<sup>11</sup> Para informações técnicas sobre o  $I$  de Moran local, veja Anselin (1995).

**Figura 3. Mapa de Clusters para emissões de CO<sub>2</sub> per capita**

Fonte: Elaboração dos autores com base no programa GeoDa

#### 4. Resultados e Discussão

Inicialmente estimou-se uma regressão contra o PIB per capita, seu valor ao quadrado e as outras variáveis explanatórias pelo método do MQO, sem considerar a correção espacial. A Tabela 3 reporta esses resultados.

**Tabela 3. Curva de Kuznets Ambiental (CKA): Resultados da Regressão por MQO**

Variáveis	Coefficiente	Prob.	
Constante	0.3451	0.08	
Renda Per Capita (GPD)	0.000149	0.00	
Renda Per Capita ao Quadrado (GPD2)	-1.839E-09	0.00	
Consumo de Energia Per Capita (ENG)	2.2678	0.00	
Exportações Per Capita (EXP)	5.156E-05	0.00	
Protocolo de Kyoto (KYOTO)	-2.0144	0.00	
$R^2$	0.94		
Número de Condição de Multicolinearidade	10.02	-	
Estatística Jarque-Bera	1,691.28	0.00	
Teste Koenker-Basset	0.2	0.65	
Matriz de Pesos Espaciais	Teste	Coefficiente	Prob.
	LM (error)	7.3712	0.01
	LM Robusto (error)	8.6179	0.00
2-vizinhos mais próximos	LM (lag)	0.2086	0.64
	LM Robusto (lag)	1.4553	0.23
	LM (SARMA)	8.8264	0.01

Fonte: Elaboração dos autores com base no programa SpaceStat

O ajuste do modelo é extremamente elevado, medido pelo  $R^2$  (0,94). Isso significa que 94% da variação da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes colocadas do lado direito da regressão. Todos os valores dos coeficientes estimados revelam-se significativos no nível de 1%, com exceção da constante que é significativa apenas no nível de 10%. Os coeficientes para GPD e GPD2 corroboram as hipóteses CKA. Os outros coeficientes estão de acordo com a expectativa teórica, exceto o coeficiente para as exportações per capita. Em contraste, seu coeficiente apresentou-se positivo, sugerindo que existe uma relação positiva entre comércio internacional e emissões de  $CO_2$ .

Quanto aos diagnósticos da regressão, pode-se observar que o teste Jarque-Bera indica a presença de não normalidade, ao passo que o teste Koenker-Basset confirma que os resíduos da regressão são homocedásticos. A Tabela 3 também apresenta os testes para determinar se a dependência espacial está presente na regressão.

Os testes para dependência espacial sugerem que a inferência baseada em uma especificação não espacial é inválida para os dados de emissões de  $CO_2$  para o conjunto de 187 países da amostra. Seguindo o procedimento de especificação proposto por Florax *et al* (2003), o valor do teste de ML (Multiplicador de Lagrange) indica o modelo de erro espacial como o mais confiável. Sem considerar a autocorrelação espacial, as estimativas por MQO geram estimativas de parâmetros ineficientes porque seus desvios-padrão serão enviesados.

A Tabela 4 apresenta os resultados da estimação considerando a autocorrelação espacial em um modelo de erro, como foi sugerido pelos testes realizados acima.

**Tabela 4. Curva de Kuznets Ambiental (CKA): estimação do modelo de erro espacial pelo Método Generalizado dos Momentos**

Variáveis	Coefficiente	Prob.
Constante	0.3505	0.03
Renda Per Capita (GPD)	0.000148	0.00
Renda Per Capita ao Quadrado (GPD2)	-2.049E-09	0.00
Consumo de Energia Per Capita (ENG)	2.3000	0.00
Exportações Per Capita (EXP)	4.402E-05	0.02
Protocolo de Kyoto (KYOTO)	-1.8412	0.00
Lambda	-0.1727	0.00
$R^2$		0.95
Ponto de Inflexão		\$36,117

Fonte: elaboração dos autores com base no programa SpaceStat.

Como os erros não são normais, o método de estimação utilizado foi o Método Generalizado dos Momentos proposto por Kelejian e Prucha (1999). Os resultados da regressão sugerem que existe uma relação na forma de U invertido na função CKA, isto é, as emissões de  $CO_2$  per capita primeiro aumentam quando a renda aumenta, porém somente até certo ponto. Após esse ponto, o aumento da renda per capita provoca a redução das emissões.

O ponto de inflexão encontrado foi de \$36.117, muito maior do que os valores obtidos nos estudos descritos anteriormente. Talvez, uma razão para esse valor do ponto de inflexão ter sido tão elevado seja o fato de se ter estimado um modelo espacial da CKA para as emissões de  $CO_2$  per capita. Porém, esse ponto está próximo ao valor encontrado por Holtz-Eakin e Selden (1995) de \$32.428 para emissões de  $CO_2$ . De modo similar, Rupasinga *et al* (2004) encontraram que para todos os poluentes estimados em seu estudo, os pontos de inflexão da CKA ocorreram em altos níveis de renda em modelos espaciais, ao contrário do que aconteceu nos modelos não espaciais.

As variáveis GPD e GPD2 apresentaram os sinais esperados e são significativas ao nível de 1%. O coeficiente para ENG é positivo e significativo também ao nível de 1%, indicando que as emissões de  $CO_2$  per capita aumentam quando consumo de energia per capita se eleva. O coeficiente para a

variável EXP, mais uma vez, não apresentou o sinal esperado, sugerindo que as exportações crescentes dos países aumentam as emissões. Porém, esse coeficiente foi significativo somente ao nível de 5%. A razão para este coeficiente ter apresentado sinal positivo, em contraste com a expectativa teórica, se situa no fato de que os países em desenvolvimento exportam bens intensivos em energia e recursos naturais, podendo ter exercido uma maior influência na regressão.

A ratificação dos países no Protocolo de Kyoto parece reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> per capita, sendo que seu efeito negativo é altamente significativo. Isso parece indicar que os países que ratificaram o Protocolo estão providenciando ações de redução de emissões (aproximadamente, menos 1,84 toneladas métricas de carbono), e assim cumprindo o compromisso.

O coeficiente de  $\lambda$  apresentou-se negativo e altamente significativo, indicando que a dependência espacial no erro foi corrigida, e isto aumenta a eficiência dos estimadores.

Finalmente, estimou-se mais uma forma funcional do modelo que incluiu um termo cúbico no PIB per capita (GPD3) para verificar se as emissões continuam decrescendo com o crescimento cada vez maior da renda. Os resultados podem ser vistos na tabela 5.

**Tabela 5. Curva de Kuznets Ambiental (CKA): estimação do modelo de erro espacial pelo Método Generalizado dos Momentos**

Variáveis	Coeficiente	Prob.
Constante	0.0932	0.62
Renda Per Capita (GPD)	0.000286	0.00
Renda Per Capita ao Quadrado (GPD2)	-8.46E-05	0.00
Renda Per Capita ao Cubo (PIB3)	6.855E-14	0.00
Consumo de Energia Per Capita (ENG)	2.2753	0.00
Exportações Per Capita (EXP)	4.542E-05	0.02
Protocolo de Kyoto (KYOTO)	-1.8105	0.00
Lambda	-0.1565	0.00
	R <sup>2</sup>	0.95
	Ponto de Inflexão	\$16,912

Fonte: Elaboração dos autores com base no programa SpaceStat

O coeficiente para o termo cúbico do PIB é positivo e significativo, isto quer dizer que os resultados da Tabela 5 sugerem que o efeito na diminuição das emissões quando a renda está crescendo é transitório, pois quando ocorrem aumentos adicionais na renda per capita, as emissões de CO<sub>2</sub> voltam a aumentar. Esse resultado – a CKA no formato de N – corrobora as conclusões do trabalho de Grossman e Krueger (1991).

Quando se incorporou o termo cúbico na regressão, o ponto de inflexão encontrado foi de \$16.912, bem menor do que aquele obtido com uma especificação quadrática da CKA. Esse valor está próximo ao encontrado por Dijkgraaf e Vollebergh (2001).

No modelo de erro espacial, o coeficiente da *dummy* para o Protocolo de Kyoto possui sinal negativo e altamente significativo, indicando que, em média, os países que ratificaram o Protocolo apresentaram uma redução de suas emissões em 1,81 toneladas métricas de carbono.

## 5. Considerações Finais

Este estudo analisou a relação entre a renda per capita e as emissões de CO<sub>2</sub> per capita em uma amostra de 187 países para o ano de 2004. A variável dependente foi regredida contra o PIB per capita, o PIB per capita ao quadrado, as exportações per capita como *proxy* do comércio internacional, o consumo de energia per capita e uma *dummy* para indicar os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto. Adicionalmente, um termo cúbico no PIB per capita foi incluído na forma funcional da regressão.

Uma abordagem econométrica espacial foi aplicada para verificar as hipóteses CKA. Por melhorar os resultados da regressão, e com base nos testes ML, a incorporação da dependência espacial na forma de erro foi adotada. Portanto, como os testes indicaram um modelo de erro espacial como mais adequado, as estimativas por MQO produzem parâmetros ineficientes e os desvios-padrão serão enviesados. Então, o modelo espacial estimado passa a ser eficiente.

A hipótese da Curva de Kuznets Ambiental sugere inicialmente que a poluição segue uma trajetória na forma de “U” invertido, ou seja, que os indicadores de degradação ambiental aumentam com o crescimento da renda até atingir um nível no qual o crescimento desta passar a reduzir estes indicadores.

Ao estender o modelo incluindo uma forma cúbica do termo PIB per capita, contudo, encontrou-se que o aumento contínuo da renda não garante o melhoramento contínuo do meio ambiente, e que a relação da CKA em relação às emissões de CO<sub>2</sub> é apenas temporária. Pode-se concluir que a relação entre a renda e redução de emissões não é automática e por meio disso surgem possibilidades para a formulação de políticas públicas e acordos internacionais como forma de promover a melhoria ambiental, assim como sugerem Grossman e Krueger (1995) e Stern (2004) em seus trabalhos. Contudo, não é objetivo deste trabalho discutir quais medidas de políticas deveriam ser implementadas.

Uma das principais descobertas deste artigo foi que a inclusão da variável *dummy* apresentou um coeficiente altamente significativo, sugerindo que aqueles países que ratificaram o Protocolo de Kyoto reduziram suas emissões de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 1,81 toneladas métricas de carbono, *ceteris paribus*.

Com um formato de N para a CKA, aumenta a importância de políticas públicas globais que procuram obter a adesão de todos os países no esforço de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, mesmo que o ônus desse esforço não seja distribuído igualmente entre os países. O fato da CKA ser crescente em níveis elevados de renda é uma outra razão para que os países desenvolvidos que ainda não ratificaram o Protocolo, o façam, pois isso tem um impacto eficaz sobre a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e sobre o combate ao aquecimento global.

Trabalhos futuros usando técnicas econométricas mais sofisticadas (por exemplo, métodos de painel de dados espacial) podem contribuir para verificar a existência de uma Curva de Kuznets Ambiental global. Outra recomendação seria investigar melhor o papel do comércio internacional na determinação das emissões de CO<sub>2</sub>, haja vista que esta questão tem sido pouco explorada nos trabalhos empíricos.

## 6. Referências

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

ANSELIN, L. **Spatial Econometrics: methods and models**. Kluwer Academic, Boston, 1988.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association – LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.

ANSELIN, L.; BERA, A. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. In: Ullah A. and Giles D. E. (eds.) **Handbook of Applied Economic Statistics**, Marcel Dekker, New York, pp. 237-289, 1998.

ARRAES, R. A.; DINIZ, M. B.; DINIZ, M. J. T. Curva ambiental de Kuznets e desenvolvimento econômico sustentável. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, vol. 44, n. 3, p. 525-547, 2006.

BECKERMAN, W. Economic Growth and the Environment: Whose Growth? Whose Environment? **World Development**, Oxford, vol. 20, n. 4, p. 481-496, 1992.

BAUMONT, C. **Spatial Effects in Housing Price Models: do house prices capitalize urban development policies in the agglomeration Dijon (1999)?** IN: Regional Group Seminar of the Federal Reserve Bank of Chicago, 2003, Chicago. Disponível em: < <http://ungaro.u-bourgogne.fr/baumont/e2004-04.pdf> > Acesso em 4 de jan. de 2008.

- COLE, M. A.; RAYNER, A. J.; BATES, J. M. The environmental Kuznets curve: an empirical analysis. **Environment and Development Economics**, Nottingham, vol. 2, p. 401-416, 1997.
- COLE, M. A. Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. **Ecological Economics**, Birmingham, v. 48, p. 71 – 81, 2004.
- DEACON, R.; NORMAN, C. S. Is the Environmental Kuznets Curve an empirical regularity? **eScholarship Repository**, University of California, Santa Barbara, 2004.
- 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**, Amsterdam, vol. 25, p. 161-175, 1998.
- DIJKGRAAF, E.; VOLLEBERGH, H. R. J. A Note on Testing for Environmental Kuznets Curves. **Environmental Policy**, OCFEB Research Memorandum 0103, 2001.
- FLORAX, R. J. G. M.; FOLMER, H.; REY, S. J. Specification Searches in Spatial Econometrics: The Relevance of Hendry's Methodology. **Regional Science and Urban Economics**, vol. 33, n. 5, p. 557-579, 2003.
- FONSECA, L. N.; RIBEIRO, E., P. Preservação Ambiental e Crescimento Econômico no Brasil. In: VII ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL, 2004. **Preservação Ambiental e Crescimento Econômico no Brasil**. Rio Grande do Sul, 2004.
- GALEOTTI, M.; LANZA, A. Richer and Cleaner? A study on Carbon Dioxide Emissions in Developing Countries. In: 22nd IAEE Annual International Conference, 1999. **Richer and Cleaner? A study on Carbon Dioxide Emissions in Developing Countries**. Roma, 1999.
- GROSSMAN, G., KRUEGER, A. Economic Growth and the Environment. **Quarterly Journal of Economics**, Massachusetts, vol. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.
- GROSSMAN, G., KRUEGER, A. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement, **National Bureau of Economic Research Working Paper 3914**, NBER, Cambridge, MA, 1991.
- HALKOS, G. E. Environmental Kuznets Curve for Sulfur: evidence using GMM estimation and random coefficient panel data models. **Environment and Development Economics**, Volos, vol. 8, p. 581-601, 2003.
- HICKS, J. R. **The Theory of Wages**. Macmillan, London, 1932.
- HOLTZ-EAKIN, D.; SELDEN, T. M. Stocking the fire? CO<sub>2</sub> emissions and economic growth. **Journal of Public Economics**, vol. 57, p. 85-101, 1995.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). São Paulo, Brasil. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/OUT/verTexto.php?codTexto=1574>> Acesso em: 15 de mar. 2008.
- KAUFMANN, R. K.; DAVIDSDOTTIR, B.; GARNHAM, S.; PAULY, P. The determinants of atmospheric SO<sub>2</sub> concentrations: reconsidering the environmental Kuznets curve. **Ecological Economics**, Toronto, vol. 25, p. 209-220, 1998.
- KELEJIAN, H. H.; PRUCHA, I. R. A Generalized moments estimator for the autoregressive parameter in a spatial model. **Internacional Economic Review**, vol. 40, n.2, 1999.
- KUZNETS, S. **Teoria do Crescimento Econômico Moderno**; taxa, estrutura e difusão. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 1966. 279p.
- LUCENA, A. F. P. **Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental Aplicada ao Uso de Energia e suas Implicações para As Emissões de Carbono no Brasil**. 2005. 132f. Unpublished Master Thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MADDISON, D. Environmental Kuznets Curves: A spatial econometric approach. **Journal of Environmental Economics and Management**, London, vol. 51, p. 218-230, 2006.

- MOOMAW, W. R.; UNRUH, G. C. Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO<sub>2</sub> emissions. **Environment and Development**, Medfort, vol. 2, p. 451-463, 1997.
- PANAYOTOU, T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development, **Working Paper WP238**, Technology and Employment Programme (Geneva: International Labor Office), 1993.
- PERMAN, R.; STERN, D. I. Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist. **The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, vol 47, n. 3, p. 325-347, 2003.
- POON, J. P. H; CASAS, I.; HE, C. The impact of energy, transport and trade on air pollution in China. **Eurasian Geography and Economics**, New York, vol. 47, p. 568-584, 2006.
- REY, J. S; MONTOURI, B. D. US Regional Income Convergence: a spatial econometric perspective. **Regional Studies**, vol.33, n. 2, p. 143-556, 1999.
- RUPASINGHA, A.; GOETZ, S. J.; DEBERTIN, D. L.; PAGOULATOS, A. The Environmental Kuznets Curve for US counties: A spatial econometric analysis with extensions. **Regional Science**, vol. 83, p. 407-424, 2004.
- 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, vol. 27, n.2, p.147-162, 1994.
- SHAFIK, N., BANDYOPADHYAY, S. Economic Growth and Environmental Quality: a time series and cross-country evidence. **Journal of Environmental Economics and Management**. vol. 4, p.1-24, 1992.
- STERN, D. I; COMMON, M. S; BARBIER, E. B. Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development. **World Development**, vol. 24, n. 7, p. 1151-1160, 1996.
- STERN, D. I.; COMMON, M. S. Is the environmental Kuznets curve for sulfur? **Journal of Environmental Economics and Management**, Canberra, vol. 41, n.2, p 162-178, 2001.
- STERN, D. I. Applying Recent Developments in Time Series Econometrics to the Spatial Domain. **Blackwell Publishers**, Oxford, vol. 52, n. 1, p. 37-49, 2000.
- STERN, D. I. Explaining changes in global sulfur emissions: an econometric decomposition approach. **Ecological Economics**, Canberra, vol. 42, n. 1/2, p. 201-220, 2002.
- STERN, D.I. The Rise and the Fall of the Environmental Kuznets Curve. **World Development**, Troy, vol. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.
- STERN, D. I. Global sulfur emissions from 1850 to 2000. **Chemosphere**, Troy, vol. 58, p. 163-175, 2005.
- STERN, D. I. Progress on the environmental Kuznets curve? **Environmental and Development Economics**, Canberra, vol. 3, n. 2, p. 173-196, 1998.
- TORRAS, M.; BOYCE, J. K. Income, inequality and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve. **Ecological Economics**, Amherst, vol. 25, p. 147-170, 1998.
- UNITED NATIONS (UN). New York, United States of America. Disponível em: <<http://www.un.org>> Acesso em 15 de dez. de 2007.
- UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION (UNSD). New York, United States of America. Disponível em: <<http://unstats.un.org/unsd/default.htm>> Acesso em 15 de dez. de 2007.
- WCED. **Nosso Futuro Comum**, 1. Ed. Brasileira. Rio de Janeiro: FGV, 1987, 430p.