

CRESCIMENTO ECONÔMICO E EMISSÕES DE CO_2: ESTIMATIVA DE UMA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL PARA OS PAÍSES QUE COMPÕEM O BRICS

ECONOMIC GROWTH AND CO_2 EMISSIONS: ESTIMATION OF AN ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE FOR BRICS COUNTRIES

Autor(es): Jeane do Nascimento Custódio
Janaina da Silva Alves
Filiação: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
E-mail: jeane.custodio@hotmail.com
janaina.alves@ufrn.br

Grupo de Trabalho (GT): GT 4. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo
Tendo em vista que o crescimento econômico é uma das causas que impactam negativamente o meio ambiente, o presente trabalho busca analisar se a trajetória de crescimento dos países emergentes, que formam o agrupamento do BRICS, convergem com os objetivos do desenvolvimento sustentável. A escolha do grupo BRICS, se dá devido a relevância do bloco no cenário internacional tantos em aspectos econômicos quanto ambientais que devido ao crescimento demográfico e ao crescimento de suas economias, tem se observado nas últimas década a intensificação da pressão por recursos naturais. Para atingir objetivo proposto foi realizada análise econométrica por meio de dados em painel, através da estimação de uma curva de Kuznets ambiental com o objetivo verificar a relação entre a emissão de carbono do BRICS e o crescimento da renda per capita para o período de 1992 a 2019, além de avaliar qual o impacto do protocolo de Quioto na trajetória de emissão de CO_2. Os resultados encontrados corroboraram para uma curva em formato de "N", evidenciando a predominância do efeito escala sobre os efeitos composição e técnico para o grupo de emergentes em análise. Além disso, mesmo após a assinatura do protocolo de Quioto os níveis de emissão de dióxido de carbono continuaram uma trajetória ascendente.

Palavras-chave: Crescimento econômico. BRICS. Emissões de CO_2. Dados em painel.

Abstract
Bearing in mind that economic growth is one of the causes that negatively impact the environment, the present work seeks to analyze whether the growth trajectory of emerging countries that form the BRICS grouping converges with the objectives of sustainable development. The choice of the BRICS group is due to the bloc's relevance in the international scenario, both in economic and environmental aspects, which, due to demographic growth and the growth of their economies, has seen intensified pressure for natural resources in the last decade. In order to achieve the proposed objective, an econometric analysis was carried out using panel data, through the estimation of an environmental Kuznets curve with the objective of verifying the relationship between the BRICS carbon emission and the growth of per capita income for the period from 1992 to 2019, in addition to evaluating the impact of the Kyoto protocol on the CO_2 emission trajectory. The results found corroborated for an "N"-shaped curve, evidencing the predominance of the scale effect over the composition and technical effects for the group of emergents under analysis. Furthermore, even after the Kyoto Protocol was signed, carbon dioxide emission levels continued on an upward trajectory.
***Key words**: Economic growth. BRICS. CO_2 emissions. Panel data.*

1. Introdução

A partir da Revolução Industrial a capacidade do ser humano de interferir na natureza aumentou significativamente. As inovações tecnológicas e a explosão demográfica promoveram em um curto espaço de tempo mudanças de forma expressiva nas condições de vida de grande parcela da população.

Apesar da redução da pobreza nas últimas décadas em países em desenvolvimento, para bilhões de pessoas, o acesso aos bens de consumo e serviços essenciais ainda se dá de maneira precária. É possível verificar que houve um aumento da desigualdade de renda, no uso de energia, no consumo, nas emissões de gases do efeito estufa ao mesmo tempo em que há expansão das atividades produtivas (ABRAMOVAY, 2012).

Ademais, o impacto ambiental gerado pelo crescimento econômico dos países, tem levantado questões acerca da incompatibilidade entre os modelos de desenvolvimento em curso e a preservação da natureza. A questão da preservação ambiental tem ganhado destaque nos veículos de comunicação e no meio acadêmico, especialmente no que diz respeito as mudanças climáticas intensificadas pela ação antrópica.

Em suma para que o desenvolvimento seja sustentável deve-se buscar equilibrar objetivos de ordem, econômica, social e ambiental. Levando em consideração que a expansão das atividades produtivas, e por conseguinte o aumento da pressão por recursos naturais impactam negativamente o meio ambiente, o presente artigo tem por objetivo analisar a trajetória de crescimento dos países emergentes, sendo utilizado como amostra os países emergentes do BRICS.

A escolha do grupo BRICS constituído por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul, se dá devido a relevância do bloco no cenário internacional, principalmente pelas elevadas taxas de crescimento econômico da China e da Índia. De acordo com dados da *Global Carbon Project,* o BRICS foi responsável por aproximadamente 42% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) no ano de 2019. A matriz energética desse grupo de emergentes predomina (com exceção do Brasil) o uso de fontes não renováveis de energia, portanto, ressalta-se a importância do grupo para direcionar esforços em prol de aumentar a participação de fontes renováveis e de menor impacto ambiental em sua matriz energética.

O objetivo central deste trabalho é analisar se a trajetória de crescimento do BRICS converge com os objetivos do desenvolvimento sustentável. Para tal foi realizada análise econométrica por meio de dados em painel, utilizando a abordagem teórica da curva de Kuznets ambiental para verificar a relação entre a emissão de carbono do BRICS e o crescimento da renda per capita no período em que compreende os anos de 1992 a 2019, além de avaliar qual o impacto do protocolo de Quioto na trajetória de emissão de CO_2.

Um dos pontos relevantes para justificar o presente trabalho é que ao analisar como se dá a relação entre crescimento econômico e a preservação ambiental, pretende-se ir além da abordagem geralmente utilizada pelos economistas que se limitam a avaliar somente os aspectos econômicos. Ademais, sendo o BRICS responsável por mais de 40% das emissões globais de dióxido de carbono, entender como se dá essa relação é imprescindível para respaldar medidas efetivas que possam mitigar os impactos ambientais em nível mundial.

Considerando esta introdução, o presente trabalho está estruturado em 4 seções. Na segunda seção é apresentada a hipótese da curva de Kuznets ambiental com seus principais pressupostos teóricos e a revisão da literatura empíricas, bem como as principais críticas feitas à hipótese. Já na terceira seção é mostrada a metodologia de dados em painel conjuntamente com a descrição dos dados utilizados na modelagem econométrica. Na seção seguinte tem-se os resultados das estimações, do teste de especificação do modelo e dos testes de hipóteses. Por fim, são feitas as considerações finais acerca dos resultados obtidos nessa pesquisa.

2. Curva de Kuznets Ambiental

2.1 Aspectos Teóricos

A relação entre crescimento econômico e preservação ambiental é frequentemente representada na literatura empírica pela Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que de maneira geral relaciona o nível de renda da economia com uma variável ambiental. A hipótese principal é a de que nos estágios iniciais de crescimento econômico há um aumento da degradação ambiental, e na medida que se atinge um ponto de máximo a trajetória da curva se inverte, ou seja, a partir de determinado nível de renda a degradação ambiental tende a diminuir.

No trabalho pioneiro de Grossman e Krueger (1991), os autores adaptaram a curva de Kuznets original para relacionar o crescimento econômico e a degradação ambiental. Eles evidenciaram a relação entre a emissão de poluentes e o PIB per capita para os Estados Unidos, encontrando evidências para uma curva em formato de "U" invertido.

Na fase inicial, que corresponde a fase ascendente da curva, há uma piora nos indicadores de qualidade ambiental até que seja atingido o ponto de inflexão. Nesse primeiro momento, os países não industrializados que dependem predominantemente do setor primário buscam o crescimento econômico por meio da ampliação da indústria e da participação no comércio internacional que resulta no aumento da demanda por recursos naturais.

Na fase descendente da curva, após atingido determinado nível de renda em que o país já é industrializado e amplia-se a participação do setor de serviços, a degradação ambiental diminui. De acordo com Biage (2012), nesta etapa da curva as nações desenvolvidas exportam processos de produção intensivos em poluição para nações menos desenvolvidas e ficam com a parte de serviços e de tecnologia da informação que são setores menos intensivos em recursos e poluição.

Dentre os fatores que são utilizados para explicar a existência de uma trajetória em formato de "U" invertido está o fato de que com baixos níveis de renda per capita as pessoas estão menos preocupadas com questões ambientais, ou seja, o crescimento econômico é priorizado em detrimento das políticas ambientais. Na medida que a renda aumenta a qualidade ambiental ganha mais importância para os indivíduos. Este fato associado ao uso de tecnologias mais limpas e uma regulação ambiental mais rígida melhoraria os indicadores ambientais.

Ainda de acordo com Grossman e Krueger (1995) o formato de uma curva em formato de "U" invertido pode ser explicado por três efeitos distintos decorrentes do próprio crescimento da atividade produtiva, a saber: Efeito escala, efeito composição e efeito técnico.

O efeito escala relaciona-se ao fato de que conforme o nível de atividade produtiva cresce aumenta-se a demanda por recursos naturais devido ao aumento da produção e do consumo, ou seja, há uma relação positiva entre crescimento da economia e degradação ambiental. Mantendo-se constante a tecnologia de produção e a estrutura produtiva, predominando o efeito escala sobre os demais é esperado uma relação direta entre as emissões de poluentes e o nível de renda, o que corresponde à fase inicial da curva.

O efeito composição diz respeito a estrutura produtiva da economia, se predominam atividades primárias, atividades industriais (sendo importante considerar o tipo de indústria já que há atividades que são mais poluentes), ou se predomina o setor de serviços que em tese é menos poluente que os demais setores.

O efeito técnico ou tecnológico corresponde ao uso mais eficiente dos recursos naturais com técnicas que degradem menos o meio ambiente. A relação negativa entre emissões e renda pode ser explicada pela predominância dos efeitos composição e tecnológico sobre o efeito escala que é o que ocorre nos países desenvolvidos. Caso o efeito escala predomine sobre os

demais efeitos como é o caso na maioria dos países menos desenvolvidos a trajetória da curva será monotônica crescente, ou seja, quanto maior o nível de atividade econômica maior será a degradação ambiental.

Segundo De Bruyn (1997) a CKA não se sustenta no longo prazo, segundo este autor a partir de determinado nível de renda haveria uma nova inflexão e os indicadores de qualidade ambiental piorariam. Em vez de uma curva em formato de "U" invertido haveria uma curva em formato de "N". Neste caso, além das etapas já mencionadas conforme se daria o progresso econômico e o aumento da renda per capita haveria uma nova relação positiva entre o crescimento da atividade produtiva e a degradação ambiental. Este novo ponto de inflexão seria explicado pela perda dos ganhos tecnológicos de forma que o efeito escala voltaria a ser predominante, ou seja, os custos de recuperação ambiental seriam demasiadamente elevados o que tornaria impossível crescer economicamente sem perder a qualidade ambiental ou ainda a escassez de recursos naturais ou a perda irreparável de serviços ecossistêmicos tornaria inviável determinadas atividades produtivas.

2.2 Revisão da Literatura Empírica

A hipótese que permeia a Curva de Kuznets Ambiental é de que é possível conciliar crescimento econômico e preservação ambiental. Existe uma vasta literatura empírica com esta abordagem utilizando-se das mais diversas metodologias e variáveis, o que também implica em resultados distintos. Mesmo sendo válida a hipótese da CKA, os pontos de inflexão encontrados variam bastante. Fatores como a metodologia econométrica adotada, a base de dados, a dimensão temporal e os países em análise interferem bastante no resultado obtido.

O primeiro trabalho a ser publicado foi o de Grossman e Krueger (1991). Neste trabalho os autores utilizaram como variável dependente a emissão de dióxido de enxofre, fumaça negra e partículas suspensas utilizando dados do Global Environmental Monitoring System (GEMS), além de outros indicadores ambientais, demográficos e de renda como variáveis explicativas. Utilizou-se dados de 52 cidades de 32 países e constatou-se a existência de uma curva em formato de "N", ou seja, a partir de determinado nível de renda a degradação ambiental voltava a aumentar. Os pontos obtidos foram de aproximadamente US$ 5.000,00 para o ponto de máximo e US$ 10.000,00 para o ponto de mínimo.

O termo curva de Kuznets ambiental (em inglês, Environmental Kuznets Curves – EKC) foi primeiramente citado no trabalho de Panayotou (1993). Este autor além de utilizar as emissões de dióxido de enxofre (SO_2), óxido nítrico (NO) e partículas suspensas para testar a validade da CKA, ele buscou verificar se a trajetória de "U" invertido era encontrada para o desmatamento. No trabalho de Panayotou, o autor utilizou uma amostra de 68 países para período de 1987 a 1988, alcançando um resultado condizente com a CKA e pontos de inflexões de US$ 3.000,00 para SO_2, US$5.500,00 para NO e aproximadamente US$ 4.500,00 para partículas suspensas. O ponto de inflexão para o desmatamento foi menor do que os outros poluentes, sendo inferior a US$ 2.000,00. Para justificar o resultado encontrado ele utilizou o argumento de que o desmatamento causado pela agricultura ocorre antes da fase de industrialização.

Harbaugh, Levinson e Wilson (2002), além de expandirem a base de dados de Grossman e Krueger (1995), verificaram a sensibilidade da forma funcional e da especificação econométrica com o objetivo de testar a robustez das evidências empíricas que validariam a CKA. Os resultados concluíram que os pontos de inflexão e a validade da CKA são sensíveis a variações na especificação econométrica.

Lucena (2005) utilizou a metodologia de séries temporais para estimar uma CKA para o Brasil para o período de 1970 a 2003. O autor buscou analisar a relação entre as emissões de

CO_2 (variável dependente), a renda per capita e o volume de comércio medido pela soma das exportações e importações. Para as emissões de CO_2, os resultados indicaram uma relação monotônica crescente. Já para a variável de pressão ambiental consumo final de energia per capita as evidências apontaram que o Brasil estaria no estágio intermediário da CKA, no entanto, não foi possível afirmar a validade da hipótese para esta variável.

No trabalho de Cunha e Scalco (2013) os autores buscaram verificar a relação entre o produto per capita e a emissão de dióxido de carbono (CO_2) no Brasil no período de 1980 a 2006 por meio da estimação de um modelo econométrico autorregressivo vetorial com o vetor de correção de erros (VEC). Dentre os resultados obtidos confirmou-se a existência do efeito escala, isto é, que o crescimento econômico gera maiores níveis de poluição e não se verificou o efeito composição, pois, mesmo com um aumento do setor de serviços e diminuição da participação da indústria na estrutura produtiva da economia brasileira o nível de poluição continuou a aumentar.

Ghouali et al. (2015) estimaram um modelo de dados em painel para testar quais fatores afetam as emissões de dióxido de carbono para os países do BRICS considerando o período de 1990 a 2012, sendo evidentemente as emissões de CO_2 a variável dependente e o consumo total de energia primária, o PIB per capita e o IED líquido as variáveis explicativas. Como foi utilizado o logaritmo das variáveis, os coeficientes puderam ser interpretados como elasticidades e os resultados obtidos foram que aumentos de 1% na variável consumo de energia, aumentam as emissões de carbono em 7,45%, enquanto aumentos de 1% na variável IED ou no PIB per capita aumentam as emissões em aproximadamente 6%.

Em relação ao trabalho de Castro, Alves e Andrade (2019) os autores estimaram uma CKA para os países do BRICS por meio de cointegração em painel. Neste trabalho, além da variável dependente dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento, as variáveis explicativas utilizadas no modelo econométrico foram o PIB per capita, o consumo per capita de energia, o fluxo de comércio e uma dummy para captar os efeitos do Protocolo de Quioto sobre o os países emergentes que constituem o BRICS.

Dentre os resultados constatou-se a existência de uma CKA em formato de "U" invertido, conforme a teoria. Em relação ao uso de energia o parâmetro apresentou valor positivo, confirmando a hipótese de que quanto maior o consumo maior será a emissão de CO_2. No que tange ao grau de abertura da economia, o coeficiente apresentou valor negativo indicando que quanto maior o grau de abertura dos países, menor serão as emissões de CO_2, que pode ser explicada em parte pela maior exposição à concorrência internacional, que faz com que se busque métodos de produção mais sustentáveis ecologicamente. Por fim, a variável dummy para captar os efeitos do Protocolo de Quioto não foi estatisticamente significante, não tendo, portanto, influência para redução de emissão de dióxido de carbono. O ponto de inflexão encontrado foi US$ 2.033,89 para o estimador de mínimos quadrados dinâmico e US$ 2.057,61 para o estimador de mínimos quadrados totalmente modificado.

Sereno e Andrade (2019) utilizaram a metodologia de cointegração em painel para testar a validade da CKA para os estados brasileiros. Estes autores utilizam como variável dependente as emissões de gases do efeito estufa e como variáveis explicativas a renda per capita e seus termos ao quadrado e cúbico, a densidade populacional e seu termo quadrático, o nível de transformação industrial dos produtos exportados e o PIB do resto do mundo para o período que compreende os anos de 2002 a 2016. O trabalho traz evidências para uma curva em formato de "N" e a relevância das variáveis densidade populacional e o nível de transformação industrial para explicar as emissões de GEE (gases do efeito estufa).

No caso desta última variável, a relação positiva com o regressando evidencia que a baixa intensidade tecnológica é um fator que intensifica as emissões enquanto que uma maior transformação tecnológica pode contribuir para reduzi-las. Os autores ainda apontam para a

necessidade de se obter um maior grau de complexidade nas exportações brasileiras para a redução das emissões de GEE, tendo em vista que a pauta exportadora é predominantemente voltada para exportação de bens primários pouco intensivos no uso de tecnologia e de baixo valor agregado. Além disso, constatou-se que os pontos de inflexão estão muito acima da renda média per capita dos estados, sendo assim, os estados ainda estão na primeira fase ascendente da curva.

Como é possível observar existe uma ampla gama de trabalhos que buscam relacionar fatores sociais, demográficos e econômicos com indicadores de degradação ambiental para testar a validade da CKA. Nesta análise predomina a utilização de uma estrutura de dados em painel e de séries temporais com as mais diversas técnicas de estimação e a utilização de distintas bases de dados. É válido ressaltar as diferenças dos resultados obtidos quando se utiliza países desenvolvidos e países menos desenvolvidos no que tange a validação ou não da CKA, bem como pequenas modificações na especificação econométrica que podem afetar os resultados.

2.3 Limitações da CKA

Uma das principais críticas diz respeito à especificação ad hoc da CKA. Dessa forma, a especificação econométrica influencia os resultados das estimações e os pontos de inflexão que são sensíveis ao modelo, as variáveis utilizadas, a base de dados e a forma funcional, como argumenta De Bruyn (2000). O modelo em si está restrito a um número reduzido de poluentes para que seja válida a hipótese de uma curva em formato de "U" invertido.

Arrow et al. (1995) apontaram algumas imprecisões do modelo, a saber: 1) A curva em formato de "U" invertido geralmente não é válida para indicadores de estoque de recursos naturais. Para os autores a CKA só considera a emissão de alguns poluentes, negligenciando os limites ecossistêmicos. Ao utilizar variáveis de fluxo, como geralmente é feito se perde a capacidade de analisar os efeitos cumulativos da degradação ambiental e da poluição; 2) A curva não permite avaliar globalmente, apenas localmente, tendo em vista que por meio do comércio internacional pode haver transferência dos locais de poluição; 3) A melhora ambiental por mudanças institucionais pode não ser efetiva em termos intergeracionais.

Um dos pontos levantados por Özokcu e Özdemir (2017) é que mesmo considerando válida a hipótese de crescimento econômico seja benéfica ao meio ambiente no longo prazo, os danos ambientais causados no curto prazo podem ser irreversíveis. As autoras ainda questionam algumas limitações teóricas do modelo como o fato de que o ponto de inflexão encontrado pode não ser compatível com a preservação ambiental, pois, o ponto máximo da CKA não poderia superar a resiliência e a capacidade adaptativa dos ecossistemas.

Jackson (2009) também levanta a questão acerca da relação entre os limites da sustentabilidade e o crescimento econômico. Para o autor não é válida a ideia de que é possível separar o ritmo da poluição e degradação ambiental do processo de crescimento econômico. Em seu estudo, o autor observou que em alguns países desenvolvidos como Japão, Alemanha e Holanda houve uma diminuição da intensidade do uso de recursos naturais, dito de outra forma, houve um aumento da eficiência produtiva. No entanto, ao analisar globalmente a intensidade do uso de recursos naturais têm aumentado constantemente, em particular houve um aumento expressivo na emissão de GEE advindo da utilização de combustíveis fósseis. O que tem se verificado empiricamente é que a busca constante pelo crescimento econômico e o aumento populacional tem acarretado maior pressão ambiental.

Um dos pressupostos para validar a CKA é que à medida que se dá o progresso econômico e o país se torna desenvolvido verifica-se a predominância dos efeitos técnicos e composição sob o efeito escala, dessa forma há uma inversão na trajetória da relação entre o

crescimento e a degradação ambiental. No entanto, se não existirem alterações no padrão de consumo o que ocorrerá na prática é a realocação internacional da produção (LOPES, 2013). Como foi apontado Jackson (2009) apesar de localmente ser possível separar o crescimento econômico da degradação e poluição ambiental, globalmente isto não é possível devido a presença do comércio internacional. De acordo com os autores, uma nação desenvolvida poderia simplesmente transferir suas indústrias intensivas na utilização de recursos naturais e poluidoras para nações menos desenvolvidas ou com regulação ambiental mais frágil. Desta forma, a CKA só seria válida para os países mais desenvolvidos ou com uma regulação ambiental mais rígida, de modo que nos países menos desenvolvidos haveria sempre uma correlação positiva entre degradação ambiental e crescimento econômico.

Mesmo que a hipótese da CKA seja aceita com base em estudos empíricos é preciso cautela na interpretação de seus resultados já que o modelo não leva em conta a capacidade de carga do planeta, não considera a degradação acumulada e nem se os danos causados ao meio ambiente podem revertidos apenas com a diminuição das emissões. Ainda que a existência de uma Curva de Kuznets Ambiental não possa ser generalizada dada a complexidade entre a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental, muitos trabalhos empíricos apontam evidências de uma CKA para alguns tipos de poluentes, além de ser possível detectar os efeitos escala, composição e tecnológico que são importantes para analisar a relação entre o crescimento da economia e o meio ambiente.

3 Metodologia

3.1 Dados em Painel

Diferentemente dos modelos de regressão com séries temporais e o *cross-section*, os dados em painel possuem dois subscritos em suas variáveis (BALTAGI, 2005). O modelo geral pode ser representado por:

$$y_{it} = \beta_{0it} + \beta_{1it}\, x_{1it} + \ldots + \beta_{nit} x_{kit} + u_{it} \qquad i = 1, \ldots N; t = 1, \ldots T \tag{1}$$

Os subscritos i e t representam a dimensão transversal e temporal respectivamente, *N* é o número de indivíduos e *T* é o número de observações no tempo.

Na notação matricial o modelo geral é representado por:

$$y_{it} = \alpha + x'_{it}\, \beta_{1it} + u_{it} \tag{2}$$

Onde y_{it} é a variável dependente com um vetor T x 1 das observações de y, α é um escalar, x_{it} é uma matriz de dimensões T x K das variáveis explicativas, β é um vetor K x 1 dos parâmetros a serem estimados, e u_{it}, os distúrbios não observados com um vetor de dimensão T x 1.

Em relação aos distúrbios não observados, a maioria das aplicações de dados de painel utiliza um modelo de componente de erro unilateral (BALTAGI, 2005), que pode ser expresso pela seguinte equação:

$$u_{it} = \mu_{it} + v_{it} \tag{3}$$

Em que expressa μ_{it} o efeito não observável específico dos indivíduos que são constantes ao longo do tempo, e v_{it} é o termo de erro idiossincrático, ou seja, que varia aleatoriamente para os indivíduos e o tempo.

No modelo geral (2) o intercepto e os coeficientes estimados são diferentes para cada unidade de corte transversal e para cada período de tempo, desta forma há mais parâmetros do que observações. Para tornar possível a estimação do modelo é necessário impor algumas restrições ao modelo geral. Os principais modelos para a estimação com dados em painel são: *Pooled*, Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios. De maneira geral, a principal diferença entre eles está nas hipóteses adotadas acerca das características específicas não observadas dos indivíduos.

O modelo mais simples para dados em painel é o *Pooled* que consiste em estimar uma regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) desconsiderando as características de dados em painel. Desta forma, assume-se a hipótese que todas as unidades de corte transversal, que no caso deste trabalho são os países que compõem o BRICS, tem um intercepto comum assim como os coeficientes das variáveis explanatórias para todas as unidades do *cross-section*.

Ao empilhar os dados de natureza temporal e de corte transversal ignora-se a heterogeneidade dos indivíduos o que pode conduzir a erros de viés e inconsistência, pois, as características dos indivíduos, que não são diretamente observáveis, serão incluídas no termo de erro e existe a possibilidade de correlação entre os regressores e os resíduos.

Para que o modelo de dados empilhados estimados por MQO seja consistente e não viesado é necessário que o efeito individual não seja correlacionado com os regressores: cov (X_t, c) = 0, em que X_t são as variáveis explicativas e "c" a heterogeneidade não observada. Caso cov (X_t, c) ≠ 0, o modelo será inconsistente e viesado.

O modelo de efeitos fixos permite incluir os efeitos específicos que variam entre as unidades de corte transversal, mas que são constantes ao longo do tempo. Neste modelo os coeficientes dos regressores são os mesmos para cada indivíduo e para cada período de tempo, variando somente os interceptos para cada unidade tornando possível controlar os efeitos individuais não observados.

O modelo geral para efeitos não observados pode ser definido por:

$$y_{it} = x_{it}\beta + c_i + u_{it} \quad (4)$$

Em que c_i é o componente não observável ou variável latente que varia entre os indivíduos, mas que são invariantes no tempo. O u_{it} é o termo de erro idiossincrático, pois varia aleatoriamente para todos os indivíduos e períodos (WOOLDRIDGE, 2010).

Uma forma de incluir a heterogeneidade individual é criar um modelo de efeitos fixos com variáveis *dummies* (MQVD) em que cada unidade de corte transversal tem um coeficiente linear por meio da inclusão da técnica de variáveis binárias de intercepto diferencial. Para não incorrer no problema de multicolinearidade perfeita o número de *dummies* inseridas no modelo deve ser igual a N-1.

A formulação do modelo MQVD pode ser escrita como:

$$y_i = \alpha + x_i\beta + D_i\rho_i + u_i \quad (5)$$

Em que D é a variável *dummy*, sendo igual a um quando i = n e zero quando não satisfazer esta condição. Desta forma quando i = 1 o intercepto desta unidade da *cross section* será α, e para o caso de i ≥ 2 o intercepto será $\alpha + \rho_i$.

No modelo de efeitos fixos a hipótese de que cov (X_t, c) = 0 é relaxada, no entanto, o MQVD consome muitos graus de liberdade, especialmente se o N for grande e o T for pequeno pode se tornar inviável a estimação.

O modelo de componente de erros (MCE) ou modelo de efeitos aleatórios pressupõe que cada indivíduo possui um intercepto assim como no modelo de efeitos fixos, no entanto,

neste último o coeficiente é constante ao longo do tempo. Já no MCE os interceptos são randômicos, isto é, as características específicas são consideradas um componente aleatório e não são correlacionadas com os regressores. Os valores do intercepto são extraídos aleatoriamente e como não é possível obter o valor exato de cada unidade este valor ficará em torno da média de uma população maior de indivíduos.

Considerando a seguinte equação:

$$y_i = \bar{\alpha} + \varepsilon_i + x_i\beta + u_{it} \quad (6)$$

O termo $\bar{\alpha}$ corresponde ao intercepto populacional e o termo $\bar{\alpha} + \varepsilon_i$ é o intercepto individual, sendo ε_i o componente específico (heterogeneidade individual) e u_{it} o termo de erro idiossincrático, ou seja, que varia com o tempo e com as unidades de corte transversal.

A equação (6) pode ser reescrita de forma a se obter um modelo geral para efeitos aleatórios:

$$y_i = \bar{\alpha} + x_i\beta + v_{it} \quad (7)$$

Sendo:

$$v_{it} = \varepsilon_i + u_{it} \quad (8)$$

Com o intuito de verificar qual é melhor técnica das três até então apresentadas para a estimação de um modelo de regressão de dados em painel pode-se realizar alguns testes estatísticos como o teste de restrição (teste F), Breusch-Pagan e o teste de Hausman.

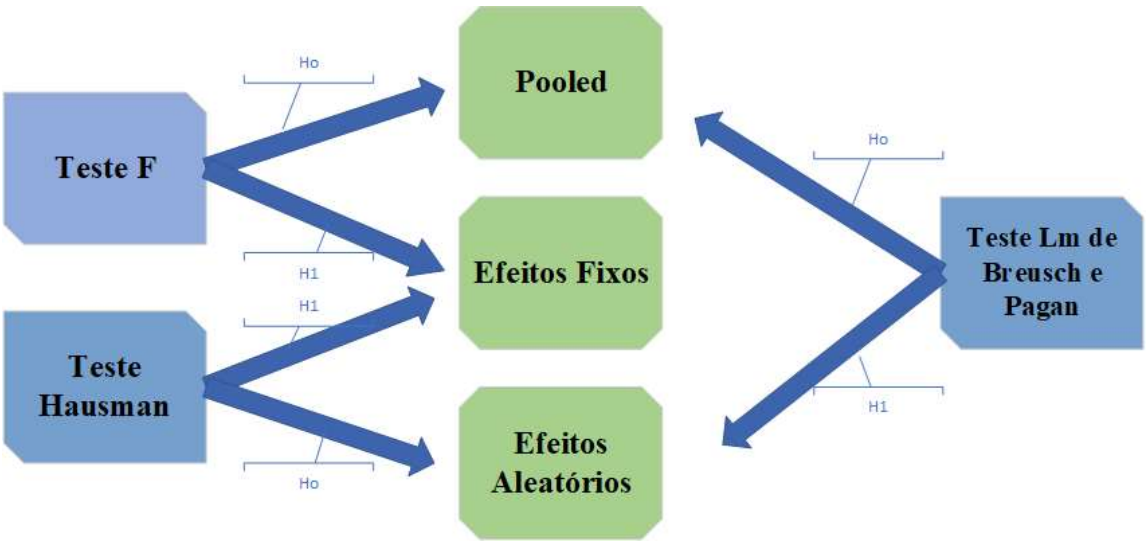
O teste F permite decidir entre os modelos *Pooled* e o de efeitos fixos, tendo como hipótese nula de que todos os indivíduos possuem o mesmo intercepto. Detectada a existência de correlação serial nos resíduos, o modelo de dados empilhados se mostra mais adequado do que o de efeitos fixos. O baixo p valor baixo obtido no teste F indica que a hipótese nula deve ser rejeitada e que neste caso o modelo de efeitos fixos é mais adequado.

Por meio do teste de Breusch-Pagan é possível fazer uma comparação entre o *Pooled* e o modelo de efeitos aleatórios. A hipótese nula do teste do multiplicador de Lagrange de Breusch-Pagan é de que a variância do termo específico é zero, o que corrobora para indicar a ausência de componentes não observáveis para cada unidade de corte transversal. A não rejeição da hipótese nula indica que o *Pooled* é mais adequado enquanto aceitar a hipótese alternativa indica que o MCE é melhor para os dados em análise.

Por fim, o teste de Hausman permite avaliar os modelos de efeitos fixos e o modelo de efeitos aleatórios. A hipótese nula do teste de Hausman é que os estimadores do modelo de efeito fixo e do modelo de componentes dos erros não diferem substancialmente. É válido ressaltar que as estimações do MCE são mais eficientes, pois, possuem menor variância, enquanto o modelo de efeitos fixos é mais consistente, portanto, se a hipótese nula for aceita o modelo de efeitos aleatórios é mais adequado para explicar os dados. Caso a hipótese alternativa não seja rejeitada, isto quer dizer que o efeito específico é correlacionado com as variáveis explanatórias, sendo o modelo de efeitos fixos preferível para a estimação. No caso contrário, com o valor alto da probabilidade a suposição é de que o componente específico não está correlacionado com os regressores, sendo preferível o modelo de efeitos aleatórios.

Na figura 1 é apresentado um resumo com os três testes de especificação do modelo de regressão de dados em painel com suas respectivas hipóteses nulas e alternativas.

Figura 1: Resumo dos testes de especificação do modelo



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Descrição dos Dados

O modelo estimado para testar a hipótese da curva de Kuznets ambiental consiste em um painel balanceado. O painel conta com 5 unidades de corte transversal, que são os países do BRICS: Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul. A dimensão temporal tem frequência anual e compreende o período de 1992 até 2019 para todos os países. Trata-se, portanto, de um painel longo (N < T) com 140 observações.

Para testar a validade da hipótese da curva ambiental de Kuznets todas as variáveis foram tomadas em logaritmo, de forma que será possível obter as respectivas elasticidades, além de reduzir possíveis problemas de heterocedasticidade. A equação que representa o modelo econométrico a ser estimado pode ser representado por:

$$lnCO_2pc = \beta_0 + \beta_1 lnPIBpc + \beta_2(ln\text{PIB})^2 + \beta_3(ln\text{PIB})^3 + \beta_4 lnCEpc + \beta_5 lnVC + \beta_6 PQ + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

A emissão de CO_2 per capita (CO_2pc) foi utilizada como variável dependente sendo uma proxy para a degradação ambiental. As emissões de dióxido de carbono são provenientes da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento e sua inclusão no modelo se deve ao fato de que é um dos gases mais importantes na geração do efeito estufa. Considerando a variabilidade do tamanho da população nos países selecionados, utilizou-se os dados per capita para que sejam comparados de forma adequada. Os dados foram obtidos por meio do portal *Our World in Data* com base no *Global Carbon Project* e estão expressos em toneladas métricas.

O consumo de energia per capita (CEpc) representa o consumo total de energia primária dividido pela população do país. Pressupõe-se que esta variável tenha uma relação positiva com o regressando, já que o aumento da demanda por energia gera impactos ambientais. Esses efeitos, no entanto, são distintos a depender da matriz energética de cada país. Os dados estão expressos em quilowatt-hora (kWh) e foram coletados da *International Energy Agency* (IEA).

A variável PIBpc representa o PIB em termos reais dividido pela população do país sendo expresso em dólares de 2010. Os dados foram obtidos por meio do *World Development Indicators* (WDI). A inclusão desta variável no modelo empírico permite avaliarmos a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental, em que neste caso o regressando será a emissão de CO_2 per capita. Para que seja válida a CKA uma das condições necessárias é que o coeficiente deste indicador seja positivo.

Produto Interno Bruto per capita ao quadrado (PIB^2): Para testar a hipótese de que a CKA segue uma trajetória de "U" invertido é imprescindível inserirmos no modelo econométrico o termo ao quadrado da variável de renda (PIB^2). Caso o termo PIB per capita tenha um coeficiente positivo e o seu termo ao quadrado tiver um coeficiente negativo, sendo os parâmetros estatisticamente significantes a hipótese da CKA é válida. O ponto de máximo da curva será dado por: $PIBpc^* = EXP\frac{-\beta_1}{2\beta_2}$, para o caso em que as variáveis estão expressas em logaritmo, onde o resultado representa o valor da renda per capita em que há inversão da trajetória da curva.

Ao adicionar o termo ao cubo do PIB per capita (PIB^3)pode-se verificar a existência de curva em formato de "N". Para tal, além do coeficiente do PIB per capita ser positivo e o termo ao quadrado negativo, o termo ao cubo deve ser também deve ser positivo para que a curva em formato de "N" seja válida.

A variável de comércio (VC) expressa em termos percentuais a razão da soma das importações e exportações sobre o PIB. Este dado foi coletado por meio do WDI. A inclusão deste indicador permite inferir como o grau de abertura comercial pode impactar o meio ambiente.

Também foi incluída no modelo uma *dummy* de dimensão temporal para avaliar como o Protocolo de Quioto (PQ) impactou nas emissões de dióxido de carbono nos países emergentes selecionados. Foram atribuídos valor zero de 1992 até 2004 e valor um a partir de 2005.

De acordo com Grossman e Krueger (1995) a análise da estimação da curva de Kuznets ambiental deve ser feita com base nos sinais e na magnitude dos parâmetros das variáveis explicativas, nenhuma inferência deve ser realizada em relação aos valores dos parâmetros com o regressando, a análise deve ser pautar em verificar se os sinais dos coeficientes estão condizentes com a teoria e se são estatisticamente significantes. Previamente a estimação, na tabela 1 é apresentada uma síntese com as principais estatísticas descritivas das variáveis que serão utilizadas no modelo econométrico.

Tabela 1: Estatísticas descritivas

Variáveis	CO2pc	VC	CEpc	PIBpc
Média	5,49705	42,86	23.005,40	6.070,87
Mediana	4,55093	45,71	17.095,39	6.481,59
Desvio padrão	3,94296	15,53	17.292,04	3.667,89
Mínimo	0,72167	15,64	2.790,49	595,01
Máximo	13,2034	110,58	64.265,19	12.011,53

Fonte: Elaboração própria.

4 Análise de Resultados

4.1 Estimações Econométricas

Para verificar a validade da hipótese da CKA foram estimados os modelos de efeitos fixos e o modelo de efeitos aleatórios, o modelo *pooled* foi estimado, mas os sinais dos parâmetros não foram condizentes com a teoria, apresentando viés de especificação. Portanto, para efeito de comparação serão apresentados os dois primeiros modelos citados anteriormente. Ressalta-se que a análise dos modelos estimados se limita a verificar se os parâmetros são significantes estatisticamente e se correspondem ao que é esperado pela teoria, sendo que nenhuma inferência pode ser feita entre os valores dos coeficientes dos regressores com a variável dependente conforme já indicado por Grossman e Krueger (1995).

No modelo MQVD intercepto é diferente para cada unidade da *cross-section*, que neste caso são os países do BRICS, no entanto, o efeito das variáveis independentes são os mesmos em relação à variável dependente para as unidades do painel, isto é, os coeficientes dos regressores não variam entre as unidades.

Na tabela 2 estão os valores do intercepto de cada país. Os interceptos individuais de todos os países foram significantes ao nível de 1%. Esta diferença entre os valores evidencia a heterogeneidade entre os países, indicando que existem características individuais como as decisões políticas, as atividades econômicas, entre outros fatores que não são captadas pelas demais variáveis independentes. É possível atribuir fórmulas de regressão distintas para cada país variando somente o intercepto e mantendo os demais parâmetros. Desta forma, o coeficiente linear para explicar as emissões de dióxido de carbono se inicia em pontos diferentes para cada país, mas seguem uma trajetória em comum em função das demais explicativas utilizadas no modelo empírico.

Tabela 2: Interceptos individuais do modelo com variáveis *dummies*.

Unidades	***Coeficiente***	***Erro Padrão***	***z***	***p-valor***	
Brasil	-18,8160	3,5895	-5,2420	6,31E-04	***
China	-18,2182	3,5931	-5,0703	1,35E-03	***
Índia	-18,2584	3,5816	-5,0978	1,20E-03	***
Rússia	-18,5426	3,6058	-5,1425	9,81E-04	***
África do Sul	-18,0607	3,5923	-5,0276	1,62E-03	***

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: ***significativo a 1%; **significativo a 5%; *significativo a 10%.

Na tabela 3 verifica-se os resultados do modelo de efeitos fixos com a inclusão da técnica de variáveis binárias de intercepto diferencial. Neste caso temos *dummies* para o efeito de tempo com a inclusão de uma *dummy* para mensurar o efeito do protocolo de Quioto (PQ), além de variáveis binárias para o efeito individual. Caracteriza-se, portanto, um modelo de efeitos fixos bidirecionais (*two-way*).

Nesta tabela, são mostrados os resultados da estimação por MQVD onde é possível observar os valores dos coeficientes *dummies*, das variáveis independentes, os erros-padrões, as estatísticas de teste e os valores de probabilidade. Ao ser verificado por meio de testes problemas de heterocedasticidade e autocorrelação foi estimado uma nova regressão com erros-padrões robustos pelo procedimento de Arellano.

Neste modelo a variável de comércio não se mostrou significativa, já os interceptos e a variável consumo de energia per capita foram significantes ao nível de 1%. O sinal da variável

"CEpc" corresponde ao esperado pela teoria havendo uma relação positiva entre as emissões de CO_2 per capita e a demanda por energia, tendo em vista que a matriz energética do BRICS é constituída predominantemente por fontes não renováveis de energia fica evidente que quanto maior o consumo de energia maiores serão as emissões de dióxido de carbono.

A variável *dummy* inclusa no modelo para mensurar os efeitos do protocolo de Quioto não foi estatisticamente significante. Mesmo após assinado o acordo houve um aumento das emissões de CO_2 no BRICS o que pode ser explicado pelo fato de que diferentemente dos países desenvolvidos, os países emergentes não tinham a obrigação de reduzirem as emissões. Tendo em vista a relação positiva entre crescimento econômico e emissão de poluentes, o argumento utilizado era que os emergentes deveriam priorizar políticas em prol do crescimento econômico em detrimento de políticas de redução de poluentes.

Em relação as variáveis de renda, todas foram estatisticamente significantes e condizentes com uma curva em formato de "N". Ou seja, nos estágios iniciais há aumento da degradação até ser atingido um ponto de máximo em que a partir deste ponto a degradação ambiental diminui à medida que se dá o crescimento econômico até atingir um ponto de mínimo em que há uma nova reversão e os indicadores de qualidade ambiental pioram.

Como as variáveis estão logaritmizadas, os coeficientes estimados correspondem a elasticidade do regressando em relação aos regressores. Neste caso para uma variação de 1% no PIB per capita, as emissões de dióxido de carbono aumentam em cerca de 3,6%. Já para uma variação de 1% no consumo de energia per capita, as emissões de CO_2 aumentam e aproximadamente 1,1%.

Tabela 3: Modelo de Efeitos Fixos (MQVD)

Variável dependente: ln CO_2pc
Painel balanceado: n = 5, T = 28, N = 140

Variáveis	***Coeficiente***	***Erro Padrão***	***z***	***p-valor***	
const	-18,8160	5,1770	-3,6346	0,0004	***
ln VC	-0,0138	0,0457	-0,3031	0,7618	
ln CEpc	1,0846	0,0584	18,5823	2,00E-16	***
ln PIBpc	3,6137	1,8362	1,9681	0,0491	**
ln PIB²pc	-0,4536	0,2293	-1,9777	0,0480	**
ln PIB³pc	0,0184	0,0094	1,9543	0,0507	*
PQ	0,0169	0,0275	0,6165	0,5376	
as.factor China	0,5978	0,0331	18,0649	2,20E-16	***
as.factor Índia	0,5577	0,0299	18,6370	2,20E-16	***
as.factor Rússia	0,2734	0,0542	5,0447	1,51E-06	***
as.factor África do Sul	0,7553	0,0327	23,0982	2,20E-16	***
Média var. dependente	1,3578				
R-quadrado MQVD	0,9987		R-quadrado ajustado	0,9839	
F(6, 4)	957,3050		P-valor(F)	2,90E-06	

Fonte: Elaborado pela autora.
Nota: ***significativo a 1%; **significativo a 5%; *significativo a 10%.
Obs: Estimação realizada com erros padrão robustos à heteroscedasticidade e autocorrelação pelo método Arellano.

No que diz respeito ao ponto de inflexão, isto é, o ponto em a concavidade da curva muda de sinal, o valor encontrado foi de US$ 3.732,61. Ponto ultrapassado pela maioria dos países que compõem o BRICS.

O MCE apresentou os melhores resultados, como pode ser observado na tabela 4, os parâmetros tiveram significância estatística pelo menos ao nível de 5% de significância (com exceção da variável de comércio e a *dummy* para o protocolo de Quioto) e condizentes com a teoria. Para o modelo de efeitos aleatórios utilizou-se o estimador MQG, pois foi constatada a presença de heterocedasticidade. Em casos de presença de heterocedasticidade o estimador MQG gera estimativas mais eficientes do que o MQO.

Tabela 4: Modelo de efeitos aleatórios

Variável dependente: ln CO_2pc

Painel balanceado: n = 5, T = 28, N = 140

Variáveis	***Coeficiente***	***Erro Padrão***	***z***	***p-valor***	
const	-18,3017	3,5852	-5,1048	<0,0001	***
ln VC	-0,0137	0,0198	-0,6917	0,4891	
ln CEpc	1,0865	0,0396	27,4394	<0,0001	***
ln PIBpc	3,5806	1,3395	2,6731	0,0075	**
ln PIB^2pc	-0,4495	0,1708	-2,6320	0,0085	**
ln PIB^3pc	0,0182	0,0072	2,5311	0,0114	**
PQ	0,0176	0,0118	1,4935	0,1353	
Componentes de erros	Variância	Desvio padrão	*Share*		
Idiossincrático	0,00105	0,03240	0,012		
Individual	0,08987	0,29978	0,988		

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: ***significativo a 1%; **significativo a 5%; *significativo a 10%.

Obs: Estimação do modelo de efeito aleatórios por MQG (robustos à presença de heterocedasticidade) utilizando transformação de Nerlove.

A variável de comércio, que mede o grau de abertura comercial, apresentou sinal negativo, mas não foi significativa. Conforme pode ser observado na trajetória de emissões CO_2 no BRICS, o protocolo de Quioto não teve o efeito esperado nem para os países desenvolvidos e muitos menos para os emergentes em análise que partilhavam do princípio de responsabilidades, porém diferenciadas. Dessa forma, os emergentes que assinaram o acordo não tinham a obrigação de reduzirem a emissão de poluentes, e, portanto, não reduziram. Esse aumento das emissões pelo BRICS pode ser explicado pelo rápido crescimento econômico do grupo principalmente na década de 2000.

O consumo de energia per capita apresentou coeficiente significante e maior que zero de acordo ao esperado pela teoria. Os resultados evidenciam que o aumento do consumo de energia nos países em análise implica em maiores emissões de poluentes.

As variáveis de renda PIB per capita e seus termos ao quadrado e ao cubo foram estatisticamente significativos ao nível de 1% e os sinais condizentes com a teoria. Os termos PIBpc e o PIB^3pc tiveram seus sinais positivos enquanto o termo quadrático obteve sinal

negativo, o que significa que as emissões de carbono seguem uma trajetória de "N" à medida que aumenta a renda per capita, ou seja, as emissões atingem um ponto de máximo onde uma ocorre uma inflexão e a emissão de poluentes diminui depois atingem um ponto de mínimo em que ocorre uma nova inversão da trajetória e as emissões voltam a aumentar. O ponto de inflexão encontrado para o modelo de efeito aleatórios foi de US$ 3.749,00.

Os resultados corroboram para indicar a alta sensibilidade do modelo à especificação econométrica e a base de dados utilizada. No trabalho pioneiro de Grossman e Krueger (1991), os autores encontraram evidências para uma curva em formato de "N" para explicar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental. No artigo de Ávila e Diniz (2015) em que foram utilizados 99 países para um período de 37 anos também encontram evidências para uma trajetória em formato de "N".

Comparando com o trabalho de Castro, Alves e Andrade (2019), que também foi feito para o BRICS, as diferentes metodologias adotadas e a diferença da dimensão temporal culminaram em resultados também distintos. Neste último, o horizonte temporal maior indicou evidências para uma CKA em formato de "U" invertido.

4.2 Testes de especificação do modelo

Para verificar a validade da hipótese da CKA foram estimados os modelos pooled, efeitos fixos e de efeitos aleatórios. Para avaliar qual dos modelos melhor se adequa a base de dados utilizada foram realizados testes de especificação do modelo cujos resultados estão expressos na tabela 5.

Tabela 5: Teste de especificação do modelo

	Estatística de teste	p-valor	Resultado
Teste F	F (4, 240) = 669,21	2,20E-16	Efeitos fixos
Teste Breusch Pagan	χ^2 = 444,42	2,20E-16	Efeitos Aleatórios
Teste Hausman	χ^2 = 1,5547	0,9558	Efeitos Aleatórios

Fonte: Elaborado pela autora.

No teste de Hausman, a hipótese nula indica que a estimação de efeitos fixos e efeitos aleatórios não diferem substancialmente, sendo este último preferível por ser mais eficiente. Os resultados do teste de Hausman indicaram que não rejeita-se a hipótese nula e que, portanto, a estimação por MQG é consistente sendo o modelo de efeitos aleatórios preferível para explicar o modelo.

No teste F a hipótese nula é de que os interceptos não variam entre as unidades, sendo esta hipótese não rejeitada o modelo de dados empilhados seria preferível. Como é possível observar o p-valor baixo indica a rejeição da hipótese nula e o modelo com efeitos é mais adequado.

Em relação ao teste do multiplicador de Lagrange de Breusch-Pagan a hipótese nula é de que a variância do termo específico é zero, isto é, indica a ausência de termos não observáveis para as unidades. A rejeição da hipótese nula revela que o modelo de efeitos aleatórios é mais adequado para explicar os dados.

5 Considerações Finais

Ressalta-se que a conservação de recursos naturais não pode ser vista como um entrave ao desenvolvimento, pelo contrário não preservar o capital natural acarreta grandes custos econômicos e sociais. Desta forma, a preservação ambiental é de extrema importância para o desenvolvimento de uma nação.

Dada a sua maior relevância no que tange aos aspectos econômicos e no cenário geopolítico, o bloco BRICS tem um papel fundamental para enfrentar às mudanças climáticas por estarem entre os países que mais emitem GEE. Sobretudo, o crescimento econômico desses países se deu através de atividades produtivas que utilizam intensivamente os recursos naturais, além disso, suas matrizes energéticas são altamente dependentes do uso de combustíveis fósseis.

Um dos objetivos centrais deste trabalho foi a necessidade de analisar se a trajetória de crescimento dos países do grupo BRICS converge ao desenvolvimento sustentável. Para tal, utilizou-se a abordagem da curva de Kuznets ambiental, para verificar a relação entre o crescimento econômico e as emissões de dióxido de carbono, um dos principais gases do efeito estufa.

Os resultados obtidos através da estimação da curva de Kuznets ambiental corroboraram para a ideia de que o efeito escala, portanto, a relação positiva entre crescimento econômico e degradação ambiental, predomina sobre os efeitos técnicos e de composição produtiva. Os resultados do modelo de efeitos aleatórios e o modelo de efeitos fixos apontaram uma curva em forma de "N" com pontos de inflexão de US$ 3.749,00 e US$ 3.732,61, respectivamente. O protocolo de Quioto não teve o impacto esperado, o coeficiente estimado não significância estatística, corroborando com o fato de que houve aumento das emissões mesmo após a assinatura do acordo. Os resultados empíricos indicaram que acordos internacionais, como o protocolo de Quioto não foram suficientes para que o crescimento econômico se desse de maneira ecologicamente sustentável. Já a variável consumo de energia per capita foi significante e positiva de acordo ao esperado pela teoria, e tendo a predominância de fontes não renováveis no BRICS, fica evidente que o aumento do consumo de energia nos países em análise implica em maiores emissões de poluentes.

É importante destacar que as evidências empíricas obtidas nesse trabalho estão de acordo com Grossman e Krueger (1991, 1995), Castro e Alves (2018) e Sereno e Andrade (2019), no sentido de que foi verificada a curva de Kuznets em formato de "N". Comparando ao resultado de Castro, Alves e Andrade (2019) feito para o BRICS, apesar de terem utilizado variáveis semelhantes, a metodologia utilizada e período de tempo foram diferentes. Estes autores encontraram evidências de uma curva em formato de "U" invertido. Portanto, é importante frisar que as evidências aqui encontradas são sensíveis às variações na especificação econométrica, sendo este fator uma importante limitação da CKA.

É preciso cautela na intepretação dos resultados da CKA, já que o modelo não leva conta a capacidade de carga do planeta, não considera a degradação acumulada e nem se os danos causados ao meio ambiente podem ser revertidos apenas com a diminuição das emissões, além de ser sensível às variáveis utilizadas.

Outra importante limitação no modelo estimado, se deu justamente em como captar os efeitos das mudanças tecnológicas, para tal optou-se por trabalhar com uma dimensão temporal menor que ainda assim foi possível analisar qual o impacto de acordo internacionais, como o protocolo de Quioto no enfrentamento das mudanças climáticas.

Seria interessante também em futuros trabalhos utilizar outras variáveis de degradação ambiental para testar a validade da hipótese da curva de Kuznets ambiental, além de fazer uma análise comparativa entre países desenvolvidos e países emergentes com intuito de analisar se

há diferenças significativas na trajetória de crescimento econômico no sentido de que se estas convergem ou não ao desenvolvimento sustentável.

No que concerne ao enfrentamento das mudanças climáticas por meio da redução das emissões de GEE, observa-se que no grupo BRICS, os assuntos relacionados à problemática ambiental permanecem no campo do discurso, com pouquíssimos esforços práticos, o que distancia ainda mais de uma possível cooperação entre eles para a descarbonização da matriz energética.

De fato, os países do BRICS têm o setor de serviços como maior parcela do PIB, o que se levar em conta o efeito composição, essas economias deveriam ser em tese menos poluentes, mas, o que se observou ao longo dos anos foi o aumento significativo das emissões à medida que suas economias cresciam. No que tange a transição da matriz energética para fontes de menor impacto, ainda há um longo caminho a percorrer, pois, neste grupo de emergentes predomina o uso de fontes não renováveis de energia.

O conjunto de países em desenvolvimento que formam o BRICS possuem estruturas institucionais e aspectos sociais, políticos, econômicos e culturais bastante distintos entre si, por conseguinte, a transição para economias ambientalmente mais sustentáveis se dará também de maneira particular, pois cada país possui vantagens e desafios específicos. A cooperação entre esses países e o processo de difusão de novas tecnologias capazes de mitigar os impactos ambientais juntamente com mudanças no padrão de consumo e políticas ambientais eficazes são importantes meios para atingir o desenvolvimento sustentável.

6. Referências

ABRAMOVAY, Ricardo. **Muito além da economia verde**. São Paulo: Editora Abril, 2012.

ALVARENGA, Samia Mercado; SOBRINHO, Valny Giacomelli. Indutores de impactos ambientais: uma análise comparativa entre BRICS E G7 (1992-2013). **Revista Economia Ensaios**, v. 32, n. 2, 2018.

ÁVILA, Ednilson Sebastião de; DINIZ, Eliezer Martins. Evidências sobre curva ambiental de Kuznets e convergência das emissões. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 45, n. 1, p. 97-126, 2015.

BALTAGI, Badi. **Econometric analysis of panel data**. John Wiley & Sons, 2005.

BIAGE, Milton. Relação entre crescimento econômico e impactos ambientais: uma análise da curva ambiental de Kuznets. **Revista Economia Ensaios**, v. 27, n. 1, 2012.

BIAGE, Milton; ALMEIDA, Helberte João França. Desenvolvimento e impacto ambiental: uma análise da Curva Ambiental de Kuznets. **Pesquisa e Planejamento econômico**, v. 45, n. 3, p. 1-52, 2015.

CARVALHO, Sandro Sacchet de. **A relação entre crescimento e o meio ambiente: uma reavaliação da curva de Kuznets ambiental**. IPEA: Texto para Discussão, 2013.

CASTRO, Alisson Silva de. **Crescimento econômico e emissões de CO_2 nos países do BRICS: uma análise de cointegração em painel**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2017.

CASTRO, Alisson Silva de; ALVES, Janaina da Silva; ANDRADE, Daniel Caixeta. Crescimento econômico e emissões de CO_2 no BRICS: Uma análise de cointegração em painel. **Economia Aplicada**, v. 23, n. 2, p. 183-208, 2019.

CUNHA, Cleyzer Adrian; SCALCO, Paulo Roberto. Crescimento econômico brasileiro e emissão de CO_2. **Redes (St. Cruz Sul, Online)**, v. 18, n. 2, p. 214-230, 2013.

DE BRUYN, Sander M. Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing sulphur emissions. **Environment and development economics**, p. 485-503, 1997.

FLORES, Rousbell Jusselff Gamez. **Teste da hipótese da curva de Kuznets ambiental para os países do BRICS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2017.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. Disponível em: < https://www.footprintnetwork.org/>. Acesso em: 04 abr. 2021.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Environmental of a North American Free Trade Agreement. **National Bureau Economic Research.** Working Paper N.° 3914, 1991.

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

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria Básica.** 5ªed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011..

HSIAO, Cheng. **Analysis of panel data**. 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Disponível em: < https://www.iea.org/>. Acesso em: 17 fev. 2021.

JACKSON, Tim. **Prosperidade sem crescimento**: Economia para um Planeta Finito. São Paulo: Planeta Sustentável, 2013.

KUZNETS, Simon. Economic Growth and Income Inequality. **The American Economic Review**, vol. 45, no. 1, 1955, pp. 1–28, JSTOR. Disponível em: < https//www.jstor.org/stable/1811581>. Accesso 02 abr. 2021.

LOPES, Guilherme Byrro. **Um estudo sobre a Curva Ambiental de Kuznets e a convergência da pegada ecológica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013.

LUCENA, André Frossard Pereira de. **Estimativa de uma curva de Kuznets ambiental aplicada ao consumo de energia e às emissões de carbono do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

MACEDO, Rodrigo Campos. Resenha: SACHS, Ignacy. Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado. Rio de Janeiro. Ed. Garamond. p.151. 2004. **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, v. 10, n. 20, 2015.

MATOS, Richer de Andrade; ROVELLA, Syane Brandão Caribé. Do crescimento econômico ao Desenvolvimento Sustentável: Conceitos em evolução. **Anais da Administração e Ciências Contábeis**, v. 6, n. 3, 2010.

MAY, Peter; LUSTOSA, Maria Cecília; VINHA, Valéria. **Economia do meio ambiente**. Elsevier Brasil, 2010.

MIRANDA, Luiz Ricardo de; NETO, Olavo de Oliveira Bittencourt. **BRICS e o Meio Ambiente**. JUSTIÇA DO DIREITO v. 32, n. 1, p. 188-202, jan./abr. 2018

MORAIS, Alex Eugênio Altrão de. **A Curva Ambiental de Kuznets para emissão de CO_2 no Brasil: uma análise com cointegração em painel**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2019.

MOURA, Adriana Maria Magalhães; ROMA, Júlio César; SACCARO JÚNIOR, Nilo Luiz. Problemas Econômicos, Soluções Ambientais. **Boletim Regional Urbano e Ambiental.** Brasília: IPEA. v.15. jul-dez, 2016.

O'NEILL, Jim. **The growth map: economic opportunity in the BRICs and beyond**. Penguin UK, 2011.

O'NEILL, Jim. **BRICS and Beyond**. Londres: Goldman Sachs Group, Inc, 2007, p. 105-106. Disponível em: < http://www2.goldmansachs.com/ideas/brics/book/BRIC-Full.pdf >. Acesso em: 10 abr. 2021.

OUR WORLD IN DATA. Disponível em: < https://ourworldindata.org/>. Acesso em: 17 fev. 2021.

ÖZOKCU, Selin; ÖZDEMIR, Özlem. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. **Renewable and Sustaineble Energy Reviews**, Vol. 72, p. 639-647, 2017.

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

PESARAN, M. Hashem. **Time series and panel data econometrics**. Oxford University Press, 2015.

SANTANA, Naja Brandão; PÉRICO, Ana Elisa; REBELATTO, Daisy Aparecida do Nascimento. **Crescimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica**: uma discussão teórica. Anais, 2011.

SANTANA, Naja Brandão. **Crescimento Econômico, Desenvolvimento Sustentável e Inovação Tecnológica: Uma análise de eficiência por envoltória de dados para os países do BRICS**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2012.

SERENO, Luiz Gustavo Fernandes. **Crescimento econômico e emissões de gases de efeito estufa: uma análise de cointegração em painel para os estados brasileiros de 2002 a 2015.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2019.

VEIGA, José Eli da. O prelúdio do desenvolvimento sustentável. **Economia brasileira: perspectivas do desenvolvimento.** São Paulo: CAVC, p. 243-266, 2005.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. Pioneira Thomson Learning, 2006.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Econometric analysis of cross section and panel data**. MIT press, 2010.

WORLD BANK. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>. Acesso em 18 fev. 2021.