

Análise da curva ambiental de Kuznets (CAK) dinâmica e da eficiência no controle das emissões

Jamaika Prado
Universidade Federal de Juiz de Fora
(UFJF-GV)

Thiago Costa Soares
Universidade Federal de Juiz de Fora
(UFJF-GV)

Luckas Sabioni Lopes
Universidade Federal de Juiz de Fora
(UFJF-GV)

Resumo: A degradação ambiental tem sido motivo de preocupação entre pesquisadores, governantes e sociedade em geral devido ao aumento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), especialmente do dióxido de carbono (CO₂). Este estudo busca contribuir com o tema, trazendo novas evidências da “curva ambiental de Kuznets”, além da estimação da eficiência das emissões, através de um painel de dados com 80 países entre os anos 1990-2013. Para tanto, foi utilizado o método *Generalized Method of Moments* (GMM), a fim de controlar possíveis problemas de viés e inconsistência da renda e do consumo de energia. Os resultados indicam que o consumo de energia foi fundamental para o aumento das emissões de CO₂, além disso, permanece válida a hipótese da CAK para as emissões, na amostra analisada. Portanto, as políticas de desenvolvimento sustentável devem buscar maior eficiência no consumo de energia, através do desenvolvimento tecnológico capaz de minimizar as emissões.

Palavras-chave: CAK, eficiência, emissões de CO₂, GMM.

Abstract: Environmental degradation has been a cause of concern among researchers, rulers and society in general due to the increase in Greenhouse Gas (GHG) emissions, especially the carbon dioxide (CO₂). This study seeks to contribute with the theme bringing new evidence of the "Kuznets Environmental Curve", in addition to estimating efficiency of the emissions, through a panel of data with 80 countries between the years 1990-2013. For Thus, the Generalized Method of Moments (GMM) was used, a way to control the bias and inconsistency problems in income and energy consumption. The results indicate that energy consumption was fundamental to the increase of CO₂ emissions, Thence, the KEC hypothesis for emissions in the analyzed sample remains valid. There for, policies for stainable development should aim for a better efficiency on the energy consumption via the development of technologies capable of minimize the emissions.

Keywords: KEC, efficiency, CO₂ emissions, GMM.

Classificação JEL: C33, Q50, Q54

Área 11: Economia Agrícola e do Meio Ambiente

1. Introdução

Os efeitos adversos da produção sobre o meio ambiente têm despertado preocupação não somente de acadêmicos e governos, como de toda sociedade. Concretamente, no âmbito global, as mudanças climáticas atuais e as perdas da biodiversidade são frequentemente relacionadas com as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE). Entre os principais GEE, destaca-se o dióxido de carbono (CO₂), cuja participação relativa está em torno de 56,6% (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2013).

A questão ambiental tem motivado diversos pesquisadores a estudar mais profundamente o estreitamento da relação entre produção e emissões. Uma importante linha que se desenvolveu ao longo das últimas décadas é a “curva ambiental de Kuznets - CAK”. Conceitualmente, os estudos dessa área apresentam a hipótese de que as emissões de poluentes *per capita*, apesar de crescentes em estágios iniciais do desenvolvimento, decaem a partir de determinado *threshold* de renda *per capita*.

A ideia foi construída a partir do estudo seminal de Kuznets (1955), que teorizou sobre a relação desigualdade-renda para países. Conforme argumentou o autor, níveis elevados de desigualdade são esperados no processo transitório de economias agrícolas (mais iguais) para industriais (mais desiguais). Essa trajetória, no entanto, modificaria seu curso quando a sociedade atingisse determinado grau de renda *per capita*. Kuznets (1955) afirmou que a principal razão para a inversão seria a crescente demanda por redistribuição de renda da sociedade, entre outras razões.

Estudos conduzidos durante a década de 1990 encontraram evidências empíricas similares para a relação entre diversos poluentes e renda (Grossman; Krueger, 1991; Shafik; Bandyopadhyay, 1992; Panayotou, 1993; Selden; Song, 1994). Por exemplo, Grossman e Krueger (1991) associaram três tipos de poluentes à renda de cidades de vários países, entre 1977-1988. Os autores concluíram que dois, dos três poluentes analisados, apresentaram relação não linear com a renda; Shafik e Bandyopadhyay (1992) e Selden e Song (1994) verificaram que emissões de CO₂ *per capita* e renda *per capita* também tiveram relação de “U-invertido”; Panayotou (1993) encontrou esses resultados para desmatamento, emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂).

O fundamento por trás desse raciocínio é basicamente este: economias nos estágios iniciais do desenvolvimento transitam de padrões produtivos agrícolas relativamente “limpos” para um modelo industrial intensivo em poluentes, período em que as emissões se elevam. No entanto, a trajetória das emissões se modifica (decresce) quando o país atinge determinado grau de afluência, pois a sociedade passa ter maior “conscientização ambiental”. Além disso, mudanças na composição da produção e do consumo, surgimento de leis ambientais, melhorias tecnológicas e a liberação do comércio são outros pontos utilizados para explicar o formato de “U-invertido” da relação emissão-produção (Selden; Song, 1994).

Stern et al. (1996), por outro lado, apresentou ideias que fragilizam os pressupostos empíricos citados, como a existência do efeito *feedback* da poluição para a renda, a limitação dos dados utilizados e a ausência de importantes variáveis no modelo, como o comércio internacional e o consumo de energia. Tais questões, conforme defendem os autores, poderiam tornar as estimativas enviesadas. As pesquisas mais recentes buscam, desde então, testar a validade da CAK na presença de outros termos explicativos (consumo de energia, abertura comercial etc.) com métodos aparentemente mais apropriados (Munhammad et al., 2011; Shabbaz et al., 2012; Tiwari; Muhammad, 2012; Lau; Choong; Eng, 2014; Sugiawan; Managi, 2016; Apergis, 2016; Li; Wang; Zhao, 2016).

Para ilustrar, Tiwari e Muhammad (2012) investigaram a relação dinâmica entre consumo de carvão, crescimento econômico, abertura comercial e emissões de CO₂ para a Índia. Os resultados confirmaram que as emissões de CO₂ tendem a recuar a partir de certo limiar de renda. Além disso, os autores mostraram que consumo de carvão e grau de abertura

comercial contribuíram para as emissões de CO₂. Muhammad et al. (2011) propuseram um modelo CAK para verificar a existência de relações de longo prazo entre políticas de crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂ na Romênia. As principais evidências apontaram para relações tanto de curto, como de longo prazo entre as variáveis. Assim como na pesquisa de Tiwari e Muhammad (2012), Muhammad et al. (2011) verificaram que o consumo de energia ajudou a explicar as emissões no país.

Shahbaz et al. (2012) analisaram a relação emissão-renda para Portugal, incluindo como regressores consumo de energia, urbanização e abertura comercial. Nesse estudo, a hipótese CAK se manteve, porém, nem todas as variáveis foram significativas. Os autores encontraram indicações de que abertura comercial não afetou as emissões de Portugal no período analisado. Em contrapartida, Li, Wang e Zhao (2016), estudando as inter-relações entre desenvolvimento econômico, consumo de energia, abertura comercial e emissões de CO₂ na China, confirmaram que abertura comercial e consumo de energia foram importantes para explicar as emissões do país, que passou a ser o maior poluidor em 2010 (World Bank, 2017). Nessa pesquisa, o formato “U-invertido” se sustentou.

Nos estudos consultados, a validade da CAK para as emissões de CO₂ parece se manter para muitos países. Apesar disso, cabe destacar que nessas pesquisas pressupõe-se que elevações eventuais nos níveis de emissões, não explicadas pela renda e as outras variáveis (consumo energético, abertura do comércio etc.), estão elencadas a choques aleatórios. Não obstante, é crescente o número de pesquisas que atribuem parte desses desvios ao modo no qual os países otimizam suas emissões (Färe et al., 1989; Chung et al., 1997; Färe; Grosskopf, 2004; Färe et al., 2005; Chiu et al., 2012). A partir de então, a concepção de “*desperdício*” e “*controle inadequado das emissões*” passou a fazer parte das análises empíricas sobre o quadro das emissões.

Färe et al. (2005) explicam que características específicas das nações, variantes no tempo, como ineficiência energética, indiligência ambiental e outras, são responsáveis por explicar parcela das emissões antrópicas de poluentes. Essas especificidades não são diretamente observáveis, fazendo parte do termo de erro, assim como as oscilações puramente estocásticas. Entretanto, a constatação inicial da CAK que suporta o formato “U-invertido”, a de que a expansão da renda aumenta tanto a conscientização ambiental como a eficiência técnica ou tecnológica, introduz problemas de ordem prática nas estimações. Por exemplo, se a renda, de fato, se relacionar com a eficiência energética (variável contida no erro), então o modelo, por construção, seria enviesado e inconsistente (Greene, 2002). Além disso, naturalmente consumo de energia e eficiência energética estão correlacionados, o que novamente causaria viés e inconsistência.

Assim, adentrando na discussão que remete às exposições acerca da CAK, este estudo procura avançar em dois sentidos. O primeiro é apresentar novas evidências da “curva ambiental de Kuznets”, utilizando um método para dados em painel (80 países, 1990-2013) mais apropriado para lidar com os problemas estatísticos de viés e inconsistência da renda e do consumo de energia; enquanto o segundo é estimar explicitamente a ineficiência dos países no controle de suas emissões na figura de um indicador. Ambos os tópicos citados não foram discutidos na literatura previamente consultada.

Na sequência, apresentam-se mais quatro seções, além dessa introdução. Na segunda, fundamenta-se a discussão da curva ambiental de Kuznets, por meio de uma revisão de literatura. Na terceira, são apresentados os procedimentos metodológicos do estudo, bem como a descrição dos dados. Os resultados e discussões são reportados na quarta seção. A quinta seção, por fim, dedica-se a apresentar as conclusões da pesquisa.

2. Revisão de literatura

O primeiro estudo a encontrar evidências sobre a Curva Ambiental de Kuznets (CAK) foi realizado por Grossman e Krueger (1991). Utilizando dados de três poluentes em um painel composto por cidades de vários países, entre 1977 e 1988, chegou-se à conclusão de que alguns compostos, como dióxido de enxofre (SO₂) e matéria escura, podem apresentar relação não linear com a renda. Segundo os autores, esses poluentes respondem positivamente ao crescimento da renda per capita até aproximadamente US\$ 10.800¹. A partir desse nível de renda, observou-se declínio das emissões per capita.

Diante desse resultado, muitas pesquisas buscaram examinar a relação empírica entre poluentes e renda, a fim de pôr a prova os achados de Grossman e Krueger (1991). Shafik e Bandyopadhyay (1992), por exemplo, examinaram dez indicadores da qualidade do ar e da água. Entre eles, consideraram-se as emissões de dióxido de carbono (CO₂), poluente que possui maior participação relativa nas emissões totais de gases de efeito estufa (IPCC, 2013). Nessa pesquisa, os autores concluíram que o crescimento da renda poderia reduzir as emissões per capita de CO₂ a partir de US\$ 8.600 per capita.

Em uma amostra de países desenvolvidos e em desenvolvimento, Panayotou (1993) estudou a relação entre renda, desmatamento e emissões de poluentes (NO_x e SO₂). Segundo o autor, houve evidências de pontos de inflexão para as variáveis ambientais. Para o desmatamento, encontraram-se limites próximos a US\$ 2.600 per capita. No caso das emissões, estabeleceram-se bandas de US\$ 6.500 (SO₂) e US\$ 11.900 (NO_x) per capita.

Na mesma linha, Selden e Song (1994) analisaram quatro indicadores de qualidade ambiental em países de diferentes níveis de renda, entre 1973 e 1984. Estimando um modelo de dados em painel, encontraram-se pontos de inflexão próximos a US\$ 13.400 para as emissões per capita de CO₂.

Cabe destacar duas críticas apontadas por Stern et al. (1996) quanto à validade da CAK. Em primeiro lugar, para os autores, o modelo empírico não considerou o possível *feedback* do meio ambiente para o crescimento. Para ilustrar, considere-se o setor agrícola. O uso intensivo dos recursos naturais provenientes da terra pode esgotar seu potencial produtivo e limitar, conseqüentemente, a produção agrícola no futuro. Apesar disso, a confirmação da CAK para o setor pode levar a crer que o problema seria resolvido maximizando a produção per capita, uma opção não sustentável. Do ponto de vista estatístico, a simultaneidade entre problemas ambientais e processo produtivo produz estimativas viesadas e inconsistentes dos parâmetros.

O segundo ponto destacado por Stern et al. (1996) foi a provável influência do comércio internacional. Observando as emissões dos EUA e Japão, eles argumentam que os países desenvolvidos podem ter reduzido suas emissões individuais “exportando-as” para países em desenvolvimento, hipótese conhecida por “*pollution haven*” (Birdsall; Wheeler, 1993). Concretamente, Birdsall e Wheeler (1993), estudando a América Latina, indicaram que o grau de abertura comercial contribuiu para o aumento do número de indústrias “suja” nesses países. Não há muitos precedentes, no entanto, para afirmar que países em desenvolvimento percorrerão a mesma trajetória, aproveitando-se da abertura comercial para novamente “exportar” suas emissões a outras localidades. Veja-se que, havendo relação entre abertura comercial e renda, a omissão dessa variável também causa viés e inconsistência (Greene, 2002).

Para melhorar a robustez das estimativas da CAK, as pesquisas mais recentes buscam testar novas variáveis e métodos para contornar os problemas citados. Muhammad et al. (2012), em seu estudo, relacionou renda e consumo energético com as emissões de poluentes na Romênia (dados de 1980 a 2010). Empregando o método ARDL (*autoregressive*

¹Para poder comparar os pontos de inflexão da renda, considerou-se como base o ano de 2011, a partir do Índice de Preços ao Consumidor dos Estados Unidos (IPC-EUA).

distributed lag), concluiu-se que, além da renda, o consumo de energia ajudou a explicar as emissões nesse país.

Lau, Chong e Eng (2014) estudaram o efeito da renda e do comércio sobre as emissões da Malásia entre 1970 e 2008. Pelo método ARDL, os autores concluíram que a intensidade do comércio piorou a qualidade ambiental da Malásia. Por outro lado, encontraram-se evidências da CAK para esse país.

Estudos similares também foram realizados com dados de Portugal (Shahbaz et al., 2012), Índia (Tiwari; Muhammad, 2012), Indonésia (Sugiawan; Managi, 2016) e de outros países. Na literatura consultada, os resultados parecem sustentar a hipótese CAK para os principais poluentes, como CO₂ e SO₂. No caso dos estudos individuais, no entanto, suas conclusões se limitam à realidade do país estudado. Para obter resultados mais conclusivos, é necessário examinar a trajetória temporal das emissões considerando países desenvolvidos e em desenvolvimento (dados em painel).

Nessa perspectiva, Taguchi (2012) analisaram países asiáticos entre 1950 e 2009, inserindo as emissões defasadas do lado direito da equação estimada. Os autores argumentaram que a inclusão dessa variável diminui problemas de má-especificação em dados temporais, além de tornar possível capturar o ajuste dinâmico do nível de emissões. Vale lembrar que modelos de equações únicas, neste contexto, são enviesados e inconsistentes (Baltagi, 2008). Para lidar com esse problema, Taguchi (2012) usou o método de momentos generalizados (ou, em inglês, *generalized method of moments*, GMM), introduzindo a renda como instrumento. Ressalta-se que não houve nessa pesquisa controle para a endogeneidade da renda. Além disso, os autores não incluíram importantes variáveis no modelo, como consumo de energia e abertura comercial.

Numa pesquisa semelhante, Chakravarty e Mandal (2016) avaliaram a CAK para os países do BRICS, de 1997 a 2011. Nesse estudo, os autores usaram a estrutura dinâmica em painel, através do estimador GMM de Arellano e Bond (1991), considerando o possível *feedback* da renda. Os resultados mostraram que a hipótese da CAK se manteve.

Levanta-se, aqui, um ponto importante em relação aos estudos citados. Por pressuposição, assumem-se que os erros observados na função CAK são choques aleatórios. Há, no entanto, vasta literatura apontando que parte dos desvios não controlados na função CAK são decorrentes da forma de otimizar a produção (Färe et al., 1989; Chung et al., 1997; Färe; Grosskopf, 2004; Färe et al., 2005; Chiu et al., 2012). Tomem-se, como exemplos, Espanha e Canadá. Apesar de possuírem praticamente o mesmo percentual de consumo de combustíveis fósseis na energia total, Canadá emite cerca de três vezes mais que a Espanha, mesmo possuindo o dobro da renda per capita (World Bank, 2017).

Ocorre que características específicas variantes no tempo (desperdício energético, controle inadequado das emissões, etc.) certamente influenciam a quantidade emitida de poluentes. Por isso, o erro da equação da CAK pode ser dividido em choques aleatórios e *eficiência no controle das emissões*. Essa separação é importante para entender melhor os fatores que motivam as emissões antrópicas de poluentes. Além disso, havendo relação entre eficiência das emissões (variável contida no erro), renda e consumo energético, o modelo pode apresentar endogeneidade não somente da produção, como do consumo. Nesse sentido, os parâmetros estimados serão novamente enviesados e inconsistentes (Greene, 2002).

Não foram verificadas na literatura consultada pesquisas que tenham se atentado a todas essas questões. Nesse sentido, a principal contribuição da presente pesquisa foi estimar a função CAK para países desenvolvidos e em desenvolvimento, controlando os possíveis problemas de endogeneidade da renda e do consumo energético. Além disso, procurou-se decompor o erro aleatório, de modo a obter estimativas do indicador de eficiência no controle das emissões numa abordagem de dois estágios. Os procedimentos metodológicos são reportados na próxima seção.

3. Metodologia

3.1. Modelo empírico

Neste estudo, considera-se que as emissões são função de fatores distintos, assim como na formulação clássica da CAK, isto é,

$$CO2pc_{i,t} = f(PIBpc_{i,t}, PIBpc_{i,t}^2, ENepc_{i,t}, ABER_{i,t}), \quad (1)$$

em que $CO2pc_{i,t}$ representa as emissões de CO2 per capita; $PIBpc_{i,t}$, é o produto interno bruto per capita a preços constantes de 2011, pela paridade do poder de compra (PPP); $ENepc_{i,t}$, é o consumo de energia per capita; e $ABER_{i,t}$, o grau de abertura comercial, medido pela soma das exportações e importações, dividida pelo PIB. A amostra contém 80 países ($i = 1, 2, \dots, 80$) ao longo de 24 anos ($t = 1990, 1991, \dots, 2013$), totalizando 1920 observações.

No modelo proposto, espera-se que a relação entre emissões de CO2 e renda, ambas per capita, seja quadrática. A hipótese central da CAK estabelece que a degradação ambiental se intensifica com a transição de atividades agrícolas para as industriais, normalmente mais intensivas em recursos naturais e poluição. Por outro lado, esse processo permite a expansão da renda per capita. Após determinado nível de renda (ponto de inflexão da CAK), o grau de degradação declina por diversas transformações que ocorrem na sociedade, como a melhoria do padrão tecnológico, aumento da conscientização ambiental da população, criação de leis de proteção ao meio ambiente, entre outras. Por essas razões, convencionou-se estimar a equação (1) com o termo quadrático da renda.

O consumo de energia, por sua vez, tem sido associado linear e positivamente ao nível de emissões. Isto porque sua produção deriva-se consideravelmente do uso de combustíveis fósseis, uma das principais fontes de emissões antrópicas. Além dessa variável, inseriu-se a abertura comercial para capturar o efeito do comércio sobre as emissões. Segundo a literatura consultada, a abertura comercial pode ter aumentado as emissões, sobretudo nos países em desenvolvimento, em razão da expansão de atividades intensivas em poluentes. O modelo empírico pode ser escrito da seguinte forma:

$$co_2pc_{i,t} = \alpha_0 + \sum_{t=1990}^{2013} \alpha_t D_t + \beta_1 pibpc_{i,t} + \beta_2 pibpc_{i,t}^2 + \beta_3 enepc_{i,t} + \beta_4 aber_{i,t} + e_{i,t}, \quad (2)$$

$$e_{i,t} = \eta_i + v_{i,t} + u_{i,t}. \quad (3)$$

As letras em minúsculo em (2) representam as variáveis logaritimizadas; α_0 é o intercepto comum; α_t são coeficientes que capturam mudanças comuns às unidades, mas variantes no tempo, como crises econômicas, energéticas, etc.; D_t são *dummies* temporais.

Na especificação (3), o termo $e_{i,t}$ foi dividido em três componentes. O primeiro, η_i , representa características mais rígidas de cada país, como a matriz energética, estrutura produtiva, etc.; $v_{i,t}$ representa a eficiência de cada país no controle das emissões. Trata-se de um indicador que varia no intervalo (0,1]: países que “desperdiçam” emissões possivelmente serão ineficientes e terão indicadores mais próximo a zero; o último componente, $u_{i,t}$, responde pela parcela das emissões que é puramente aleatória.

Na literatura, encontram-se referências que estimaram por mínimos quadrados ordinários (MQO) modelos semelhantes à expressão (2), como Grossman e Krueger (1991), Panayotou (1993), Selden e Song (1994), Taskim e Zaim (2001), entre outros. Tal procedimento, no entanto, pode causar viés e inconsistência nas estimativas. Stern et al.

(1996) pontuou que a renda per capita pode ser endógena na função CAK, pois não se pode descartar teoricamente o possível *feedback* do meio ambiente. Além disso, havendo realmente ineficiência no controle das emissões, é possível que o consumo energético também tenha relação com o erro do modelo. Claramente, países que desperdiçam energia acabam emitindo mais que o necessário (tornam-se ineficientes).

Este estudo procurou avançar controlando adequadamente tais questões. Foram utilizados procedimentos em dois estágios, baseados nos trabalhos de Guanet al. (2009) e Wang e Schmidt (2002). Em resumo, estimam-se consistentemente os parâmetros do modelo (2) por GMM nas diferenças para, em seguida, obter os indicadores de eficiência através de um modelo de fronteira estocástica aplicado em (3).

Ao tomar a primeira diferença em (2), os efeitos específicos não observáveis η_i são eliminados, uma vez que são constantes no tempo. Ademais, para obter estimativas não viesadas e consistentes dos parâmetros, estima-se a equação em diferenças com o método GMM, de modo a considerar a endogeneidade da renda e do consumo energético explicitamente.

Para tanto, é necessário obter m instrumentos, organizados no vetor $\mathbf{M}_{i,t}$, que sejam não correlacionados com o erro composto, isto é, $E[\mathbf{M}_{i,t}\Delta e_{i,t}] = 0$ (condição de ortogonalidade). Tal condição pode ser verificada pela estatística J de Sargan (1988), que testa a validade dos instrumentos contra a hipótese de não adequação.

Verifica-se, além disso, que a confirmação do vetor de instrumentos adequado pode ser realizada por testes de autocorrelação serial de primeira e segunda ordem dos resíduos da equação (2) em diferença (Arellano; Bond, 1991). Note-se que em um modelo em nível, onde os resíduos são independentes, a primeira diferença introduz autocorrelação, pois $\Delta e_{i,t} = e_{i,t} - e_{i,t-1}$; $\Delta e_{i,t-1} = e_{i,t-1} - e_{i,t-2}$. Portanto, $E[\Delta e_{i,t}, \Delta e_{i,t-1}] \neq 0$. Por outro lado, quando o componente AR (2) dessa equação é significativo, a segunda defasagem da variável em nível torna-se um instrumento inapropriado, já que $E[CO2_{i,t-2}\Delta e_{i,t}] \neq 0$. Esses testes foram utilizados para determinar a lista de instrumentos apropriada a este estudo.

Os parâmetros da CAK podem ser identificados diretamente pela aplicação do método GMM em (2) na primeira diferença. Conforme apontado, este procedimento elimina as características específicas invariantes no tempo, mas não permite estimar diretamente o indicador de eficiência no controle das emissões.

Para tanto, ajusta-se na equação (3) o modelo de fronteira estocástica de Wang e Schmidt (2002), o qual torna possível decompor o erro da expressão (2) da seguinte maneira:

$$\hat{e}_{i,t} = f(\eta_i, v_{i,t}) + u_{i,t}, \quad (4a)$$

$$\hat{e}_{i,t} = \phi_t^* + \phi_{i,t} + C_i' \Theta + u_{i,t}, \text{ sendo } \eta_i = C_i' \Theta \text{ e } v_{i,t} = \phi_t^* + \phi_{i,t}. \quad (4b)$$

A variável $\hat{e}_{i,t}$ é o resíduo em nível recuperado da primeira etapa; η_i são características individuais dos países, invariantes no tempo, obtidas por uma matriz C_i' de *dummies* transversais²; ϕ_t^* e Θ são matrizes de parâmetros a serem estimados; $v_{i,t} \geq 0$ representa a ineficiência do i -ésimo país no tempo t ; e, $u_{i,t}$ é a parcela puramente aleatória das emissões. Na expressão (4b), ϕ_t^* é o intercepto da fronteira de possibilidades de produção (FPP) em t . O parâmetro $\phi_{i,t}$ é a ineficiência no controle das emissões individual, que é obtido

² Note-se que as características específicas eliminadas na primeira etapa são reintroduzidas no segundo estágio.

por um algoritmo que minimiza a função $\phi_{i,t} = \min_j \hat{\phi}_{j,t}, \forall j = 1, \dots, N$. Nesse contexto, a FPP representa o nível de emissões de CO2 quando os efeitos das variáveis renda, energia e abertura comercial são controlados, para todo t . Segundo Lee e Schmidt (1993), as distribuições dos componentes $v_{i,t}$ e $u_{i,t}$ possuem as seguintes características:

$$u_{i,t} \sim iid(0, \sigma_u^2) \quad (5a)$$

$$v_{i,t} \sim N^+(0, \sigma_v^2), \text{ com } v_{i,t} = g(t) \cdot v_i. \quad (5b)$$

Em (5), $g(t) \cdot v_i$ é uma função do tempo; o termo de erro idiossincrático é *iid* (identicamente e independentemente distribuído); $v_{i,t}$, por seu turno, segue uma distribuição meio normal truncada, com média 0 e variância σ_v^2 . Em resumo, se o país i for eficiente em t , então $v_{i,t} = 0$. Caso contrário, $v_{i,t} > 0$.

A construção do indicador de eficiência no controle das emissões de CO2 torna-se necessário para verificar se há desperdício por parte de algum grupo específico no período analisado, bem como sua trajetória temporal.

3.2. Descrição e fonte dos dados

Nesta pesquisa, utilizou-se um painel de dados composto por 80 países, desenvolvidos e em desenvolvimento, durante o período de 1990 a 2013. As escolhas por esses países e o período basearam-se na disponibilidade comum das séries históricas. Para representar as pressões antrópicas sobre o meio ambiente, optou-se pelas emissões per capita de dióxido de carbono (CO2pc). Conforme destaca o IPCC (2013), atualmente esse poluente é responsável por 56,6% das emissões totais de GEE. Foram consideradas as atividades de queima de combustíveis fósseis e fabricação de cimento, incluindo o consumo de combustíveis sólidos, líquidos e a queima de gases. Os dados foram construídos pelo *Carbon Dioxide Information Analysis Center* e estão disponíveis no sítio eletrônico do Banco Mundial (2017).

Em relação à renda, escolheu-se a variável “Produto Interno Bruto” per capita, convertidos em dólares internacionais (americanos) a partir de taxas de Paridade do Poder de Compra (PPC). Os dados foram deflacionados e nivelados com base em 2011. Além do PIB, também foram incluídos o consumo de energia *per capita* e o grau de abertura comercial. O consumo energético considera o uso primário do país (petróleo, gás natural, carvão mineral etc.), mais as importações e menos a exportações de energia. Esses dados estão disponíveis no sítio eletrônico do *International Energy Agency* (IEA, 2017). Já a abertura comercial, é um indicador que foi construído pela soma das exportações e importações, dividida pelo PIB. Tais informações foram extraídas no Banco Mundial (2017).

4. Resultados

4.1. Análise descritiva das variáveis

Para melhor comparar as estatísticas de países desenvolvidos e em desenvolvimento, primeiramente foi feita uma separação na amostra, seguindo critérios de renda apresentados pelo Banco Mundial (2017). A regra original do Banco Mundial (2017) propõe a criação de quatro divisões compostas por países de “baixa, baixa-média, média-alta e alta renda”. Nesta pesquisa, os grupos “baixa e baixa-média” foram unificados, pois havia poucos países no primeiro grupo. Posteriormente, foram denominados de países de “baixa, média e alta renda”. Os critérios que definem as classes de países variaram com o tempo. Por exemplo, as nações consideradas de baixa renda em 2000 foram aquelas com renda *per capita* inferior a US\$

755,00. Em 2010, o ponto de corte subiu para US\$ 1.005,00. As alterações nos limiares também foram consideradas no presente estudo³.

A Tabela 1 apresenta a média das variáveis por grupo no decorrer do período 1990-2013. Países de alta renda se situaram acima da média global em todos os indicadores analisados. Elucidando, as emissões de CO2 *per capita* foram de 5,28 toneladas métricas (tpc) mundialmente. Nos países desenvolvidos, esse número foi de 8,33 tpc.

Tabela 1. Média dos grupos geral e individual no período de 1993-2013

Grupos	CO2pc	ENEpc	ABER	PIBpc
Alta	8,33	3.816,17	85,79	28.667,3
Média	1,79	727,44	69,31	6.255,71
Baixa	0,37	396,19	60,47	2.173,35
Total	5,28	2.423,09	77,36	18.322,5

Fonte: Elaboração própria

Nota: CO2pc = Emissões de CO2 per capita; ENEpc = Consumo per capita de energia primária; ABER = Abertura comercial; PIBpc = Produto Interno Bruto per capita.

De fato, esse resultado não surpreende, visto que países de renda mais elevada demandam mais energia e, por consequência, acabam emitindo proporcionalmente mais poluentes. Aliado a isso, o grau de abertura comercial também está relacionado com a quantidade consumida de energia e a intensidade produtiva dos países (Birdsall; Wheeler, 1993).

Com relação aos indicadores dos países de renda média, notou-se que todos apresentaram parâmetros abaixo da média mundial. O volume de emissões, o consumo energético e a renda desse grupo foram cerca de 1/5 dos valores observados nas nações mais ricas. As economias de média renda também mostraram menor grau de abertura comercial em relação ao grupo de renda alta (69% contra 86%, respectivamente).

Por seu turno, os países que compõem o grupo de baixa renda exibiram valores mais baixos de emissões, renda e consumo energético *per capita*. Também foi possível perceber que esse grupo apresentou menor abertura comercial em relação aos demais. Os baixos valores observados em tais variáveis podem ajudar a explicar o grau de emissões desses países.

Mais adiante, a Tabela 2 mostra as taxas de crescimento mundial das séries. Para fins de comparação, os números foram calculados nos intervalos: 1990-1995; 1996-2000; 2001-2005; 2006-2010; e 2011-2013. Ao final da Tabela 2, apresentam-se informações referentes ao período 1990-2013. Inicialmente, ressalta-se que as emissões mundiais de CO2 *per capita* cresceram 1,3% entre 1990 e 2013, com destaque para a primeira metade da década de 1990, na qual esse poluente atingiu a taxa de 1,68% ao ano (a.a.). No período de maior crescimento das emissões (1990-1995), consumo energético (1,59%), renda (2,43%) e grau de abertura (4,25%) também cresceram expressivamente. Durante esses anos, diversos países passaram pelo processo de internacionalização de suas economias, com incentivo às exportações e importações, como é o caso do Brasil (Coutinho, 1995). Certamente, os avanços econômicos observados podem explicar parte do crescimento das emissões de poluentes do início da década de 1990.

³ Para maiores detalhes, ver Banco Mundial (2017).

Tabela 2. Taxa de crescimento das séries por período, 1990-2013

Período	CO2pc (%)	ENEpc (%)	ABER (%)	PIBpc (%)
1990-1995	1,68	1,59	4,25	2,43
1996-2000	0,65	1,07	1,68	2,03
2001-2005	1,65	1,61	2,35	2,46
2006-2010	0,92	0,77	-2,16	1,43
2011-2013	0,36	0,46	-1,43	1,77
Todo período	1,30	1,28	1,35	2,20

Notas: Elaboração própria a partir de dados do Banco Mundial.

Nota: *CO2pc* = Emissões de CO2 *per capita*; *ENEpc* = Consumo de energia *per capita*; *ABER* = Grau de abertura comercial; *PIBpc* = PIB *per capita*.

Entre os anos de 1996 e 2000, a taxa de crescimento das emissões caiu significativamente (de 1,68% para 0,65%). O consumo energético (1,07%) e a renda (2,03%) também diminuíram os ritmos de crescimento. O que chamou atenção, contudo, foi a queda acentuada do grau de abertura comercial, que ficou na casa dos 1,68%, contra 4,25% do período anterior. Já no quinquênio seguinte (2001-2005), as emissões retomaram a velocidade de ascensão, crescendo a taxa de 1,65%. Concomitantemente, observou-se crescimento do consumo de energia (1,61%), da renda (2,46%) e da abertura comercial (2,35%).

Os dois períodos posteriores (2006-2010 e 2011-2013) caracterizam-se pela significativa redução da taxa de crescimento das emissões de poluentes. No primeiro intervalo (2006-2010), observou-se crescimento de 0,92%, enquanto no segundo (2011-2013), 0,36%. Em relação à renda, houve relativa estabilidade no seu ritmo (1,42% entre 2006 e 2010; e 1,77% entre 2011 e 2013). Por outro lado, o grau de abertura comercial entrou em trajetória descendente, destacando-se a redução de 2,16% entre 2006-2010 (período em que estourou a crise financeira internacional).

Em resumo, os dados provenientes da Tabela 2 indicam que períodos de maior crescimento no nível de emissões foram acompanhados por trajetórias mais acentuadas do uso de energia e da renda, principalmente entre os anos de 1990 e 2005. O que se verificou após 2006 foi uma queda na taxa de crescimento das emissões de CO2 *per capita*, com relativa estabilidade do crescimento do consumo energético *per capita* e da renda *per capita*. O grau de abertura comercial, por sua vez, oscilou significativamente entre 1990 e 2013, com taxas positivas de crescimento até 2005 e taxas negativas, pós-2006.

4.2. Resultados e discussões da “Curva Ambiental de Kuznets” e do indicador de eficiência

O modelo empírico em painel da CAK considerou 80 países, desenvolvidos e em desenvolvimento, durante o período de 1990 a 2013, totalizando 1920 observações. Conforme descreveu a Seção 3, as variáveis foram logaritimizadas para tornar possível a obtenção das elasticidades. Em razão da escala temporal utilizada, foi necessário primeiramente verificar as condições de estacionariedade das séries. Para tanto, realizaram-se testes de raízes unitárias comuns (Levin, Li e Chu) e individuais (ADF, PP e Im, Pesaran e Shin) nas unidades seccionais. Todos os procedimentos mostraram que as variáveis são não estáveis em nível, mas são em primeira diferença⁴. Por esse motivo, as estimativas por GMM foram obtidas na primeira diferença (os detalhes técnicos dos testes de raiz unitária encontram-se no Anexo

⁴ Com exceção do teste de Phillips-Perron realizado na série das emissões de CO2, que foi significativo a 5%.

A1). Após essa etapa, estimaram-se os indicadores de eficiência no controle das emissões pelo modelo de fronteira estocástica.

A Tabela 3 apresenta os resultados organizados em duas partes. Na parte (a), são reportadas as estimativas dos parâmetros, significâncias e os testes de adequação dos instrumentos. Na parte (b), apresentam-se informações sobre as variâncias dos termos de erro da fronteira estocástica.

Tabela 3. Estimativas da curva ambiental de Kuznets (primeiro estágio) e da variância dos componentes da fronteira estocástica (segundo estágio)

<i>Parte (a): Primeiro Estágio</i>				
<i>Variáveis</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>P-valor</i>
$\Delta co2pc_{i,t-1}$	0,065	0,010	6,35	0,000
$\Delta pibpc$	3,507	0,197	17,78	0,000
$\Delta pibpc^2$	-0,212	0,012	-17,57	0,000
$\Delta aber$	0,016	0,015	1,02	0,300
$\Delta ener$	1,185	0,036	33,22	0,000
Estatística J	61,06	-	-	0,298
<i>Teste de autocorrelação, Arellano e Bond (1991), ρ_1 e ρ_2</i>				
AR(1)	-1,532			0,038
AR(2)	-1,119			0,157
<i>Parte (b): Segundo Estágio</i>				
<i>Componentes</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Participação Relativa</i>		
σ_u^2	0,055	0,353		
σ_v^2	0,101	0,647		
σ_ϵ^2	0,156	1,000		

Notas: Todas as variáveis foram logaritmizadas. Os erros-padrão foram obtidos pela matriz robusta de White. As variáveis *dummies* temporais (primeiro estágio) e de efeitos fixos (segundo estágio) foram suprimidas por economia de espaço. Os instrumentos utilizados foram: *co2pc* (-2), *ener* (-1), *aber* (-1), *pibpc* (-1), *co2pc* (-1), *ener* (-1), *aber* (-1) *pibpc* (-1). Os coeficientes σ_u^2 e σ_v^2 denotam as variâncias do termo que representa a ineficiência e do fator estocástico, respectivamente. “Participação Relativa” representa a participação individual do componente específico no termo de erro composto.

Primeiramente, observou-se que instrumentos adotados na modelagem são válidos, uma vez que a estatística J de Sargan (1988) não foi significativa. Além disso, o erro estocástico do modelo seguiu um padrão autorregressivo de primeira ordem, com um componente AR (2) não significativo, conforme recomendam os manuais (Arellano; Bond, 1991).

Em relação às estimativas, visualiza-se que todos os coeficientes apresentaram sinais esperados. Por exemplo, as emissões foram (positivamente) elásticas ao crescimento do uso de energia (Tabela 3). Em números, elevações de 10% da demanda energética expandem as emissões de CO2 em, aproximadamente, 11,9%. Por outro lado, não foram encontradas evidências de que o grau de abertura comercial impacte nas emissões desse poluente (apesar de ter sido positivo, o coeficiente não foi estatisticamente significativo). Resultados semelhantes para a significância do grau de abertura foram encontrados por Jayanthakumaran e Liu (2012) e Shahbaz et al. (2012).

As emissões de CO2 também foram elásticas à renda, uma vez que o coeficiente do termo linear foi significativo e maior que a unidade. Já o sinal negativo do termo quadrático indica que as emissões, de fato, crescem a taxas decrescentes. Esse resultado é especialmente

relevante, pois apresenta evidências da “curva ambiental de Kuznets” para um número significativo de países (80 países) durante um expressivo período. Por meio da expressão $\exp(-\beta_1/2\beta_2)$, é possível demonstrar que o *turning point* das emissões de CO₂ *per capita* deste estudo foi de US\$ 3.942,95 (dólares de 2011).

O ponto de inflexão da CAK estimado nesta pesquisa aparentemente diverge em magnitude dos reportados por outros estudos. Exemplificando, utilizando dados anteriores à década de 1990, os primeiros *reports* encontraram limiares entre US\$ 8.600⁵ (Shafik; Bandyopadhyay, 1992) e US\$ 13.400 (Selden; Song, 1994). Pesquisas mais recentes para as emissões de CO₂ obtiveram *thresholds* entre US\$ 6.703,50 (Chakravarty; Mandal, 2015) e US\$ 18.575 (Balin; Akan, 2015).

Algumas reflexões são necessárias para entender tais diferenças. Em relação aos estudos da década de 1990, nota-se que a maioria utilizou dados de corte transversal ou painéis curtos para um número reduzido de regiões. Por exemplo, Grossman e Krueger (1991) analisaram somente algumas cidades; enquanto Shafik e Bandyopadhyay (1992) concentraram-se em uma amostra de 30 países, sendo 22 desenvolvidos. Ademais, a abordagem padrão da época desconsiderou os problemas de simultaneidade apontados por Stern et al. (1996).

Nas pesquisas pós-2000, os autores buscaram avançar na modelagem empírica, partindo de novos métodos de estimação (modelos ARDL, *vector autoregressive* – VAR, *vector error correction* – VEC, painel dinâmico etc.). Conforme destacam Ávila e Diniz (2015), o uso de diferentes técnicas promoveu o alargamento das estimativas do ponto de inflexão. Realmente, os valores encontrados na literatura pós-2000 para o *turning point* mostraram dispersão superior aos estudos da década de 1990. Não foram encontrados, porém, pesquisas que trataram os problemas de simultaneidade ocasionados tanto pela renda quanto pelo consumo de energia. Dessa forma, é possível que os pontos de inflexão observados na literatura consultada estejam superestimados.

A ideia que está sendo exposta é simples. Conforme destacam Stern et al. (1996), a simultaneidade da renda deriva-se do efeito “*feedback*” do meio ambiente para a produção. Os autores argumentam que a produção eleva as emissões de poluentes através do uso de recursos naturais (geralmente os não renováveis). Ao longo do tempo, a quantidade disponível de recursos naturais se torna mais escassa e afeta negativamente a produção. Além disso, o nível de emissão de poluentes pode se sobrepor à capacidade de absorção do meio ambiente, diminuindo a produtividade dos recursos naturais (incluindo os renováveis). Acrescenta-se neste estudo mais um argumento. Os estudos da CAK afirmam que a conscientização social e os avanços tecnológicos surgem com a elevação da renda. Se essas condições são válidas, países de renda mais alta tendem a desperdiçar menos emissões. Como o desperdício não é uma variável diretamente observável (está contida no termo de erro), é provável que o erro do modelo esteja correlacionado com a renda.

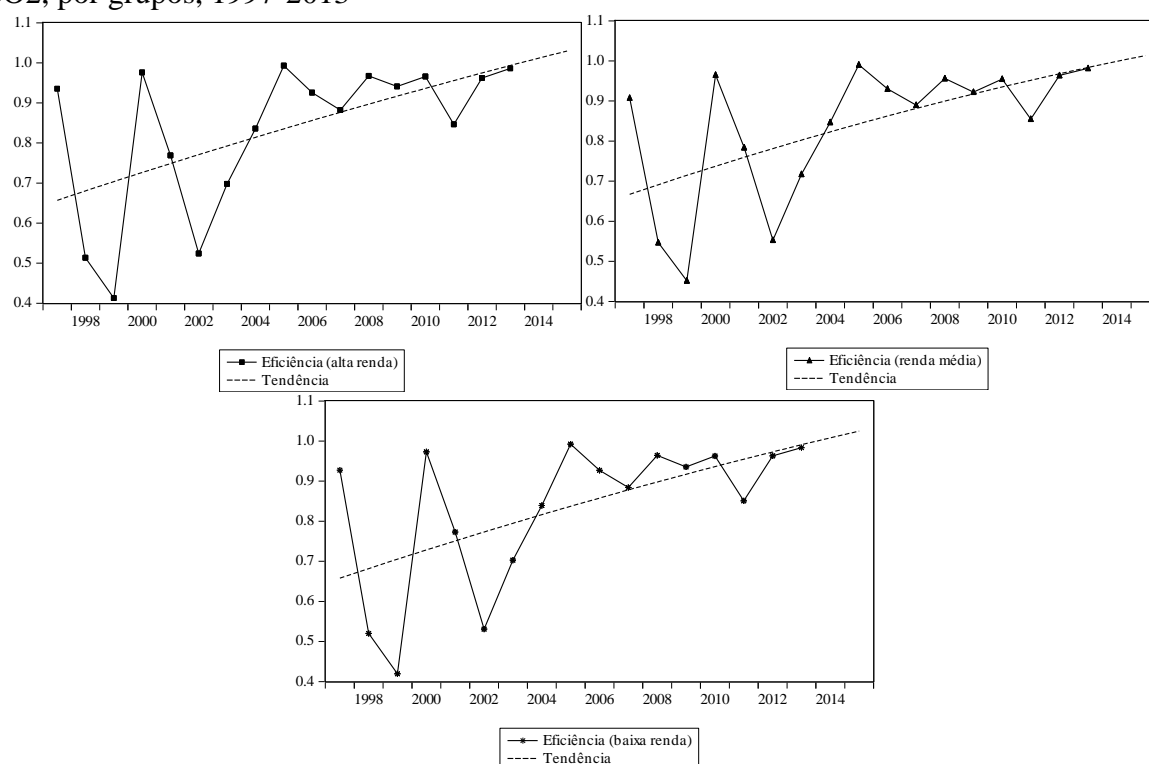
No caso da energia, podem ser destacados dois pontos. Primeiro, o efeito “*feedback*” das emissões para o uso de energia pode ocorrer via variação dos preços relativos. Isso porque o crescimento das emissões está relacionado diretamente com o consumo energético, cuja fonte também é limitada (como os combustíveis fósseis, que são a principal fonte de energia utilizada nos processos de produção). Sua escassez eleva seu preço e torna viável o uso de outras fontes de energia, como as de origem renovável (Al-Mulali; Ozturk, 2016). Assim, o crescimento das emissões ajuda a explicar a trajetória temporal do consumo energético, caracterizando o problema de simultaneidade. O segundo ponto é novamente o desperdício de emissões. Países eficientes no controle das emissões são geralmente eficientes no consumo de energia. Prova disso é que o uso adequado da energia é constantemente apontado como uma

⁵ Valores reais, base de 2011.

das etapas para reduzir as pressões antrópicas sobre o meio ambiente (IPCC, 2013). Assim, o termo de erro estaria correlacionado com o consumo energético. Tais pontuações podem justificar a presente abordagem empírica e seu *turning point* estimado.

Após essa discussão, apresentam-se a seguir os resultados e análises dos indicadores de eficiência no controle das emissões. Na parte (b) da Tabela 3 estão as informações sobre a variância dos componentes do erro composto. A variância do desperdício de emissões representou cerca de 35% da variância total, indicando que, de fato, os países poderiam ter poupado emissões no período analisado. A Figura 1 reporta as trajetórias dos países de alta, média e baixa rendas. Em razão das perdas de observações na primeira etapa da estimação, os dados sobre a eficiência iniciam-se em 1997. Mesmo assim, foi possível observar padrões de comportamento para essa variável.

Figura 1. Trajetórias temporais dos indicadores de eficiência no controle das emissões de CO₂, por grupos, 1997-2013



Fonte: Elaboração própria

Os indicadores de eficiência medem a performance dos países para controlar suas emissões quando os efeitos da renda, consumo de energia e grau de abertura são controlados. Além dessas variáveis, outras características mais rígidas no tempo também são levadas em consideração, como estrutura da matriz energética, alocação dos setores produtivos na economia, entre outras. Dessa forma, a eficiência representa a parcela da variação das emissões que não é explicada pelo modelo ou pelo erro estocástico. Atribui-se a ela a noção de “qualidade da gestão de poluentes” ou “performance ambiental”.

Dito isso, note-se que o caminho percorrido pela eficiência das emissões foi similar nos referidos grupos. Os países compartilharam períodos de elevações e quedas nos indicadores. O que desperta maior atenção, no entanto, é a tendência crescente da variável (crescimento médio de 2,95% a.a.), a qual mostra que, do ponto de vista ambiental, os países estão melhorando a forma na qual os recursos são utilizados. Para ilustrar melhor, dividiram-se as informações sobre as performances por períodos e grupos. Essas estatísticas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Estatísticas descritivas da eficiência das emissões de CO₂, por grupo e período

<i>Período: 1997-2000</i>				
Grupos	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Alta	0,709	0,253	0,357	0,998
Média	0,718	0,240	0,354	1,000
Baixa	0,710	0,246	0,353	1,000
<i>Período: 2001-2005</i>				
Alta	0,764	0,157	0,471	1,000
Média	0,778	0,157	0,469	1,000
Baixa	0,768	0,154	0,468	1,000
<i>Período: 2006-2010</i>				
Alta	0,936	0,038	0,779	0,998
Média	0,931	0,047	0,665	1,000
Baixa	0,934	0,035	0,863	1,000
<i>Período: 2010-2013</i>				
Alta	0,931	0,062	0,824	0,999
Média	0,933	0,060	0,823	1,000
Baixa	0,933	0,059	0,823	1,000
<i>Período total</i>				
Alta	0,831	0,182	0,357	1,000
Média	0,838	0,174	0,354	1,000
Baixa	0,831	0,179	0,353	1,000

Fonte: Elaboração própria

As médias dos grupos de renda alta, média e baixa foram similares em todos os períodos e mostram gradativa evolução ao longo dos anos. No período de 1997 a 2000, a eficiência média foi cerca de 0,7, sinalizando que aproximadamente 30% das emissões da época poderiam ter sido poupadas. O potencial de poupança se reduziu para 25% entre 2001-2005. O que se viu após 2005 foram melhorias expressivas na gestão das emissões. Entre 2006-2010 e 2011-2013, os escores médios ficaram próximos a 93% em todos os grupos de renda.

Vale acrescentar mais um ponto na comparação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. As pesquisas que defendem a CAK argumentam que o nível de emissões *per capita* somente entrará em trajetória descendente a partir de certo limiar de renda *per capita*. As principais razões para a existência desse fenômeno têm como base, como falado, as mudanças na consciência ambiental, legislação e padrão tecnológico. Assim, seria natural encontrar evidências de que países desenvolvidos possuem melhores indicadores de eficiência ambiental.

Em sentido aparentemente oposto, este estudo mostrou que não há grandes diferenças entre os desempenhos de economias desenvolvidas e emergentes. O que explica esse resultado é o controle feito de aspectos estruturais que são mais rígidos no tempo, como matriz energética, composição da produção e do consumo, etc. Dessa forma, foi possível comparar esses países sob uma mesma ótica produtiva, o que é mais coerente do que desconsiderar as limitações estruturais e sociais das nações.

5. Conclusões

Tendo em vista o processo de aceleração das mudanças climáticas e a diminuição da biodiversidade das últimas décadas, associadas ao aumento expressivo das emissões antrópicas de CO₂, a presente pesquisa objetivou encontrar novas evidências para a CAK, com base em uma estrutura metodológica mais adequada para superar desafios de ordem empírica. Além disso, avançou-se no sentido de obter estimativas observáveis para a eficiência dos países no controle das emissões, variável importante para a construção de políticas ambientais mais concretas.

Algumas importantes conclusões podem ser extraídas desta pesquisa. Em primeiro lugar, constatou-se que o consumo de energia mostrou ser fundamental no contexto das emissões de CO₂. Nesse sentido, políticas que buscam aumentar a eficiência energética e/ou substituir os processos vigentes por recursos menos intensivos em poluentes são importantes para diminuir as pressões antrópicas sobre as emissões de GEE e, conseqüentemente, sobre os problemas ambientais associados. Em contrapartida, não foram encontradas evidências de efeitos da abertura comercial.

Ainda sobre o modelo empírico, as evidências garantem que a hipótese seminal da CAK se mantém para a amostra estudada. Em outras palavras, não foi possível descartar a existência de um ponto de virada para as emissões de CO₂. Apesar disso, esses resultados não podem ser confundidos essencialmente com processos automáticos que garantem que a emissão de CO₂ sempre irá decair a partir de certo ponto.

Na realidade, os reflexos positivos da renda somente surtem efeitos sobre as emissões quando a sociedade passa a se integralizar na ideia de que a qualidade ambiental é primordial. Com isso, a criação de leis de proteção ambiental e o rigor na condução das políticas ambientais aplicam-se em novos paradigmas e costumes sociais. Posteriormente, é natural que ocorram mudanças estruturais na economia em direção a processos ambientalmente mais limpos, como a especialização em setores terciários (tecnologia, informação, serviços etc.) ou a busca por avanços tecnológicos nos setores tradicionalmente mais intensivos.

Nesse contexto, a eficiência no controle das emissões tem papel fundamental, pois o esforço pela melhoria técnica pode atrair atividades que elevam a taxa de crescimento tecnológico, a qual é importante para definir o instante de virada das emissões. Em sentido amplo, tais aspectos podem conduzir caminhos mais rápidos para o estágio de desenvolvimento sustentável, nas limitações conceituais expressas aqui.

Referências

AL-MULALI, U.; OZTURK, I. The investigation of environmental Kuznets curve hypothesis in the advanced economies: The role of energy prices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 54, 2016. 1622-1631.

APERGIS, N. Environmental Kuznets curves: new evidence on both panel and country- level CO₂ emissions. **Energy Economics**, 54, 2016. 263-271.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. **The review of economic studies**, 58, 1991. 277-297.

ÁVILA, E. S. D.; DINIZ, E. M. Evidências sobre curva ambiental de Kuznets e convergência das emissões. **Estudos Econômicos, (São Paulo)**, 45, n. 1, 2015. 97-126.

BALIN, B.; AKAN, D. EKC HYPOTHESIS AND THE EFFECT OF INNOVATION: A PANEL DATA ANALYSIS. **Journal of Business Economics and Finance**, 4, n. 1, 2015.

BALTAGI, B. **Econometric analysis of panel data**. John Wiley & Sons, 2008., 2008.

BIRDSALL, N.; WHEELER, D. Trade policy and industrial pollution in Latin America: where are the pollution havens? **The Journal of Environment & Development**, 2, n. 1, 1993. 137-149.

CHAKRAVARTY, D.; MANDAL, S. K. Estimating the relationship between economic growth and environmental quality for the brics economies-a dynamic panel data approach. **The Journal of Developing Areas**, 50, n. 5, 2016. 119-130.

CHIU, C.-R. et. al.. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output. **Energy Economics**, 34, n. 5, 2012. 1392-1399.

CHUNG, Y. H.; FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. **journal of Environmental Management**, 51, n. 3, 1997. 229-240.

COUTINHO, L. Nota sobre a natureza da globalização. **Economia e sociedade**, 4, n. 1, 1995. 21-26.

FÄRE, R. et. al. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. **The review of economics and statistics**, 1989. 90-98.

FÄRE, R. et. al. Characteristics of a polluting technology: theory and practice. **journal of Econometrics**, 126, n. 2, 2005. 469-492.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: comment. **European Journal of Operational Research**, 57, n. 1, 2004. 242-245.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Environmental impacts of a North American free trade agreement. **National Bureau of Economic Research**, 1991.

IEA. International Energy Agency. Disponível em: <[http:// www.iea.org/](http://www.iea.org/)>. Acesso em: Janeiro 2017.

IPCC. **ClimateChange 2013 - The Physical Science Basis**, Switzerland, 2013.

JAYANTHAKUMARAN, K.; LIU, Y. Openness and the environmental Kuznets curve: evidence from China. **Economic Modelling**, 29, n. 3, 2012. 566-576.

KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **The American economic review**, 45, n. 1, 1955. 1-28.

LAU, L.-S.; CHOONG, C.-K.; ENG, Y.-K. Investigation of the environmental Kuznets curve for carbon emissions in Malaysia: do foreign direct investment and trade matter? **Energy Policy**, 68, 2014. 490-497.

LEE, Y. H.; SCHMIDT, P. A production frontier model with flexible temporal variation in technical efficiency. **The measurement of productive efficiency: Techniques and applications**, 1993. 237-255.

LI, T.; WANG, Y.; ZHAO, D. Environmental Kuznets curve in China: new evidence from dynamic panel analysis. **Energy Policy**, 91, 2016. 138-147.

PANAYOTOU, T. et.al. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. **International Labour Organization**, 1993.

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

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. **Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence**. World Bank Publications. [S.l.]. 1992.

SHAHBAZ, M.; JALIL, A.; DUBE, S. Environmental Kuznets curve (EKC): Times series evidence from Portugal, 2010.

SHAHBAZ, M.; MUTASCU, M.; AZIM, P. Environmental Kuznets curve in Romania and the role of energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 18, 2013. 165-173.

SILVA, F. F. et. al. Determinantes da emissão de CO₂ por uso de combustíveis fósseis para países sul-americanos, a partir da abordagem STIRPAT. **Revista de Economia**, 41, n. 1, 2017.

STERN, D. I.; COMMON, M. S.; BARBIER, E. B. Economic growth and environmental degradation: the environmental Kuznets curve and sustainable development. **World development**, 24, n. 7, 1996. 1151-1160.

SUGIAWAN, Y.; MANAGI, S. The environmental Kuznets curve in Indonesia: Exploring the potential of renewable energy. **Energy Policy**, 98, 2016. 187-198.

TASKIN, F.; ZAIM, O. The role of international trade on environmental efficiency: a DEA approach. **Economic Modelling**, 18, n. 1, 2001. 1-17.

TIWARI, A. K.; SHAHBAZ, M.; HYE, Q. M. A. The environmental Kuznets curve and the role of coal consumption in India: cointegration and causality analysis in an open economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 18, 2013. 519-527.

WANG, H.-J.; SCHMIDT, P. One-step and two-step estimation of the effects of exogenous variables on technical efficiency levels. **journal of Productivity Analysis**, 18, n. 2, 2002. 129-144.

WORLD BANK. World Bank Group, 2017. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/>> Acesso em: Janeiro 2017.

Anexo

Tabela A2: Testes de raiz unitária, séries em nível e em primeira diferença

<i>Painel (a): variáveis em nível</i>					
Teste/Variável	CO2pc	ENEpc	ABER	PIBpc	EFIC
Levin, Li e Chu	0,92 ^{NS}	1,67 ^{NS}	6,63 ^{NS}	0,06 ^{NS}	-1305*
Im, Pesaran e Shin	1,79 ^{NS}	3,57 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	1,58 ^{NS}	-16,50*
ADF	162,8 ^{NS}	116,3 ^{NS}	162,4 ^{NS}	176,5 ^{NS}	572,8*
PP	202,2 ^{**}	189,34 ^{NS}	158,6 ^{NS}	147,7 ^{NS}	1131*
<i>Painel (b): variáveis em diferença</i>					
Teste/Variável	CO2pc	ENEpc	ABER	PIBpc	EFIC
Levin, Li e Chu	-26,25*	-11,94*	-20,41*	-11,12*	-
Im, Pesaran e Shin	-20,44*	-14,79*	-21,12*	-13,65*	-
ADF	986,6*	862,7*	748,4*	498,9*	-
PP	1697,1*	1501*	1441,3*	788,3*	-

Notas: *, ** e NS representam, respectivamente, significância a 1%, 5% e não significativo a 10%. O teste de Levin, Li e Chu têm como hipótese nula a presença de raiz unitária comum no painel; os testes Im, Pesaran e Shin, ADF e PP testam a presença de raiz unitária individual nas unidades seccionais. CO2pc = Emissões de CO2 per capita; ENEpc = Consumo de energia per capita; Abertura = Abertura comercial; PIBpc = PIB per capita; EFIC= Eficiência no controle das emissões de CO2.