

UM ESTUDO SOBRE A CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS E A CONVERGÊNCIA DA PEGADA ECOLÓGICA

Guilherme Byrro Lopes ¹

Eliezer Martins Diniz ²

Resumo

A relação entre economia e meio ambiente tem sido cada vez mais explorada, dado que o crescimento econômico pode ter efeitos prejudiciais sobre a natureza, contudo existe a possibilidade de conciliar crescimento com preservação do meio ambiente. A coleta e divulgação de indicadores ambientais permitiram relacioná-los com a renda per capita, o que motivou a investigação de uma hipótese conhecida como Curva Ambiental de Kuznets. O trabalho tem por finalidade estimar, através da análise de dados em painel, a convergência da pegada ecológica entre os países como resultado da evidência indireta da existência de uma Curva Ambiental de Kuznets. A vantagem da análise está na abrangência da pegada ecológica como indicador ambiental em relação às emissões de poluentes. Os fundamentos teóricos da análise estão no Modelo de Solow verde desenvolvido por Brock e Taylor (2010). A hipótese da CAK é validada, pois existe convergência para a Pegada Ecológica entre os países, tendo sido encontradas velocidades de convergência que variam de 1% a 4%.

Palavra chave: Modelo de Solow Verde, Pegada Ecológica, Curva Ambiental de Kuznets, Crescimento Econômico.

Abstract

The relationship between economy and environment has more and more been explored, and given the potential harm that economic growth might have on nature there is a possibility to conciliate growth and environment preservation. The gathering and publishing of environmental data allowed researchers to establish their relationship with per capita income in investigating the hypothesis known as the Environmental Kuznets Curve (EKC). This work estimates the convergence of the ecological footprint among countries, as an indirect result of the existence of an EKC, by using panel data techniques. The advantage of this analysis is that the Ecological Footprint (EF) is a broader environmental index than pollution indexes. The theoretic foundation of the analysis is the Green Solow model, presented by Brock e Taylor (2010). The EKC hypothesis is confirmed, indicating the existence of convergence for the EF among countries, for which the speed of convergence range from 1% to 4%.

Keywords: Green Solow Model, Ecological Footprint, Environmental Kuznets Curve, Economic Growth.

Classificação JEL: O44; Q56; Q57; C23.

¹ Mestrando do PPGE da FEA-RP/USP.

² Professor Associado da FEA-RP/USP.

1 Introdução

O crescimento econômico é tema constante de estudos dos economistas, porém, em muitos casos, seus impactos não econômicos deixam de ser considerados. Esta situação é fácil de ser exemplificada ao notarmos que qualquer atividade econômica responsável por gerar produto, produz também resíduos. Tais resíduos podem ser restos de insumos não utilizados (lixo) ou resíduos da própria atividade e poluição (por exemplo, emissão de gases poluentes ou gases de efeito estufa ou outros dejetos sólidos e líquidos que são despejados em rios e mares). Os esforços associados à recuperação ambiental incorrem normalmente em altos custos econômicos.

Uma vez que as decisões da sociedade envolvem não apenas o ambiente econômico, mas consideram também suas preferências, valores e crenças, é fundamental avaliar o impacto da atividade econômica sobre o meio ambiente e a reação dos agentes a estes impactos. Por esse motivo, a relação entre economia e meio ambiente tem sido cada vez mais explorada, requerendo dos economistas, muitas vezes, conhecimento de outras disciplinas para que os modelos sejam cada vez mais adequados.

Uma hipótese que foi levantada acerca dessa relação teve origem no trabalho [Grossman e Krueger \(1991\)](#). Segundo os autores, em estágios iniciais de crescimento econômico, um aumento da renda per capita implica uma piora da qualidade do ar (ou uma maior pressão ambiental). Esse efeito de deterioração da qualidade do ar dura até um determinado patamar de renda que, quando ultrapassado, passa a indicar uma melhora dos indicadores de poluição atmosférica, gerando uma curva em formato de U-invertido no plano emissões-renda. O formato dessa curva ficou conhecido como Curva Ambiental de Kuznets (CAK).

A literatura sobre CAK ainda é recente, assim como a coleta sistemática e acompanhamento de muitos indicadores de qualidade ambiental. Os estudos sobre a CAK analisam como a atividade produtiva pressiona o meio ambiente, ou seja, de que maneira a crescente demanda por bens e serviços (com objetivo de melhoria das condições de vida) pode trazer consequências não necessariamente de ordem econômica que, ainda assim, atingem as preferências e influenciam as escolhas dos indivíduos. Em última instância, essa pressão ambiental (por exemplo, disponibilidade e qualidade das águas, concentração atmosférica de poluentes e gases de efeito estufa, mudanças no uso da terra pela intensificação na exploração mineral ou vegetal, perda de biodiversidade, ampliação de fronteira agrícola, pastagens e ocupação humana) advém da necessidade de atender um determinado nível de produção/consumo. Logo, indicadores de demanda ou do padrão de consumo também foram usados para testar a hipótese da CAK como, por exemplo, demanda por energia e produção de aço. Um indicador recente de pressão ambiental que está ganhando cada vez mais importância é a *pegada ecológica*, uma medida de demanda das atividades humanas em termos de pressão sobre o meio ambiente. O cálculo desse indicador considera o quanto demandamos do meio ambiente (por exemplo, em termos de agricultura, pastagens, pesca, florestas) de forma a sustentar o padrão de consumo atual e também o quanto o planeta consegue nos suprir, nos mesmos termos. Dessa forma, a pegada pode ser utilizada como indicador de pressão ambiental para se testar a CAK.

Em resumo, muitos estudos foram feitos para se obter novas evidências que confirmem a hipótese da CAK, considerando diversos indicadores de pressão ambiental e grandes avanços que permitiram uma formulação teórica sobre a CAK. Contudo, é importante explorar não apenas essa relação, mas também compreender de que maneira as variáveis econômicas se relacionam com o meio ambiente. Com a coleta de mais informações sobre meio ambiente e o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade, cria-se a oportunidade de investigação e análise mais aprofundada e ampla de como as variáveis econômicas se relacionam com o meio ambiente. [Brock e Taylor \(2010\)](#) exploram essa ideia desenvolvendo um modelo de

Solow verde. Esse modelo pode ser testado empiricamente e permite obter resultados relevantes sobre essas relações.

O propósito deste artigo é testar a CAK como implicação do modelo proposto por Brock e Taylor utilizando dados da pegada ecológica. Assim, pode-se pensar melhor de que forma a preocupação ambiental impacta sobre o crescimento econômico, de que forma o crescimento econômico impacta sobre o meio ambiente e quais as magnitudes desses efeitos. Além disso, de que forma age a velocidade de convergência e qual sua implicação para os países.

2 Revisão da Literatura

2.1 Curva Ambiental de Kuznets – Teoria e Evidências

A busca pelo crescimento econômico é responsável em grande parte pelo aumento da demanda de insumos, que gera conjuntamente bens materiais e lixo, exercendo pressão sobre os ativos ambientais em ambos extremos da dimensão produtiva (*insumo* e *produto*). Apesar disso, na medida em que os países se desenvolvem e geram renda, podem aumentar as possibilidades de escolha de bens e serviços e, assim, incorporar bens de luxo aos seus orçamentos, como é muitas vezes o caso da qualidade ambiental. Essas duas visões do crescimento são comportadas pela hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, que postula uma curva em formato de U invertido entre renda per capita e pressão ambiental. O aumento de renda seria capaz, ao longo do desenvolvimento dos países, de contribuir para resolver os problemas ambientais? Até que ponto a renda e o meio ambiente estão correlacionados? Uma vez que a coleta e a divulgação de informações ambientais se tornaram mais acessíveis, essas perguntas tentaram ser respondidas, relacionando os indicadores a informações sobre produção, padrões de consumo e riqueza dos países.

Essas preocupações levaram, por exemplo, ao trabalho empírico de [Grossman e Krueger \(1991\)](#), que encontrou evidências de uma relação de U-invertido entre a renda per capita e alguns indicadores de poluição do ar (concentração de SO₂ e fuligem). A literatura que emergiu dos esforços teóricos e empíricos explorando essa relação passou a chamá-la de Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Esse termo foi primeiramente citado em [Panayotou \(1993\)](#), em que se estabeleceu um paralelo com o trabalho do economista Simon Kuznets. Em [Kuznets \(1955\)](#), encontra-se a evidência de uma relação de U-invertido entre renda per capita e desigualdade de renda, de forma que inicialmente a desigualdade aumenta com o aumento da renda até certo patamar. Ultrapassado tal patamar, a desigualdade tenderia a se reduzir, explicando assim diferentes patamares de renda, desenvolvimento e desigualdade entre os países. Algo semelhante ocorreria em uma CAK relacionando a renda per capita e os indicadores de poluição.

Nesse caso, em baixos níveis de produção e renda per capita teríamos uma pressão ambiental reduzida. A prioridade por bens materiais e o interesse por trabalho e renda é maior do que o interesse por preservação ambiental, de modo que a poluição cresce rapidamente, junto com o produto e a renda. Na sequência, a pressão ambiental se encontra em níveis muito mais elevados do que no início, podendo despertar uma consciência e uma mudança de preferências das pessoas que, com renda mais elevada, passam a valorizar mais a qualidade ambiental, podendo inclusive incorrer em dispêndios com abatimento ou preservação dos ativos ambientais. Após a estabilização da pressão ambiental, no ponto extremo da CAK, é possível que o crescimento apresente efeito positivo sobre a pressão ambiental, tal como no raciocínio anterior, reduzindo então o patamar alcançado. Finalmente, o desenvolvimento econômico pode conduzir de volta a natureza aos padrões encontrados inicialmente, resultando assim no formato de U invertido.

Os trabalhos teóricos (LEVINSON, 2002; JOHN e PECCHENINO, 1994; SELDEN e SONG, 1995; STOKEY, 1998; BULTE e SOEST, 2001; DINDA, 2005; BROCK e TAYLOR, 2005; LOPEZ, 1994) se preocupam em desenvolver modelos de crescimento econômico com ativos ambientais que repliquem a CAK a partir de diferentes hipóteses. Utiliza-se uma ampla gama de modelos de crescimento econômico introduzindo a poluição como um *produto*, como um item de bem estar de efeito negativo, explorando o papel da tecnologia, problemas de conflito intergeracional, impacto de mecanismos de controle (taxas, quotas e permissões de poluição), que se baseiam nas diversas explicações para o formato da CAK³.

Já as pesquisas empíricas iniciais em relação à CAK (SELDEN e SONG, 1994; HOLTZ-EAKIN e SELDEN, 1995; GROSSMAN e KRUEGER, 1991 e 1995; SHAFIK e BANDYOPADHYAY, 1992; PANAYATOU, 1993), além de testar a hipótese do formato da curva, estimam também o *ponto extremo* de diversos tipos de indicadores de qualidade ambiental. Esse termo pode ser interpretado como o patamar de renda a partir do qual se espera que haja uma melhora das condições ambientais. Desde então, muitos outros trabalhos foram realizados, a fim de entender a relação dos indicadores de meio ambiente e crescimento econômico, reunidos em Lieb (2004) e Stern (2004). A utilização da pegada ecológica, como indicador ambiental, para se testar a hipótese da CAK também já foi explorada em Bagliani, Bravo e Dalmazzone (2008), com dados em corte transversal, em que a maioria dos resultados obtidos aponta na direção de uma curva em formato de N ao invés de U invertido. Ainda, em Cavigliaharris, Chambers e Kahn (2009), com dados em painel de 146 países num período de 40 anos, não foram encontradas evidências a favor da CAK. Recentemente Hervieux e Darné (2013) encontraram evidências para CAK em alguns países, com uso de metodologia de séries temporais, testando cada país individualmente, assim como uma relação uma relação linear entre a relação renda e meio ambiente.

Uma das críticas em relação à hipótese da CAK deve-se ao fato de ser uma especificação *ad hoc*, que testa os coeficientes de renda em nível e em forma quadrática e cúbica, incluindo muitas vezes algumas outras variáveis de controle (DINDA, 2004). Dessa forma, a introdução dessa hipótese dentro de um modelo econômico, como o modelo de Solow verde, permite maior entendimento do impacto de outras variáveis econômicas no meio ambiente. Tal modelo foi aplicado recentemente em Ávila (2012), onde testa-se a CAK e convergência das emissões de CO₂ entre os países. Entende-se que a pegada ecológica, como indicador de pressão ambiental, permite uma análise com fundamentos econômicos e baseada em um indicador abrangente e cada vez mais importante.

2.2 Pegada Ecológica

A pegada ecológica (também conhecida apenas como pegada) surge como uma forma inovadora de mensurar a demanda das atividades humanas medidas em termos de pressão sobre o meio ambiente. De forma indireta, ela reflete também uma medida de diferentes padrões de consumo entre os países, causa fundamental da maior parte dos problemas ambientais enfrentados hoje e dos que devemos enfrentar no futuro.

Os trabalhos iniciais que culminaram na pegada usaram o conceito de capacidade de suporte (*carrying capacity*), um conceito de ecologia que estima qual a população máxima de uma espécie biológica que pode ser continuamente suportada em um dado ambiente, respeitando as necessidades de água, alimentação e habitat, dentre outras (REES, 1992). Em Wackernagel e Rees (1996) surge mais formalmente o conceito da pegada ecológica e a metodologia inicial de cálculo.

³ Ver de Bruyn (2000), Stern (2003) e Dinda (2004).

“For human beings, carrying capacity can be interpreted as the maximum rate of resource consumption and waste discharge that can be sustained indefinitely in a given region without progressively impairing the functional integrity and productivity of relevant ecosystem”.(REES, W. E., 1992, p.125)

O indicador da pegada é composto por seis diferentes grupos de atividades humanas, considerando o tipo de terreno onde é praticada a atividade, e é expresso em termos de hectares globais, ou seja, converte o uso de diferentes áreas, dada sua produtividade, em uma única medida comum de hectare global. Essa medida considera a produtividade média em diversos países considerando mais de 160 diferentes categorias de colheitas, de forma que diferentes produtividades são consideradas a depender da condição de cada solo em cada país. Estão inclusas na pegada ecológica as atividades de agricultura, pesca, pecuária, utilização das áreas necessárias para construções humanas, exploração das florestas e absorção de CO_2 .

Outro componente considerado é a área destinada às pastagens para criação de gado e outros animais que fornecem carne, leite, couro e lã a fim de atender ao consumo humano. Considera-se também, dentro desse componente, a área arável destinada à alimentação desses animais, assim como pastos e pradarias.

Calculam-se, ainda, os componentes relacionados às atividades de pesca, exploração de florestas e área urbanizada. Na pesca, calcula-se o quanto, em termos de área, é necessário para atender à demanda pelo nível médio de nutrientes das espécies de peixes, considerando mais de 1400 espécies de peixes marinhos e mais de 260 espécies de peixes das águas de rios e lagos, para consumo humano. Em relação às florestas, toma-se principalmente a demanda por madeira para ser utilizada como matéria prima para atender as atividades de construção, de extração da celulose (para produção de papel) e de corte para lenha (para ser utilizada como combustível). A área urbanizada é calculada como a área coberta por estruturas construídas pelo homem, como cidades, outras áreas destinadas a moradias, infraestrutura industrial, áreas utilizadas com fins de transporte (ruas, rodovias, ferrovias, por exemplo) e reservatórios para produção de energia hidroelétrica.

Por fim, o componente da pegada do carbono é o que tem maior peso na pegada ecológica e corresponde ao equivalente, em hectares globais, de florestas para absorver todas as emissões de CO_2 dos combustíveis fósseis. Esse componente é responsável pela maior divergência da pegada entre os países e é altamente correlacionado com o nível de renda per capita.

A pegada ecológica representa a soma desses seis componentes apresentados e é apresentada também em termos per capita, para comparação entre países. O comércio internacional também é contabilizado na pegada de cada país, de forma que o impacto da produção de um bem consumido em outro país é contabilizado como pegada desse país e não do país produtor. O resultado da pegada doméstica é acrescido, assim, do saldo de importação e exportação da pegada entre países, divulgando-se apenas o resultado total. Em linhas gerais, a pegada ecológica é um indicador (expresso em uma unidade de medida única) de exigência ambiental, e captura o impacto de diversas atividades humanas para atender a um determinado padrão de consumo e à absorção do lixo gerado pelas atividades produtivas, considerando o atual estado tecnológico e as práticas de gestão e uso dos recursos do meio ambiente (WORLD LIVING REPORT, 2010).

O índice de biocapacidade é calculado para os mesmos seis componentes anteriores, representando a capacidade de regeneração natural do meio ambiente. Utiliza o total de área produtiva total disponível para gerar os recursos que são consumidos e absorver os resíduos. É possível associar essa ideia ao conceito de resiliência, que é a capacidade de um ecossistema retomar sua forma original após uma perturbação. O limite de resiliência de um ecossistema é a perturbação máxima suportável sem que haja um prejuízo irreversível, ou seja, consiste em

um limite de segurança ambiental. O índice de biocapacidade capta apenas essa resiliência, mas não considera nem esse limite ambiental, nem as fontes de perturbações que impactam o ecossistema e que podem causar erosão ou desertificação, nem outras externalidades e dimensões importantes como perda de biodiversidade, exaustão de recursos hídricos ou serviços ambientais. Muitas dessas fontes serão captadas apenas futuramente e de forma indireta por uma redução da biocapacidade.

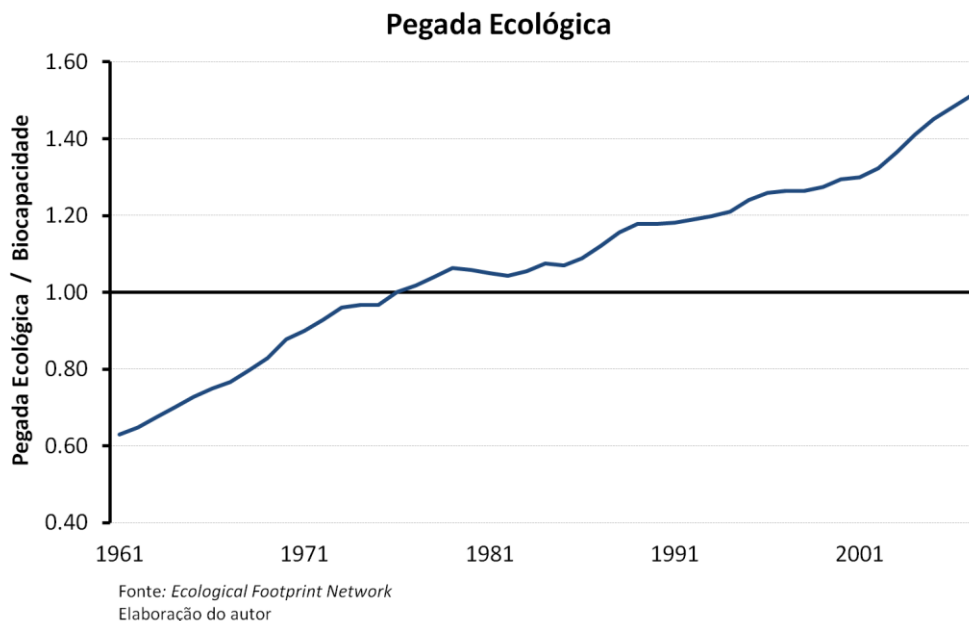


Figura 1 - Evolução da Pegada Ecológica (1961-2008)

O saldo líquido entre os dois indicadores aponta o quanto estamos exigindo do planeta para atender ao nível efetivo de consumo, ou seja, o quanto podemos estar ultrapassando de um limite ecológico natural (Figura 1). Dessa forma, a pegada pode ser utilizada como um indicador de sustentabilidade que está relacionado com a capacidade de suporte dos países e do planeta. Se a razão entre as medidas da pegada e da biocapacidade, se situa acima de 1, temos uma ultrapassagem ecológica, que pode não se sustentar por muito tempo e ainda levar a um colapso ambiental. Não faz parte do cálculo da pegada medir essas consequências, mas elas podem ser associadas ao problema da ultrapassagem: a escassez de água, a erosão e acidificação dos solos e a desertificação, que reduziriam a produtividade da terra, assim como a sobrepastagem; a extinção de habitats terrestres e marinhos que poderiam extinguir inúmeras espécies de animais e peixes, muitas vezes de consumo humano; e as mudanças climáticas. O uso da pegada ecológica como indicador de pressão ambiental tem sido amplamente explorado e entendido, também, como uma estimativa mais adequada da necessidade de capital natural para atender a demanda por recursos pelos países (e absorção de lixo gerado pelas atividades produtivas). Os recentes trabalhos de [KITZES e WACKERNAGEL \(2009\)](#) e [KITZES et al. \(2009\)](#) explicam em maiores detalhes o indicador, seu uso e algumas limitações.

3 Modelo

O trabalho de [Brock e Taylor \(2010\)](#), estende o modelo de Solow dentro de um contexto onde a atividade produtiva também resulta em emissão de poluentes, que passou a ser conhecido como Modelo de Solow verde. Ainda, esse modelo permite testar, de maneira

indireta, a Curva Ambiental de Kuznets (CAK), proporcionando o link entre crescimento econômico e meio ambiente.

Nesse sentido, o trabalho expõe um sistema de equações tal que:

$$Y = F(K, BL) = F \quad (3.1)$$

$$\dot{K} = sY - \delta K \quad (3.2)$$

$$\dot{L}/L = n \quad (3.3)$$

$$\dot{B}/B = g_B \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} E &= \Omega F - \Omega A[F, F^A] \\ &= \Omega F \{1 - A[1, F^A/F]\} \\ &= \Omega F a(\theta) \end{aligned} \quad (3.5)$$

em que o produto (Y) é uma função do capital físico (K) e do trabalho efetivo (BL), onde L representa o trabalho e B é o progresso tecnológico. A acumulação de capital (\dot{K}) aumenta com a taxa de poupança (s) e diminui com a depreciação (δ). A população e o número de trabalhadores crescem à taxa exógena n e o progresso tecnológico B cresce à taxa exógena g_B .

A emissão líquida de poluentes (E) é dada pela equação (3.5). Supõe-se que cada unidade de produto, $F = F(K, BL)$, gera também Ω unidades de poluição. Contudo, existe na economia um setor que é responsável pelo abatimento da poluição, de modo que a emissão líquida vai depender do esforço desse setor. Temos que θ é a parcela do produto destinada para abatimento ($\theta = F^A/F$) e o nível de abatimento é dado por $A(\bullet)$, reduzindo ΩA unidades de poluição do total gerado pela economia. Supõe-se ainda que exista progresso tecnológico exógeno nesse setor, $\dot{A}/A = g_A > 0$, o qual reduz Ω à essa taxa. Simplificando a notação, escrevemos $a(\theta) = [1 - A(1, \theta)]$ tal que $a(0) = 1$, $a'(\theta) < 0$ e $a''(\theta) > 0$, ou seja, existe um retorno marginal positivo e decrescente da atividade de abatimento da poluição.

Considerando a identidade macroeconômica $Y = C + I$, pode-se escrever então $F(K, BL) = F^A + F^{\bar{A}} = C + I$. Dado que F^A é uma parcela já comprometida para atividade redutora de poluição, o restante do produto pode ser usado para consumo ou investimento $F^{\bar{A}} = C + I - F^A$, ou reescrevendo, $Y^d = F^{\bar{A}} = (1 - \theta)F$. Expressando então as variáveis em termos de unidade efetiva de trabalho (dividindo por BL), assim como no modelo anterior, temos que:

$$y = (1 - \theta)f(k) \quad (3.6)$$

$$\dot{k} = s(1 - \theta)f(k) - (\delta + n + g_B)k \quad (3.7)$$

$$e = \Omega f(k)a(\theta) \quad (3.8)$$

Supondo $k(0) > 0$ e resolvendo o modelo, temos que a trajetória de crescimento equilibrado é atingida na medida em que k converge para k^{SS} . Nesse caminho, as taxas de crescimento do produto, do consumo e do capital crescem à taxa $n + g_B$ e, em termos per capita, à taxa g_B . Ou seja, assim como no modelo básico, o crescimento dessas variáveis converge para uma taxa comum e positiva, igual ao progresso tecnológico, caracterizando o caminho de crescimento equilibrado ($g_y = g_c = g_k = g_B > 0$). Definindo a taxa de crescimento de emissões (g_E), essa taxa deve crescer também na mesma magnitude $g_B + n$ das outras variáveis (efeito escala), mas reduzida do progresso g_A do setor de abatimento (efeito tecnologia), de forma que $g_E = g_B + n - g_A$.

Define-se então o conceito de crescimento equilibrado sustentável, em que há redução da taxa de poluição ($g_E < 0$) e, ao mesmo tempo, aumento de consumo per capita, que acontece quando há progresso técnico no setor de produção de bens ($g_B > 0$) e também quando o progresso técnico no setor de abatimento supera o crescimento do produto e o crescimento populacional ($g_A > g_B + n$).

Supondo válida a hipótese de crescimento equilibrado sustentável e que exista um ponto extremo de emissões à esquerda de k^{SS} , o modelo de Solow Verde produz uma trajetória de emissões semelhante a uma CAK. Tal hipótese, conforme ressalta Brock e Taylor (2010), é bastante forte, mas fundamental para validade do modelo. Assim, a CAK pode ser vista adotando uma função do tipo *Cobb-Douglas* para a equação de emissões e assumindo constante a participação α do capital na economia, com $0 < \alpha < 1$.

$$\dot{E}/E = g_E + \alpha[k^{\alpha-1}s(1 - \theta) - (\delta + n + g_B)] \quad (3.9)$$

Considerando as equações anteriores, pode-se construir a [Figura 2](#). O ponto de equilíbrio B é semelhante ao modelo de Solow, que representava o estado estacionário. Dessa forma, quando o capital é inferior ao capital de crescimento balanceado, a acumulação de capital por trabalhador efetivo (denominada pelos autores, “locus de poupança”) é maior do que a depreciação efetiva⁴, tal que a economia se situa à esquerda de B, e por isso apresenta crescimento mais acelerado até atingir k^{SS} . Quando o estoque de capital por trabalhador se situa à direita de B, a taxa de poupança necessária para manter o estoque de capital é insuficiente e menor do que a depreciação efetiva, implicando numa redução do estoque de capital em direção a k^{SS} e numa taxa de crescimento mais baixa do que no crescimento balanceado. Uma vez atingido k^{SS} , as taxas de variação entre o locus da poupança e a depreciação efetiva são iguais, tal que $\dot{k} = 0$ e o produto agregado da economia cresce à taxa $n + g_B$, assim como o capital agregado.

Considerando válida a hipótese de crescimento equilibrado sustentável, em que $g_E < 0$, e sendo g_E constante, a evolução das emissões segue as mesmas propriedades de crescimento do capital por trabalhador. Assim, deve existir um ponto T, à esquerda de B, que cruza o locus de poupança exatamente quando o acréscimo de emissões é nulo. De forma análoga, quando a economia está à esquerda de T, existe acúmulo de capital por trabalhador que pressiona o aumento das emissões ([Figura 2](#)) e, quando à direita de T, causa redução das emissões.

O modelo é compatível com a Curva Ambiental de Kuznets sob algumas circunstâncias, tal que exista uma condição inicial do capital $k_0 < k(T)$ e supondo o caminho de crescimento equilibrado sustentável. Assim, na medida em que há acúmulo de capital por trabalhador, há também aumento das emissões, até o ponto $k(T)$. Após ultrapassado o capital no ponto T, então $\dot{E}/E < 0$ e a poluição se reduz monotonamente, como prediz a CAK.

⁴ Locus de poupança = $\alpha s(1 - \theta)k^{\alpha-1}$ e depreciação efetiva = $\alpha(\delta + n + g_B)$

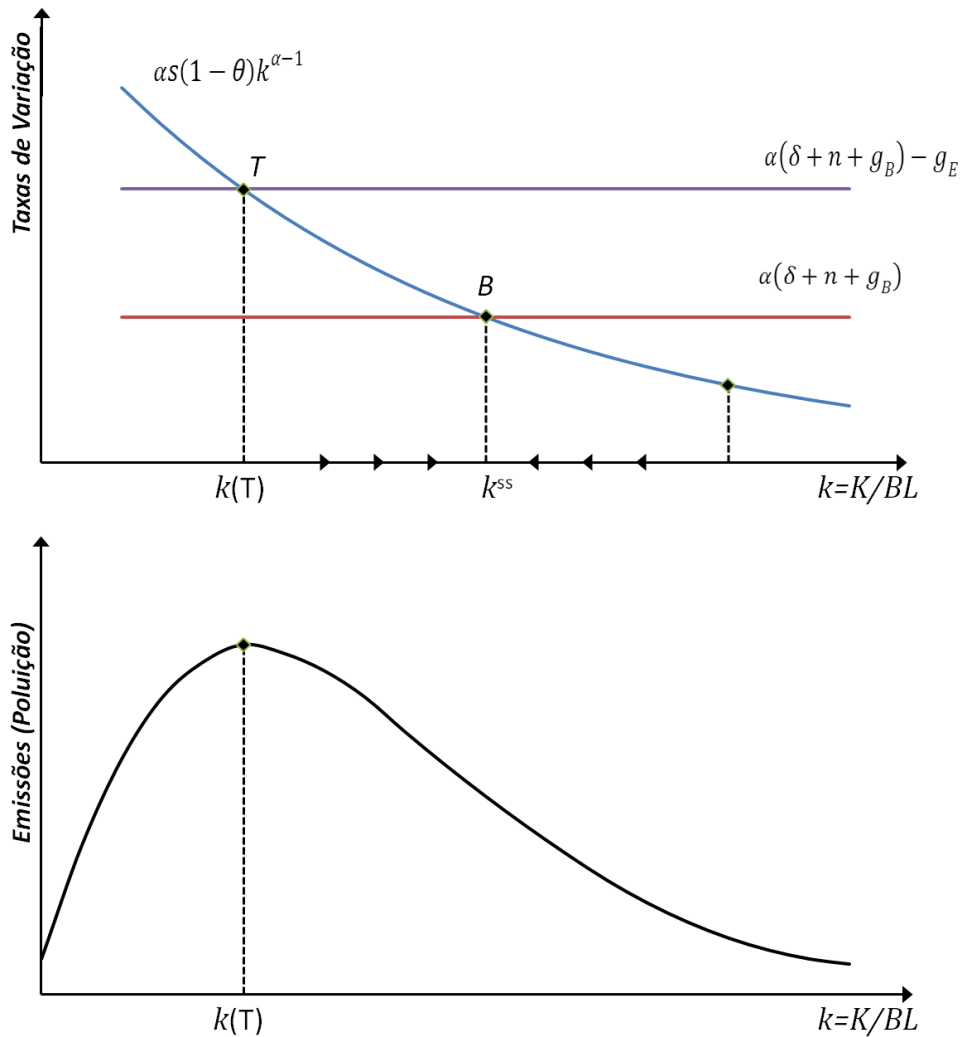


Figura 2 – Dinâmica do modelo de Solow verde

Fonte: Brock e Taylor (2010)

Elaboração própria

Dado o modelo resumido acima, é possível escrever o crescimento de renda per capita relacionando o crescimento das emissões ao período inicial de emissões e uma constante, para i países, tal que⁵

$$[1/N] \log[e_{i,t}^c / e_{i,t-N}^c] = \beta_0 + \beta_1 \log[e_{i,t-N}^c] + \mu_{i,t} \quad (3.9)$$

Note que a equação expressa dessa forma se assemelha à equação de Solow de convergência absoluta, se aplicando, no caso, à taxa de crescimento das emissões. Os autores se referem à equação como especificação curta. Existe uma relação inversa entre o nível inicial de emissões e a taxa de crescimento, uma vez que baixos níveis de emissão inicial também implicam em baixo capital inicial por trabalhador. Assim, as taxas de crescimento de emissão devem ser mais elevadas, tal que $\beta_1 < 0$.

Apesar disso, é possível escrever ainda uma especificação longa, que condiciona o crescimento das emissões a outros determinantes do crescimento. Supondo que as taxas de crescimento da tecnologia sejam iguais entre os países, uma forma funcional para a função de abatimento $a(\theta) = (1 - \theta)^\epsilon$, $\epsilon > 1$, e considerando os parâmetros s_i , θ_i e $(n + g_B + \delta)_i$

⁵ Derivação no Apêndice 6.3 de Brock e Taylor (2004)

como médias no período, específicas de cada país, temos que os determinantes do crescimento entram na equação como

$$\left(\frac{1}{N}\right) \log\left(\frac{e_{i,t}^c}{e_{i,t-N}^c}\right) = \beta_0 + \beta_1 \log(e_{i,t-N}^c) + \beta_2 \log(s_i) + \beta_3 \log(1 - \theta_i) + \beta_4 \log[(n + g_B + \delta)_i] + \mu_{i,t} \quad (3.10)$$

O coeficiente β_1 guarda relação com a velocidade de convergência, de modo que $\beta_1 = -(1 - e^{-\lambda N})/N < 0$, onde N é o tamanho da dimensão temporal. Do resultado de estado estacionário, considera-se que, em uma economia fechada, a poupança é igual à depreciação efetiva, ou seja, $\beta_2 = -\beta_4$. Os sinais esperados para os parâmetros seguem o seguinte raciocínio: β_0 não tem sinal claro, pois reflete características individuais dos países e, por isso, pode ser positivo ou negativo; β_2 é o coeficiente relativo ao efeito da poupança, s_i , que aumenta o estoque de capital de crescimento equilibrado e assim a poluição ($\beta_2 > 0$); β_3 mede o efeito do aumento da participação da atividade não mitigadora de poluição, $(1 - \theta_i)$, que elevaria a emissão de poluentes ($\beta_3 > 0$); β_4 é o coeficiente relativo à depreciação efetiva, que é negativo e tem a mesma magnitude de β_2 .

Em Brock e Taylor (2004 e 2010) discute-se o termo θ_i referente ao custo de abatimento da poluição, que se situa em torno de 2% do PIB nos EUA num período de 20 anos. Também em países europeus (para o qual existe essa informação), esse parâmetro situa-se entre 1% e 2% e de forma relativamente estável. Somado ao fato do parâmetro ser pouco invariante no tempo, em países menos desenvolvidos não existe de fato tal mensuração, de forma que na estratégia empírica dos autores, o coeficiente β_3 foi suprimido, resultando na seguinte equação estimável:

$$\left(\frac{1}{N}\right) \log\left(\frac{e_{i,t}^c}{e_{i,t-N}^c}\right) = \beta_0 + \beta_1 \log(e_{i,t-N}^c) + \beta_2 \log(s_i) + \beta_4 \log[(n + g_B + \delta)_i] + \mu_{i,t} \quad (3.112)$$

As principais diferenças entre as duas especificações ((3.9) e (3.112)) residem no seguinte: (i) quando os países apresentam diferentes parâmetros determinantes do estado estacionário, toda a heterogeneidade aparece no termo de erro da especificação curta. Se esses parâmetros forem correlacionados com as emissões per capita, a estimação será inconsistente e enviesada, de forma que a especificação longa é então preferível, na presença desses dados; e (ii) uma vez que a especificação longa inclui os determinantes de estado estacionário, é possível pensar em como determinadas políticas econômicas podem afetar o meio ambiente.

4 Método e Dados

Nesse trabalho são usados dados referentes à Pegada Ecológica, que são calculados e disponibilizados em relatórios pelo instituto *Ecological Footprint Network*. Os dados para o trabalho consideram o cálculo da pegada desde que ela começou a ser calculada até sua última disponibilização (1961-2008), para uma amostra que hoje conta com 153 países, que possuem população acima de um milhão de pessoas. As especificações apresentadas considera um painel balanceado, que conta com 91 países⁶ ao longo desses anos. Optou-se por apresentar os

⁶ Tal amostra é considerada significativa pois contém 87,0% da população mundial e 84,3% do PIB mundial. Países: Argélia, Argentina, Austrália, Áustria, Bélgica, Benin, Bolívia, Brasil, Burkina Faso, Burundi, Camarões, Canadá, República Central Africana, Chade, Chile, China, Colômbia, Costa Rica, Costa do Marfim, República Democrática do Congo, Dinamarca, República Dominicana, Equador, Egito, El Salvador, Finlândia, França, Gabão, Gâmbia, Gana, Grécia, Guatemala, Guiné, Guiné-Bissau, Haiti, Honduras, Índia, Indonésia, Irã, Irlanda, Israel, Itália, Jamaica, Japão, Jordânia, Quênia, Luxemburgo, Madagáscar, Malásia, Mali, Mauritânia, Maurício,

resultados apenas do painel balanceado, uma vez que o painel não balanceado prejudicava a análise seguindo a especificação via painel dinâmico.

Foram estabelecidas médias de 5 anos para as variáveis do modelo, considerando as cortes em 1962, 1967, 1972, 1977, 1982, 1987, 1992, 1997, 2002 e 2007 para o modelo de Solow verde. As informações sobre variáveis relevantes dos países (renda per capita, população e poupança, entre outras) são de fácil acesso e podem ser extraídas dos bancos de dados do Banco Mundial disponibilizados pela internet. Os dados relevantes dos diversos países são convertidos para uma mesma moeda em um dado ano utilizando taxas de câmbio ajustadas pela Paridade do Poder de Compra. Utiliza-se também o banco de dados do Banco Mundial para se obter as taxas de crescimento populacionais. O tratamento de outros parâmetros como depreciação e participação da atividade mitigadora de poluição, segue rigorosamente a estratégia adotada em [Brock e Taylor \(2004 e 2010\)](#).

- pegada ecológica ($e_{i,t}$) e taxa média de crescimento da pegada ecológica, $(1/N) \log(e_{i,t}^c/e_{i,t-N}^c)$: é medida pelo *Global Footprint Network* e expressa em termos de hectares globais. Calcula-se um indicador composto da soma de seis componentes de pressão ambiental devido às atividades humanas e um indicador, em iguais termos, de biocapacidade ou regeneração natural do meio ambiente. Nesse trabalho, o termo pegada ecológica será empregado para expressar a razão entre o indicador da pegada ecológica e o da biocapacidade.
- taxa de poupança (s_i): foi utilizada a taxa de investimento como *proxy* da taxa de poupança por país, que pode ser encontrada na Penn World Table, versão 7.0. Considerando um contexto de economia fechada, do modelo de Solow, a poupança total é igual a poupança doméstica e não há poupança externa, de forma que a taxa de investimento se iguala à taxa de poupança. Essa é uma hipótese usual em análises empíricas de modelos de crescimento econômico.
- taxa de depreciação efetiva, $(n + g_B + \delta)_i$: essa variável foi construída seguindo [Brock e Taylor \(2010\)](#). A taxa de crescimento populacional (n) é calculada usando as informações de população do Banco Mundial. A literatura do crescimento considera a taxa de depreciação (δ) constante e igual entre os países no longo prazo, supondo uma taxa de 2%. A taxa de crescimento tecnológico (g_B), no longo prazo, também apresenta essa característica e assume valor de 3%. Assim, [Brock e Taylor \(2010\)](#) considerara $(g_B + \delta)$ constante e igual a 5%, hipótese também utilizada neste trabalho. Somando a taxa média de crescimento populacional de cada país aos 5%, obtém-se a taxa de depreciação efetiva.

A metodologia para estimar as especificações propostas reside na utilização de modelos em painel. Segundo os trabalhos de [Hsiao \(2003\)](#) e [Klevmarken \(1989\)](#) e [Baltagi \(2005\)](#), existem muitos benefícios no enfoque de estimações em painel: (i) uma das principais vantagens é a possibilidade de controlar pela heterogeneidade individual, o efeito fixo, pois ignorar o controle pelo efeito fixo pode incorrer em omissão de uma variável importante no modelo e, logo, é causa de viés no estimador do modelo; (ii) outro benefício, em comparação com os enfoques de séries temporais e corte transversal, é o ganho de mais informações, e de

México, Marrocos, Moçambique, Namíbia, Nepal, Holanda, Nova Zelândia, Nicarágua, Níger, Nigéria, Noruega, Paquistão, Panamá, Papua Nova Guiné, Paraguai, Peru, Filipinas, Portugal, República do Congo, Romênia, Ruanda, Senegal, África do Sul, Espanha, Sri Lanka, Suécia, Suíça, Síria, Tailândia, Togo, Trinidad e Tobago, Tunísia, Turquia, Uganda, Reino Unido, EUA, Uruguai, Venezuela, Zimbábue

maior variabilidade (*within*, dentro do grupo; e *between*, entre os grupos) e redução de colinearidade entre os dados, resultando assim em ganhos de graus de liberdade e mais eficiência; (iii) os dados em painel também permitem compreender melhor as dinâmicas de ajuste, uma vez que, por exemplo, os dados em corte transversal representam apenas um instante do tempo; (iv) há a capacidade de identificação e mensuração de efeitos não observáveis em dados de corte transversal ou séries temporais puros; (v) permite construir e testar modelos mais complexos.

Assim, as estratégias de estimação adotadas exploram painéis estáticos, analisando a distinção entre efeitos fixo ou aleatório, e painéis dinâmicos, explorando principalmente [Arellano e Bond \(1991\)](#), com o uso de defasagens da variável dependente como instrumentos para resolver o problema de endogeneidade, e a abordagem de [Arellano e Bover \(1995\)](#) e [Blundell e Bond \(1998\)](#), que sugerem a utilização de GMM em Sistema (System GMM), com a estimação de equações: no nível (instrumentalizando por defasagens da variável diferenciada) e em primeira diferença (instrumentalizando por defasagens da variável no nível). Os sinais esperados são: $\beta_1 < 0$, $\beta_2 > 0$ e $\beta_4 < 0$, para que exista a convergência esperada pelo modelo. Em relação à especificação, testamos tanto a hipótese de convergência absoluta quanto a hipótese de convergência condicional, inclusive a relação entre poupança e depreciação efetiva, em que devem ser iguais (por construção do modelo). Por esse motivo, apresentamos resultados dos três modelos possíveis.

5 Resultados

5.1 Estatísticas Descritivas

Enquanto a Pegada Ecológica é calculada tomando como base grupos de países, a *Ecological Footprint Network* não faz esse cálculo para a Biocapacidade. Considerando que o Planeta Terra é um ‘sistema fechado’ e a possibilidade de transações internas de produtos e desequilíbrios regionais de pressão ambiental, então o mais correto seria comparar a Pegada Ecológica dos grupos de países com a Biocapacidade da Terra. O indicador utilizado no trabalho é a **Razão entre a Pegada Ecológica e a Biocapacidade**. Dessa forma, qualquer razão superior a 1 implica em pressão ambiental acima da capacidade de regeneração do meio ambiente. A última coluna da [Tabela 1](#) apresenta essa razão, sendo possível enxergar a grande diferença desse indicador ao se considerar os países por grupos de renda. Sob essa visão, o padrão de consumo dos países de Renda Alta em termos de pressão sobre o meio ambiente, é três vezes mais elevado que o dos países de Renda Média e quase cinco vezes mais elevado que os países de Renda Baixa. Também, pode-se notar que a maior parte do desequilíbrio mundial da Pegada Ecológica decorre da alta razão da Pegada Ecológica dos Países de Renda Alta.

Tabela 1: Pegada Ecológica por grupo de países (2008)

Classificação	População (bilhões de pessoas)	PIB per capita (US\$ dólares)	Pegada Ecológica per capita (gha)	Biocapacidade per capita (gha)	Razão Pegada Ecológica / Biocapacidade
Países de Renda Alta	1.037	\$ 37.188	5,60	-	3,15
Países de Renda Média	4.394	\$ 6.106	1,92	-	1,08
Países de Renda Baixa	1.298	\$ 1.178	1,14	-	0,64
Mundo	6.729	\$ 9.950	2,70	1,78	1,52

Fonte: *Ecological Footprint Network*

Nota: Os critérios de renda são do Banco Mundial, classificando os países em: renda alta (acima de US\$12.476), renda média (de US\$1.026 a US\$12.475) e renda baixa (abaixo de US\$1.025), com base na renda nacional bruta e ajustado pelo método Atlas, que converte os PIB nacionais em dólar e corrige por uma série de indicadores de cambio e inflação, por país. Para melhor compreensão, foi apresentado o PIB per capita com base no ajuste pela PPP, também calculado pelo Banco Mundial. Os valores do PIB per capita, segundo o método Atlas, são US\$38.728, US\$3.121 e US\$449, respectivamente.

Elaboração própria

Na sequência, testa-se a hipótese de convergência para a razão da pegada entre os países, por meio do modelo de Solow verde, de [Brock e Taylor \(2010\)](#). Os valores das variáveis relevantes foram transformados para logaritmo, com estatísticas descritivas dadas pela [Tabela 2](#).

Tabela 2: Estatísticas Descritivas – Modelo de Solow Verde

Variáveis	Média	Desvio padrão	Min.	Max.
$\left(\frac{1}{N}\right) \log\left(\frac{ef_{i,t}}{ef_{i,t-N}}\right)$	0,020	0,034	-0,141	0,322
$\log(ef_{i,t})$	-0,070	1,049	-4,244	2,772
$\log(ef_{i,t-N})$	-0,171	1,045	-4,244	2,624
$\log(s_{i,t})$	2,946	0,488	0,383	4,370
$\log(n + g + d)$	0,068	0,013	-0,006	0,140

Fonte: Resultados do trabalho

5.2 Resultados

São consideradas a seguir três variações do modelo, segundo a especificação da equação (3.10). A primeira versão considera a convergência absoluta, que inclui apenas o termo $ef_{i,t-N}$ no lado direito da equação; a segunda versão considera a convergência condicional irrestrita (Irr.); e a versão que considera a convergência condicional restrita (R.), em que é imposta a igualdade dos coeficientes da poupança e da depreciação efetiva com sinais contrários. Os resultados da [Tabela 3](#) indicam a aplicação correta da metodologia em painel e apontam para o controle pelo efeito fixo como sendo o mais adequado.

Tabela 3: Teste de Poolabilidade e Hausman

	Convergência Absoluta	Convergência Condicional	
		(Irr.)	(R.)
Poolabilidade			
F	1,463*** 0,000	1,549*** 0,000	1,377*** 0,001
Hausman			
χ^2	84,21***	104,86***	90,54***
Prob > χ^2	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados do trabalho

Nota: *, **, *** Significante a 10%, 5% e 1%
p-valor em **negrito**

A **Tabela 4** considera inicialmente o tratamento dado aos painéis estáticos, considerando os estimadores de efeito fixo e primeira diferença. No modelo de efeito fixo, a variável dependente, conforme exposta no modelo, é a taxa de crescimento do indicador da pegada ecológica $\left[\left(\frac{1}{N}\right) \log\left(\frac{ef_{i,t}}{ef_{i,t-N}}\right)\right]$, contudo para o estimador em primeira diferença e painel dinâmico, é possível aplicar algumas transformações e obter

$$\log(ef_{i,t}^c) = \beta_0 + \theta_1 \log(ef_{i,t-N}^c) + \beta_2 \log(s_i) + \beta_3 \log[(n + g_B + \delta)_i] + \mu_{i,t} \quad (5.1)$$

em que $\theta_1 = \beta_1 + 1$. Logo, dado o coeficiente $\beta_1 = \theta_1 - 1$, a convergência ocorre quando $\beta_1 < 0$, o que implica $\theta_1 < 1$. Nas tabelas abaixo, é apresentado diretamente o coeficiente β_1 , já considerando a devida transformação.

Tabela 4: Modelos de Efeito Fixo e Primeira Diferença

Variáveis	EFEITO FIXO			PRIMEIRA DIFERENÇA		
	Convergência			Convergência		
	Absoluta	Condicional		Absoluta	Condicional	
		(Irr.)	(R.)		(Irr.)	(R.)
$\log(ef_{i,t-N})$	-0,010*** (-16,99)	-0,003*** (-4,07)	-0,003*** (-4,63)	0,962*** (269,80)	0,992*** (319,55)	0,989*** (330,83)
$\log(s_i)$	-	0,005*** (4,40)	-	-	0,023*** (5,27)	-
$\log[(n + g + d)_i]$	-	0,032 (0,73)	-	-	0,214 (1,11)	-
$\log(s_i) - \log[(n + g + d)_i]$	-	-	0,005*** (22,91)	-	-	0,042*** (6,34)
N	819	819	819	728	728	728
α implícito		0,62	0,65		0,73	0,79
λ implícito	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01
Anos	65,2	27,8	29,7	16,6	39,3	49,5
$\beta_1 = \theta_1 - 1$,				-0,038***	-0,008***	-0,011***

Fonte: Resultados do trabalho

Nota: *, **, *** Significante a 10%, 5% e 1%

Estatística t entre parênteses

Assim, o sinal negativo do coeficiente β_1 de $\log(ef_{i,t-N})$ indica que, quanto maior for o ponto de partida inicial dos países, menor vai ser a taxa de crescimento da pegada ecológica (no caso do efeito fixo), ou menor vai ser o hiato do valor (em nível) da pegada ecológica

entre os períodos. A conclusão que se pode tirar é que os países com valores mais baixos de pegada ecológica devem caminhar para níveis mais elevados de pegada, ou seja, eles devem ampliar a pressão sobre o meio ambiente.

Em ambos os modelos, o coeficiente da variável de poupança foi significativo, enquanto o coeficiente da depreciação efetiva não parece ser significativo. Isso implica que, o aumento da poupança (e intuitivamente, da formação de capital) também contribui para o aumento da pressão ambiental. A depreciação efetiva, que segundo o modelo deveria apresentar sinal negativo, não apresentou coeficientes significativos nos modelos irrestritos. Isso equivale a dizer que o crescimento populacional, a tecnologia e a depreciação não atuam no sentido de reduzir a pressão ambiental (representada pela pegada ecológica per capita). No modelo restrito, os coeficientes são significativos. Assim como no caso da poupança, a magnitude dos coeficientes é bastante baixa. Um aumento populacional de, por exemplo, 1% no modelo de convergência condicional restrito e em primeira diferença reduz a pegada ecológica em 0,04%.

Apesar do valor baixo dos coeficientes das duas metodologias abaixo, os modelos apontam para a presença de convergência no parâmetro λ , com valores entre 1% e 4%. Esses valores podem ser traduzidos em números de anos necessários para reduzir o hiato da pegada ecológica entre países. Por exemplo, segundo a [Tabela 1](#), a razão da pegada ecológica dos Países de Renda Alta, Média e Baixa é de 3,15, 1,08 e 0,64, respectivamente. Considerando a velocidade de convergência em torno de 4%, seriam necessários 17 anos para reduzir o hiato entre os países pela metade.

A [Tabela 5](#) apresenta os dois modelos em painel dinâmico, explorando os benefícios de cada metodologia. A interpretação do coeficiente $\log(e f_{i,t-N})$ é semelhante à apresentada anteriormente, de forma que quanto maior for o ponto de partida inicial dos países menor vai ser o hiato do valor (em nível) da pegada ecológica entre os períodos. A conclusão que se pode tirar é que os países com valores mais baixos de pegada ecológica devem caminhar para níveis mais elevados de pegada, ou seja, eles devem ampliar a pressão sobre o meio ambiente.

Nestes resultados, os coeficientes de poupança e depreciação efetiva também se mostraram significativos e com sinal dentro do que o modelo prevê. Em relação aos resultados anteriores, os valores dos coeficientes também são maiores, tal que o impacto dessas variáveis é maior do que antes.

A validação desses modelos se dá por meio dos testes de correlação serial de 1ª e 2ª ordem e do teste de Sargan sobre a validação dos instrumentos utilizados. Nos modelos de convergência absoluta foram realizados testes para que se incluísse o menor número de instrumentos, mas obtendo um coeficiente coerente com a hipótese do modelo sem que houvesse problemas na estrutura de correlação dos resíduos. Considerando os modelos de convergência condicional, a 5% não se rejeita a hipótese de autocorrelação de 1ª ordem, mas rejeita-se a autocorrelação de 2ª ordem. A estatística de Sargan aponta na direção de um número excessivo de instrumentos. No entanto, não se rejeita a hipótese de que o número de instrumentos é válido.

Assim, pode-se também avaliar os parâmetros implícitos do modelo, α e λ . Sendo λ a velocidade de convergência, como já apresentada anteriormente, os resultados variam entre 2% e 4%. Com isso, o tempo necessário para se reduzir o hiato dos níveis de pegada ecológica entre os países pela metade varia de 16 a 30 anos. A parcela de capital na economia, α , varia entre 41% e 68%, abaixo dos valores encontrados nos modelos anteriores.

Tabela 5: Painel Dinâmico

Variáveis	Arellano Bond (1991)			System-GMM		
	Convergência			Convergência		
	Absoluta	Condicional (Irr.)	(R)	Absoluta	Condicional (Irr.)	(R)
$\log(e f_{i,t-N})$	0.965*** (7.960)	0.888*** (7.210)	0.875*** (22.490)	0.974*** (127.020)	0.853*** (18.080)	0.984*** (172.110)
$\log(s_i)$	-	0.116*** (3.250)	-	-	0.102*** (3.550)	-
$\log[(n + g + d)_i]$	-	-1.874 (-1.390)	-	-	-2.985*** (-2.360)	-
$\log(s_i) - \log[(n + g + d)_i]$	-	-	0.102*** (3.190)	-	-	0.033*** (9.280)
N	637	637	637	546	728	455
Instrumentos	12	23	20	17	76	68
α implícito		0.51	0.45		0.41	0.68
λ implícito	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
Anos	18.6	21.4	19.1	25.7	16.0	29.3
$\beta_1 = \theta_1 - 1,$	-0.035***	-0.112***	-0.125***	-0.026***	-0.147***	-0.016***
Teste de Sargan	40.20 (0.000)	79.98 (0.194)	26.50 (0.066)	51.35 (0.000)	85.15 (0.156)	88.73 (0.341)
Correlação 1ª Ordem	-2.80 (0.005)	-4.88 (0.000)	-3.14 (0.002)	-3.27 (0.001)	-3.12 (0.002)	-3.23 (0.001)
Correlação 2ª Ordem	-0.63 (0.528)	1.43 (0.154)	-1.92 (0.055)	-1.56 (0.118)	-1.64 (0.100)	-1.59 (0.113)

Fonte: Resultados do trabalho

Nota: *, **, *** Significante a 10%, 5% e 1%

p-valor em **negrito**

Estatística t entre parênteses

Os resultados anteriores apontam para a convergência da pegada ecológica entre países. Conforme colocamos quando da exposição do modelo de Brock e Taylor, a convergência é uma evidência indireta de que existe uma CAK envolvendo a pegada ecológica. Logo, nossos resultados são favoráveis à existência de uma CAK. Além disso, a velocidade de convergência situou-se entre 1% e 4%, que são resultados muito coerentes com a literatura econômica do crescimento⁷.

⁷ Ver Mankiw, Romer e Weil (1992), Islam (1995) e Bond, Hoeffler e Temple (2001).

6 Considerações Finais

O presente artigo trata da convergência da Pegada Ecológica entre países, considerando o indicador como uma medida mais adequada de pressão ambiental do que indicadores individuais de poluição e qualidade ambiental. Dentro da literatura que explora a questão ambiental e o crescimento econômico de forma conjunta, a hipótese da CAK é amplamente testada. Não há um consenso quanto a essa relação, o que gera críticas ao enfoque de estimação da CAK.

Uma das formas de contornar as críticas é através da utilização de modelos econômicos, como o modelo de Solow verde, de Brock e Taylor (2010). Assim, é possível testar a CAK de forma indireta e obter relações entre meio ambiente e outras variáveis que impactam no crescimento econômico.

Com base nos resultados obtidos através de modelos em painel estático e dinâmico, a hipótese da CAK é validada, pois existe convergência para a Pegada Ecológica entre os países. Além disso, os modelos estimados fornecem informações adicionais, como a velocidade de convergência, que varia de 1% a 4%.

Diferentemente do contexto de crescimento econômico, a velocidade de convergência para a Pegada Ecológica, já sabendo que grande parte dos países está acima do limite sustentável do planeta, implica que essa velocidade é a taxa na qual os países vão caminhar para uma Pegada ainda mais elevada, se distanciando ainda mais daquilo que o planeta pode prover, de forma sustentável.

7 Referencia Bibliográfica

ARELLANO, M. e BOND, Stephen. Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. **The Review of Economic Studies**, v. 58, n. 2, p. 277, 1991.

ARELLANO, M. e BOVER, O. Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. **Journal of Econometrics**, v. 68, n. 1, p. 29-51, 1995.

AVILA, E. **Evidências sobre curva ambiental de Kuznets e convergência das emissões de CO₂**. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 2011.

BAGLIANI, M.; BRAVO, G. e DALMAZZONE, S. A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator. **Ecological Economics**, v. 65, n. 3, p. 650-661, 2008.

BALTAGI, B. H. **Econometric Analysis of Panel Data**. 4th. ed. [S.l.]: Wiley, v. 13p. 747, 2005.

BLUNDELL, R. e BOND, Stephen. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. **Journal of Econometrics**, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

BOND, S.; HOEFFLER, A. e TEMPLE, J. **GMM estimation of empirical growth models**. Economics Papers 2001-W21, Economics Group, Nuffield College, University of Oxford, 2001.

BROCK, W. A. e TAYLOR, M. S. The Green Solow model. **NBER Working Papers**, 2004.

BROCK, W. A. e TAYLOR, M. S. Economic growth and the environment: a review of theory and empirics. In: AGHION, P.; DURLAUF, S. N. (Eds.). **Handbook of economic growth**. [S.l.]: Elsevier, 2005. v. 1 (Part B)p. 1749 - 1821.

- BROCK, W. A. e TAYLOR, M. S. The Green Solow model. **Journal of Economic Growth**, v. 15, n. 2, p. 127-153, 2010.
- BRUYN, S. M. DE. **Economic growth and the environment: An empirical analysis**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2000. p. 260
- BULTE, E. H. e SOEST, D. P. VAN. Environmental degradation in developing countries: households and the (reverse) Environmental Kuznets Curve. **Journal of Development Economics**, v. 65, p. 225–235, 2001.
- CAVIGLIAHARRIS, J.; CHAMBERS, D. e KAHN, J. Taking the “U” out of Kuznets - A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation. **Ecological Economics**, v. 68, n. 4, p. 1149-1159, 2009.
- DINDA, S. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. **Ecological Economics**, v. 49, n. 4, p. 431-455, 2004.
- DINDA, S. A theoretical basis for the environmental Kuznets curve. **Ecological Economics**, v. 53, n. 3, p. 403-413, 2005.
- GROSSMAN, G. M. e KRUEGER, A. B. Environmental impacts of a North American free trade agreement. **NBER Working Papers**, n. 3914, p. 57, 1991.
- GROSSMAN, G. M. e KRUEGER, A. B. Economic growth and the environment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.
- HERVIEUX, M.-S. e DARNÉ, O. **Environmental Kuznets Curve and Ecological Footprint: A Time Series Analysis**. LEMNA. Nantes: Laboratoire d'Economie et de Management Nantes-Atlantique, 2013.
- HOLTZ-EAKIN, D. e SELDEN, T. M. Stoking the Fires? CO2 Emissions and Economic Growth. **Journal of Public Economics**, v. 57, n. 1, p. 85-101, 1995.
- HSIAO, C. **Analysis of panel data**. Second Edi ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.
- ISLAM, N. Growth empirics: a panel data approach. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 4, p. 1127-1170, 1995.
- JOHN, A. e PECCHENINO, R. An overlapping generations model of growth and the environment. **The Economic Journal**, v. 104, n. 427, p. 1393-1410, 1994.
- KITZES, J. et al. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. **Ecological Economics**, v. 68, n. 7, p. 1991-2007, 2009.
- KITZES, J. A. e WACKERNAGEL, M. Answers to common questions in Ecological Footprint accounting. **Ecological Indicators**, v. 9, n. 4, p. 812–817, 2009.
- KLEVMARKEN, N. A. Panel Studies: What Can We Learn From Them? **European Economic Review**, v. 33, p. 523-529, 1989.
- KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **The American Economic Review**, v. 45, n. 1, p. 1-28, 1955.
- LEVINSON, A. The ups and downs of the environmental Kuznets curve. In: RECENT ADVANCES IN ENVIRONMENTAL ECONOMICS. **Anais...** Orlando, FL: [s.n.], 2002.
- LIEB, C. M. The Environmental Kuznets Curve and Flow versus Stock Pollution: The Neglect of Future Damages. **Environmental and Resource Economics**, v. 29, n. 4, p. 483-506, 2004.

- LOPEZ, R. The environment as a factor of production: the effects of economic growth and trade liberalization. **Journal of Environmental Economics and management**, v. 27, n. 2, p. 163–184, 1994.
- MANKIW, N. G.; ROMER, D. e WEIL, D. N. A contribution to the empirics of economic growth. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 107, n. 2, p. 407-437, 1992.
- PANAYOTOU, T. **Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development**. International Labour Office. [S.l.: s.n.], 1993.
- REES, W. E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. **Environment and Urbanization**, v. 4, n. 2, p. 121-130, 1992.
- SELDEN, T. M. e SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? **Journal of Environmental Economics and management**, v. 27, n. 2, p. 147–162, 1994.
- SELDEN, T. M. e SONG, D. Neoclassical growth, the J curve for abatement, and the inverted U curve for pollution. **Journal of Environmental Economics and management**, v. 29, n. 2, p. 162–168, 1995.
- SHAFIK, N. e BANDYOPADHYAY, S. **Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence**. Policy Research Working Paper Series. [S.l.]: The World Bank, 1992.
- STERN, D. I. **The Environmental Kuznets Curve**. World Development. [S.l.]: International Society for Ecological Economics, 2003.
- STERN, D. I. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.
- STOKEY, N. L. Are there limits to growth? **International Economic Review**, v. 39, n. 1, p. 1–31, 1998.
- WACKERNAGEL, M. e REES, W. **Our ecological footprint: reducing human impact on the earth**. [S.l.]: New Society Publishers, 1998. p. 160
- WWF. The Living Planet Report 2010. Biodiversity, Biocapacity and Development. WWF, 2010.
- GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2010. **National Footprint Accounts**, 2010 Edition. Disponível em: <http://www.footprintnetwork.org>.