

A estrutura demográfica tem efeitos nas emissões de poluentes? Evidências a partir de diferentes grupos de países¹

João Gabriel Pio²
Fernando Salgueiro Perobelli³
Eduardo Gonçalves⁴

Resumo: As emissões de poluentes relacionadas a fatores populacionais têm sido abordadas na literatura por diferentes perspectivas. Entre elas, existem avaliações sobre o tamanho da população, densidade populacional e estrutura demográfica. No entanto, questões sobre como e em que medida os fatores demográficos afetam as emissões ainda não são totalmente explicados. Este artigo, portanto, investiga a relação entre as emissões de poluentes e a estrutura demográfica. A pesquisa é motivada por sugestões na literatura de que padrões de consumo relevantes para as emissões dependem do ciclo de vida e da estrutura de consumo. Diferentes dos trabalhos anteriores, no qual ajustam regressões a coortes etários amplos, restritivos e de forma *ad hoc*, essa pesquisa incorpora polinômios aos coeficientes de regressão entre grupos etários. O uso de polinômios permite que um número reduzido de parâmetros seja incorporado na regressão, o que possibilita uma avaliação ao longo de toda estrutura etária. O conjunto de dados corresponde a 103 países, que são caracterizados em quatro grupos, de acordo com o nível de renda (*high, low, upper and lower*), analisados no período de 1970 a 2010. Os resultados mostram que a forma como a população está distribuída ao longo dos coortes etários produz diferentes níveis de emissões, porém, a estrutura de consumo é o fator predominante para compreensão dos efeitos da estrutura demográfica.

Palavras Chave: Emissões de CO₂, Estrutura etária, Análise polinomial

Abstract: Emissions of pollutants related to population factors have been addressed in the literature from different perspectives. These include assessments of population size, population density and demographic structure. However, questions about how and to what extent demographic factors affect emissions are not yet fully explained. Therefore, this paper investigates the relationship between pollutant emissions and the demographic structure. The research is motivated by suggestions in the literature that relevant consumption patterns for emissions depend on the life cycle and the consumption structure. Unlike previous studies, in which they adjust regressions to large, restrictive and ad hoc demographic cohorts, this research incorporates polynomials into the regression coefficients between age groups. The use of polynomials allows a reduced number of parameters to be incorporated in the regression, which allows an evaluation throughout the age structure. The database corresponds to 103 countries, which are characterized in four groups, according to the level of income (*high, low, upper and lower*), analyzed between 1970 and 2010. The results show that the way the population is distributed over the age cohorts produces different levels of emissions, but the consumption structure is the predominant factor for understanding the effects of the demographic structure.

Keywords: CO₂ emissions, Age structure, Polynomial analysis

JEL Classification: Q5; J1; C02

Área ANPEC: Área 11 - Economia Agrícola e do Meio Ambiente

¹ Os autores agradecem ao apoio financeiro da FAPEMIG, CNPq e CAPES.

² Doutorando PPGE/UFJF.

³ Professor Associado do Departamento de Economia da UFJF e Bolsista de Produtividade do CNPq.

⁴ Professor Associado do Departamento de Economia da UFJF e Bolsista de Produtividade do CNPq..

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e populacional são os fatores mais importantes associadas à atividade humana que explicam os aumentos nos níveis de emissões de CO₂ (DIETZ; ROSA, 1994; EHRILICH; HOLDREN, 1971). Logo, a maior compreensão desses fatores é importante para correta formulação de políticas que visam reduzir as emissões.

Os efeitos com relação ao crescimento econômico são bem conhecidos e, de modo geral, são positivos (e.g., MARRERO, 2010; OZCAN, 2013; SHARMA, 2011). Por outro lado, as investigações com relação aos efeitos da população nas emissões envolvem tamanho da população (COLE, M.A., NEUMAYER, 2004; SHI, 2003), urbanização e densidade populacional (POUMANYVONG; KANEKO, 2010; SHAHBAZ et al., 2015), estrutura familiar (JIANG; HARDEE, 2011). No entanto, a forma como a estrutura demográfica afeta a emissões continua sendo objeto de debate.

Nesse cenário, esforços metodológicos e empíricos têm sido realizados para avaliar os efeitos da estrutura demográfica. A população em idade ativa (15 a 64 anos) teve um impacto negativo nas emissões de CO₂ nos países desenvolvidos, porém, efeitos positivos nos países em desenvolvimento (FAN et al., 2006). Por outro lado, Martínez-Zarzoso e Maruotti (2011a) obtiveram resultados não significativos, tanto para população em idade ativa quanto para população idosa, para países em desenvolvimento. Liddle (2011) identifica uma elasticidade de emissões positiva para adultos jovens (com idade entre 20 e 34 anos) e uma elasticidade negativa para adultos e idosos (35-64 e 70+). Diferentemente, York (2007), analisando 14 países da União Europeia (EU), obteve elasticidade positiva para população com mais 65 anos.

Do exposto anteriormente, observa-se que estudos anteriores avaliam os efeitos demográficos sobre questões ambientais considerando uma coorte na estrutura etária limitada, muitas vezes imputada de forma *ad hoc*. As diferentes definições no coorte etário, possivelmente, impactam os resultados e avaliações nos trabalhos empíricos e, portanto, podem levar a conclusões “equivocadas” sobre o tema.

Uma vez que a estrutura etária varia em razão da estrutura econômica e característica sociais, a especificação completa da estrutura etária se faz necessária para compreender seus efeitos sobre as emissões. Portanto, o principal objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da estrutura demográfica sobre as emissões de CO₂.

Duas hipóteses são estabelecidas para avaliar o efeito da estrutura demográfica nas emissões: *i*) o efeito da estrutura demográfica nas emissões de CO₂ varia de forma contínua e possui diferentes níveis de acordo com o coorte etário; *ii*) a estrutura econômica dos países influencia na forma como cada coorte etário afeta as emissões.

Esse estudo faz uso de um conjunto de dados em painel composto por 103 países analisados entre 1970 e 2010 em intervalos de 5 anos. Os países foram divididos em 4 grupos: *i*) Alta Renda (*high*); *ii*) Baixa Renda (*low*); *iii*) Média-Alta renda (*upper*); e *iv*) Média-Baixa renda (*lower*). A inovação e a contribuição dessa pesquisa residem na avaliação abrangente e contínua da estrutura demográfica nas emissões de CO₂ por meio da construção polinomial. Isso possibilita estimar o efeito conjunto de todas as variáveis demográficas, permitindo usar toda a informação disponível nas distribuições etárias.

Além dessa introdução, esse artigo está dividido em mais quatro seções: *ii*) Na seção dois é realizada uma breve discussão sobre os principais trabalhos na literatura; *iii*) Na terceira são apresentados os procedimentos metodológicos e base de dados adotados; *iv*) Na quarta são apresentados os resultados estatísticos e as discussões; e *v*) Por fim, são tecidas as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No começo da década de 1970, Ehrlich e Holdren (1971) propuseram uma especificação teórica para avaliar os efeitos da ação humana sobre o meio ambiente, conhecido como modelo IPAT ($I = P \times A \times T$). Em que I refere-se ao impacto ambiental; P o tamanho da população; A é o nível de afluência ou consumo per capita; e T o fator tecnológico.

Por pressupor que os efeitos das variáveis sobre as emissões são proporcionais, o modelo IPAT é considerado limitado (DIETZ; ROSA, 1994; ROCA, 2002). Visando ampliar o poder de análise, Dietz e Rosa (1994) especificaram uma forma alternativa para analisar os efeitos da ação humana no meio ambiente, conhecida como modelo STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology*);

$$I_i = \alpha P_i^\beta A_i^\gamma T_i^\delta e_i \quad (1)$$

Em que α é um constante; β , γ e δ referem-se as elasticidades do impacto ambiental para P , A , T , respectivamente; e e_i é o erro. O subscrito i refere-se a unidade de investigação (e.g. região, país, etc).

Assim como seu predecessor, o modelo STIRPAT mantém a estrutura multiplicativa do modelo IPAT, porém, destaque-se a possibilidade de examinar múltiplos fatores que podem influenciar o meio ambiente, além das variáveis chave que compõe o núcleo central do modelo. Devido à essa flexibilidade, as variáveis relevantes são sempre adicionadas ao modelo original para alcançar vários propósitos de pesquisa.

Com relação aos fatores relacionados à população, foco principal desse *paper*, os resultados empíricos apontam para um efeito positivo dessa variável (DALTON et al., 2008; MENZ; WELSCH, 2012; ZHOU; LIU, 2016). Porém, a maior parte dos estudos concentram-se no efeito do crescimento populacional ou nos níveis de densidade. Como destacado por Jiang e Hardee (2009) e Yang et al. (2015), mudanças populacionais se referem a mudanças não apenas no tamanho da população, ou em sua taxa de crescimento, mas também na estrutura etária, distribuição, qualidade e assim por diante.

Os trabalhos que avaliam os efeitos da estrutura demográfica concentram-se em coortes etários específicos, obtendo resultados diversos, de acordo a especificação. Os estudos que examinam a população em idade ativa (população de 15 a 64 anos) mostram que um porcentual maior da população nessa faixa etária leva a maiores consumos de energia e, conseqüentemente, mais emissões (SHI, 2003; YORK; ROSA; DIETZ, 2003). No entanto, Martínez-Zarzoso e Maruotti, (2011a), considerando a mesma faixa etária, obtiveram resultados opostos ou não significativos.

O efeito da população com mais de 65, isto é, fora da idade ativa, é examinada por York (2007) e Zhu e Peng (2012), no qual encontram que o envelhecimento da população contribui para o aumento das emissões. Em contraste, tais evidências não foram suportadas em trabalhos como os de York et al. (2003) e Cole e Neumayer (2004).

Alguns trabalhos tentaram avaliar o efeito da estrutura etária por meio da maior desagregação populacional, construindo diferentes coortes, tais como: (20-34); (35-49); (50-69); e 70 anos ou mais (LIDDLE, 2011; LIDDLE; LUNG, 2010). De modo geral, os resultados mostram que a influência da estrutura etária é significativa e varia entre as coortes de estudos, países e regiões. A Tabela 1 apresenta o resumo dos trabalhos supracitados.

Tabela 1 – Resumo da especificação trabalhos empíricos, variável dependente, estrutura etária e base de dados.

Autor	Variável dependente	Estrutura etária	Estrutura de dados
Yang et al., (2015)	Per capita carbon emissions	NS (aged 0-14); 0.059 (aged 15-64); 0.065 (aged ≥ 65)	Beijing (China), 1984-2012
Zhu and Peng (2012)	Total CO2 emissions	1.32 (aged 16-64)	China, 1978-2008
Menz and Welsch (2011)	Total CO2 emissions	-1.17 (aged 30-44); -1.77 (aged 45-59)	26 OECD countries, 1960-2005 at 5-year intervals
Martinez-Zarzoso and Maruotti (2011)	Total CO2 emissions	NS (aged 15-64); NS (aged ≥65)	88 developing (non-OECD) countries, 1975-2003, yearly data
Liddle (2011)	CO2 emissions from domestic transport	0.82 (aged 20-34); -0.22 (aged 35-49); -0.77 (aged 50-69); -0.36 (aged ≥70)	22 OECD countries, 1960-2007, yearly data
Jorgenson (2007)	Total energy use	0.99 (aged 15-64)	57 LDC; 1990-2005, yearly data
Liddle and Lung (2010)	Total CO2 emissions	0.20 (aged 20-34); -0.36 (aged 35-49); -0.30 (aged 50-64); -0.48 (aged 35-64)	17 OECD countries, 1960-2005 at 5-year intervals
York (2007a)	Total energy use	0.96 (aged ≥ 65)	14 EU countries, 1960 - 2000, yearly data
York (2007b)	Total energy use	1.74 (aged 15-64)	14 Asian countries, 1971-2002, yearly data
Liddle (2004)	Road energy use per capita	0.08 (aged 20-39)	23 OECD countries, 1960-2000, at 10 year
Cole and Neumayer (2004)	Total CO2 emissions	NS (aged <15); NS (aged 15-64)	86 countries, 1975-1998, yearly data
York, Rosa e Dietz (2003)	Total CO2 emissions	NS (aged 15-64)	Cross-section: 146 countries, 1996
Shi (2003)	Total CO2 emissions	0.63 (aged 15-64)	88 countries, 1975-1996, yearly data

Fonte: Elaboração própria.

Do exposto, obtém-se que os estudos anteriores avaliam os efeitos demográficos sobre questões ambientais considerando um coorte limitado da estrutura etária, muitas vezes imputada de forma *ad hoc*. Essa limitação pode ser a razão para os diferentes resultados encontrados. Além disso, a análise não contínua de toda distribuição pode levar a interpretações equivocadas sobre determinado coorte etário. Dada essa limitação, portanto, esse artigo buscar avaliar os efeitos da estrutura demográfica considerando toda distribuição etária, e com isso, pode contribuir para o aprimoramento das avaliações da população e estrutura demográfica nas emissões.

3. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA

3.1 Metodologia

Com base no modelo STIRPAT (Eq. 1), esse artigo procura incorporar maiores níveis de coortes na estrutura demográfica para avaliar o efeito da distribuição etária nas emissões de poluentes;

$$\ln I_{i,t} = \beta \ln P_{i,t} + \gamma \ln A_{i,t} + \delta \ln T_{i,t} + b_1 s_{i,t}^{(1)} + \dots + b_j s_{i,t}^{(j)} + \tau_i + \xi_t + e_{i,t} \quad (2)$$

Em que $I_{i,t}$ é a variável dependente que refere-se ao nível de emissões, que nessa pesquisa utiliza-se o CO2, para o país i no tempo t . $P_{i,t}$ é a densidade populacional; $A_{i,t}$ refere-se a Absorção Interna, $T_{i,t}$ é medido pela relação Intensidade de uso de energia em relação ao PIB. $s_{i,t}^{(j)}$ representa a parcela do total da população para 16 coortes etários $J - j \in (0 - 4, \dots, 75+)$. Por fim, τ_i e ξ_t são os efeitos fixos de tempo e país, respectivamente.

Há ao menos dois principais problemas com a estimação direta da eq. (2): *i*) as variáveis demográficas são altamente correlacionadas e geram problemas usuais de multicolinearidade; e *ii*) Como o número máximo de observações é menor que o número de regressores demográficos (16 grupos etários), a matriz de covariância é singular.

Na literatura, a solução usual é incluir apenas um número limitado de coortes etários, definindo de forma *ad hoc* (MENZ; WELSCH, 2012; SHI, 2003; YANG et al., 2015). No entanto, isso pode trazer “prejuízos” quando o objetivo principal é avaliar o efeito da estrutura demográfica no meio ambiente. Portanto, diferente da solução usual, esse artigo faz uso da metodologia empregada por Fair e Dominguez (1991), Higgins (1998) e Arnott e Chaves (2012), a qual permite que os coeficientes demográficos, b_j , satisfaçam um polinômio de ordem k , o que permite incorporar toda informação do perfil demográfico.

A partir da Eq. (2), impõem-se uma restrição aos coeficientes demográficos, b_{it} , no qual devem satisfazer um polinômio de ordem k ;

$$b_j = D_0 + D_1j + D_2j^2 + \dots + D_kj^k \quad (3)$$

Em que $j = 1, \dots, J$. Substituindo a expressão acima na eq. (2) obtemos;

$$\ln I_{i,t} = \beta X_{i,t} + D_0 + D_1 \sum_{j=1}^J j s_{i,t}^{(1)} + \dots + D_k \sum_{j=1}^J j^k s_{i,t}^{(j)} + \tau_i + \xi_t + e_{i,t} \quad (4)$$

Em que $X_{i,t}$ representa as demais variáveis de controle. Rearranjando a equação 4 obtém-se;

$$\ln I_{i,t} = \beta X_{i,t} + D_1 Z_1 + \dots + D_k Z_k + \tau_i + \xi_t + e_{i,t} \quad (5)$$

Em que $Z_k = \sum_{j=1}^J \left[j^k s_{i,t}^{(j)} - \frac{j^k}{J} \right]$.

Observe que os coeficientes demográficos somam uma constante, $\sum_{j=1}^J s_{i,t}^{(j)} = 1$. Para evitar problemas associados a multicolinearidade com os fatores fixos, impõem-se a restrição nos coeficientes demográficos $\sum_{j=1}^J b_j = 0^5$.

A definição da ordem k do polinômio implica que existe $k-1$ pontos de inflexão na estrutura demográfica. Isto é, a ordem k refere-se às mudanças na estrutura demográfica que afetam as emissões⁶.

Usar os polinômios com os coortes etários para estimar os efeitos demográficos tem vários benefícios. O primeiro é a possibilidade de estimar o efeito conjunto de todas as variáveis demográficas nas regressões, o que permite usar toda a informação disponível nas distribuições etárias, mesmo depois de impor uma estrutura polinomial. Em segundo lugar, a utilização dessa estratégia permite avaliar os resultados da estrutura demográfica de forma indireta e intuitiva. Isso ocorre porque após a obtenção dos parâmetros dos polinômios é possível retornar à equação fundamental e avaliar os efeitos de cada coorte etário sobre as emissões.

3.2 Base de Dados

Esse estudo faz uso de um conjunto de dados em painel composto por 103 países analisados entre 1970 e 2010 em intervalos de 5 anos. Os países foram divididos em 4 grupos: *i*) Alta

⁵ A restrição $\sum_{j=1}^J b_j = 0$ impõe que $D_0 = -\frac{1}{J} (D_1 \sum_{j=1}^J j + D_2 \sum_{j=1}^J j^2 + \dots + D_k \sum_{j=1}^J j^k)$. Especificação similar foi adotada por Fair e Dominguez (1991), Higgins (1998) e Arnott and Chaves (2012).

⁶ A escolha da ordem k do polinômio é feita mediante a testes estatísticos que são discutidos da seção de resultados.

Renda (*high*); *ii*) Baixa Renda (*low*); *iii*) Média-Alta renda (*upper*); e *iv*) Média-Baixa renda (*lower*). Segue-se a definição da *World Bank* para classificar o nível de renda de cada país. Essa divisão faz-se necessária uma vez que o nível de renda do país está relacionado com a taxa de fertilidade e mortalidade, estrutura demográfica e crescimento da população (BRUECKNER; SCHWANDT, 2015; CUTLER; DEATON; LLERAS-MUNEY, 2006; HERZER; STRULIK; VOLLMER, 2012). A Tabela 1A em anexo apresenta a relação de países por grupo.

O conjunto de variáveis utilizados nessa pesquisa origina-se de três fontes distintas. Os dados referentes às emissões (CO_2), mensurados pela quantidade de emissões de dióxido de carbono; densidade populacional (*dens*); eficiência do uso de energia (*eny*), medidos pela relação entre quantidade de óleo equivalente e PIB; são obtidos a partir a *World Bank*. A absorção interna real (*absor*), referente ao consumo das famílias, governo e investimento, (*ppp*, in mil. 2011US\$), fazem parte do banco de dados da *Penn World Table*. Por fim, as variáveis relacionadas aos coortes etários (*s*) são obtidas a partir da *United Nations*. Na Tabela 2 é apresentada a relação de variáveis, a descrição e fonte dos dados.

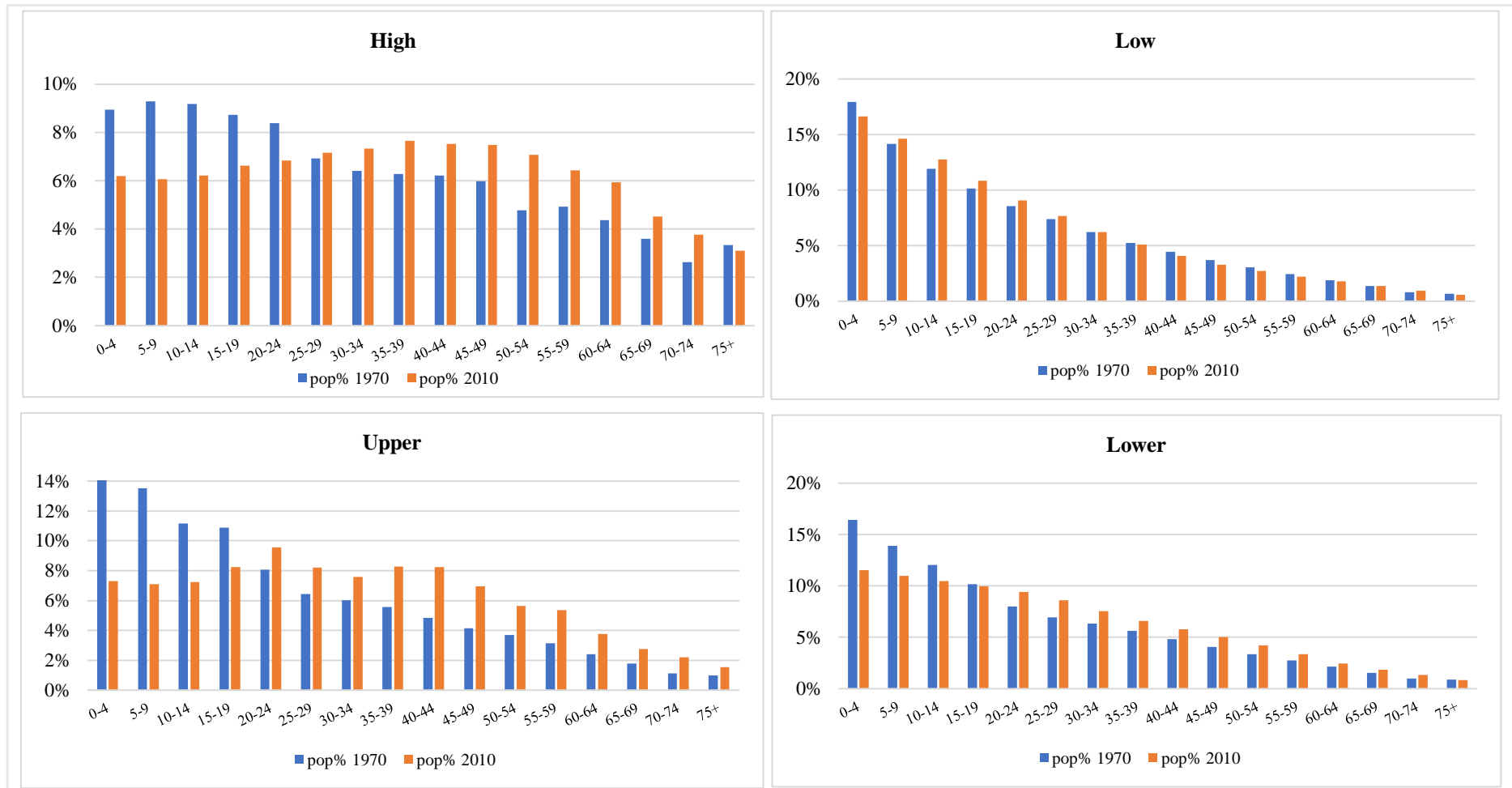
Tabela 2 – Variáveis utilizadas, descrição e fonte

Variável	Descrição	Fonte
co2	Carbon dioxide emissions (kt)	World Bank
abs	Real domestic absorption, (real consumption plus investment), PPPs (in mil. 2011US\$)	Penn World Table
eny	Energy Use by GDP (Output-side real GDP at current PPPs (in mil. 2011US\$)	World Bank
dens	people per sq. km of land area	World Bank
S	percentual da população por faixa etária	United Nations

Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 1 são apresentados os percentuais da população por coorte etário para anos de 1970 e 2010 e para os quatros grupos de países. Observa-se uma alteração demográfica nos países de *high* e *upper* renda. Isto é, em 1970 o maior percentual da população concentrava-se nas primeiras faixas etárias (0-24), sendo (5-9) o grupo com maior percentual (9,3%). Em 2010, por sua vez, ocorre um “deslocamento”, o maior percentual da população passa a pertencer ao intervalo de (30-59), com o maior percentual para o grupo (35-39) com 7,7%. Por outro lado, quando analisada a estrutura demográfica para os países de menor renda (*low* e *lower*), observa-se que, embora tenha ocorrido uma diminuição da população com menor idade (0-4) e aumento da população com mais idade (15-59), a estrutura etária ainda se mantém, isto é, a população jovem (0-14) ainda é predominante nesses países.

Figura 1 – Percentual demográfico para os 16 coortes etários e grupos de países nos anos 1970 e 2010



Fonte: Elaboração própria.

4. RESULTADOS ESTATÍSTICOS

Primeiramente, ressalta-se que a escolha do grau polinomial para as variáveis demográficas se fez por meio do ajustamento do modelo de acordo com os testes aplicados, mantendo um compromisso entre parcimônia e poder estatístico. Como os modelos com graus mais baixos são casos especiais de suas contrapartes de alto grau, aplicou-se o teste de Wald para modelos aninhados para avaliar qual ordem de polinômio era mais apropriada. Os resultados dos testes são apresentados no anexo. Tal procedimento também é realizado por Fair e Dominguez (1991), Higgins (1998) e Arnott and Chaves (2012).

Dada a estrutura dos dados, com dimensão das séries temporais (9 períodos) do painel menor do que a dimensão da *cross-section*, questões relacionadas à estacionariedade dos dados não são problemas dominantes. Duas estratégias metodológicas são empregadas para avaliar o efeito da estrutura demográfica nas emissões de CO₂. O primeiro é o *OLS* com efeitos fixos de tempo e país, além da inclusão de erros padrão robustos para lidar com heterocedasticidade. O segundo, envolve questões relacionadas à possível presença de correlação serial, em decorrência da presença de painel dinâmico. Para contornar esse problema, foi incluído no modelo a variável dependente defasada em todas as estimações. No entanto, visando mitigar problemas relacionados à endogeneidade, aplica-se o estimador *System GMM* desenvolvido por Arellano e Bond (1991) e Arellano e Bover (1995).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do impacto da estrutura demográfica nas emissões de CO₂ para os quatro grupos de países. Os resultados para os modelos (1) a (3) referem-se à estimação por *OLS* com erros padrão robustos. Já o modelo (4) diz respeito às estimações por *System GMM* para estimação do painel dinâmico.

Para validação dos pressupostos subjacentes ao método *System GMM*, é importante analisar os resultados dos testes de *m1*, *m2* e *Sargan* teste. Os dois primeiros referem-se aos testes AR para a autocorrelação dos resíduos. Por construção, os resíduos da equação diferida devem possuir correlação em série, *AR(1)*, e os resíduos diferenciados, *AR(2)*, não devem apresentar comportamento significativo. Isto é, se os erros dos modelos propostos não são correlacionados em série, deve haver evidência de correlação em série de primeira ordem, captado pelo teste *m1*, e nenhuma evidência de correlação em série de segunda ordem, *m2*. Ambos testes têm como hipótese nula a ausência de autocorrelação dos resíduos. O teste de *Sargan*, por sua vez, é um teste de restrições de sobreidentificação. A hipótese nula conjunta é que os instrumentos são válidos, ou seja, não correlacionados com o termo de erro, e que os instrumentos não incluídos são excluídos corretamente da equação estimada.

Como pode-se observar na Tabela 3, todos os testes relacionados a estimação por *System GMM* apontam para presença de correlação serial em primeira ordem (*m1*) e ausência em segunda ordem (*m2*) e indicam que a sobreidentificação foi corretamente especificada (*Sargan test*). Além disso, constata-se que a variável dependente defasada (CO_{2t-1}) foi significativa em todos os modelos. Portanto, há evidência que apontam para a especificação adequada por *System GMM*.

Tabela 3 – Resultados das variáveis no modelo IPAT e dos coortes etários nas emissões de Co₂ para os entre 1970 e 2010

Variáveis	High				Low			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
dens	-0.05	-	-0.07	-0.02	-1.33	-	-1.65	-1.79**
absor	0.85***	-	0.77***	0.37***	2.62***	-	2.72***	1.91***
eny	0.55***	-	0.49***	0.25***	1.60***	-	1.63***	0.97***
z1	-	5.75***	2.43*	3.53***	-	3.35	-8.22*	-10.04***
z2	-	-0.61**	-0.34*	-0.50***	-	-0.22	1.49*	1.60***
z3	-	0.02*	0.01*	0.02***	-	0.00	-0.07*	-0.07***
co2t-1	-	-	-	0.28**	-	-	-	0.22***
N	360	360	360	320	90	90	90	80
r2	0.74	0.57	0.73	-	0.8	0.47	0.80	-
ar(1)	-	-	-	0.002	-	-	-	0.017
ar(2)	-	-	-	0.175	-	-	-	0.959
sargan test	-	-	-	0.665	-	-	-	1.00

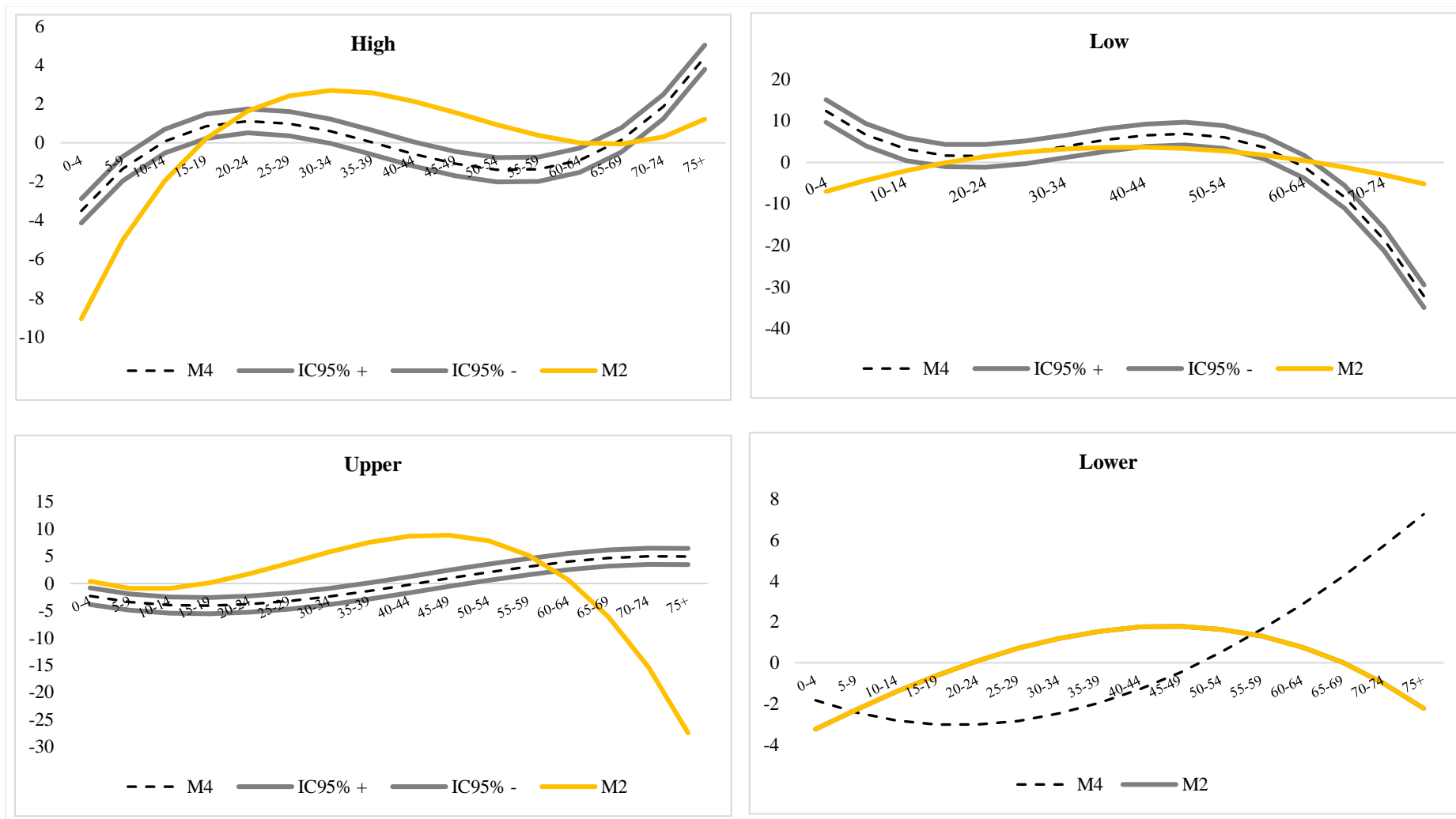
Variáveis	Upper				Lower			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
dens	0.35	-	1.30***	0.84***	-0.3	-	-0.17	-0.04
absor	0.97***	-	0.85***	0.74***	0.93***	-	0.92***	0.64***
eny	0.56***	-	0.50***	0.42***	0.78***	-	0.78***	0.45*
z1	-	-3.83	-1.91	-1.98*	-	1.01	-1.72	-2.34
z2	-	0.97*	0.34	0.33**	-	-0.02	0.3	0.43
z3	-	-0.05**	-0.01	-0.01	-	0	-0.01	-0.02
co2t-1	-	-	-	0.22***	-	-	-	0.32***
N	234	234	234	208	243	243	243	216
r2	0.90	0.71	0.83	-	0.83	0.76	0.83	-
ar(1)	-	-	-	0.00	-	-	-	0.006
ar(2)	-	-	-	0.65	-	-	-	0.449
sargan test	-	-	-	1.00	-	-	-	0.999

Fonte: Elaboração própria.

* Em todos os modelos foram incluídos *dummies* de tempo e país.

Por fim, como discutido, a utilização do polinômio de ordem k para avaliar o efeito da estrutura demográfica permite realizar análises indiretas e intuitivas, “*post* estimação”, por meio do retorno à equação original (Eq. 2). A Figura 2 apresenta os resultados indiretos de cada grupo de países e coortes etários sobre as emissões de CO₂.

Figura 2 – Efeito da estrutura demográfica nas emissões de Co2 para países de High, Low, Upper e Lower renda.



Fonte: Elaboração própria.

4.1 Discussão

O primeiro ponto a se discutir são as variáveis do modelo IPAT. O efeito esperado da densidade populacional nas emissões é bem conhecido da literatura e pode ocorrer por meio três formas: *i*) menores níveis de consumo de energia do transporte (KENWORTHY; LAUBE, 1999; LIDDLE, 2013; RECHERCHE, 1996); *ii*) menores consumos de energia elétrica nas construções (LARIVIÈRE; LAFRANCE, 1999); *iii*) redução nos níveis de *greenhouse gas emissions* (LIDDLE, 2004; MARCOTULLIO et al., 2012).

Embora não significativo, todos os grupos de países obtiveram sinal esperado, isto é, negativo. A exceção ocorre com o grupo de países *upper*, no qual a densidade é positiva e significativa. Uma possível explicação reside nos trabalhos (BURNEY, 1995; JONES, 2016; PARIKH; SHUKLA, 2002), no qual mostram que o processo de industrialização, com rápido aumento de consumo de insumos energéticos, é fato que explica o efeito da densidade populacional ser positiva para esse grupo de países.

As demais variáveis do modelo IPAT obtiveram resultados esperados e estão em conformidade com a literatura, isto é, efeito positivo e significativo para consumo real (AL-MULALI et al., 2015; MENZ; WELSCH, 2012) e uso de energia em proporção do PIB (MARTÍNEZ-ZARZOSO; MARUOTTI, 2011b; YANG et al., 2015).

Por fim, a análise direta dos coeficientes do polinômio torna-se complexa e não intuitiva. Uma forma de lidar com esse problema é “*plotar*” os resultados dos coeficientes obtidos utilizando a Equação 2, conforme discutido.

Na Figura 2 são apresentados os resultados dos modelos M2 e M4 para todos os grupos de países. Primeiro, observa-se que ao “*plotar*” o modelo restrito (M2), todos os grupos de países possuem o efeito “predominante” na população economicamente ativa (15-64), sendo que para os países de alta renda (*high*), após os 65 anos ou mais ocorre uma elevação. Isso reflete a estrutura demográfica desses países, no qual possui maior população nessa faixa etária, com estrutura de consumo particular.

Por outro lado, com a inclusão das variáveis de controle, sobretudo as econômicas, o efeito da estrutura demográfica se altera. Isso ocorre porque o polinômio decompõe os efeitos da estrutura etária mantendo os demais efeitos constantes. Logo, há indícios que a estrutura de consumo da população é o fator predominante nos efeitos dos coortes etários.

Os resultados do modelo M4, por sua vez, refletem os efeitos “puros”, ou ao menos com exclusão dos fatores econômicos e de concentração populacional. Primeiramente, considerando os países do grupo (*high*), constata-se uma ligação negativa para os dois primeiros coortes etários (0-9). Observe que o polinômio possui um movimento crescente e marginal com ponto de inflexão no coorte etária de 20 a 24 anos. Por fim, note que os coeficientes implícitos atingem um novo ponto de inflexão no grupo 50-54 e mantem um crescimento positivo.

De modo geral, é esperada uma menor influência da estrutura etária nas emissões de CO₂ nos coortes (0-14) e (65+), em decorrência dos níveis mais baixos de atividade. Por outro lado, espera-se que os coortes como população em idade ativa (15-64) possuam efeito positivos e sejam relativamente maiores. No entanto, um resultado interessante é obtido, os coortes etários de (10-39) foram positivos, indicando que indivíduos/população nessa faixa etária produzem maiores níveis de emissão e (40-64) foram negativos, evidenciando que a população nessa faixa etária emite, em média, menos que os demais. Além disso, os resultados apontam que um aumento da população com mais de 65 anos eleva os níveis de emissões CO₂, quando comparado aos demais coortes etários.

Embora a comparação direta com os demais trabalhos não seja possível, em decorrência dos procedimentos metodológicos e aos maiores intervalos de coortes etários utilizados, os trabalhos de York (2007a) e Liddle e Lung (2010) ajudam a compreender os resultados para o grupo de países de alta renda (*high*), uma vez que utilizam apenas países desenvolvidos e, no caso do segundo autor, maior decomposição da estrutura etária é implementada.

Para população acima dos 65 anos, York (2007) e Liddle and Lung (2010) obtiveram um coeficiente significativo e positivo. A hipótese levantada pelos autores afirma que uma porcentagem maior de pessoas com mais de 65 anos eleva o consumo de energia no setor residencial, uma vez que essa faixa etária tende a passar mais tempo em casa e possuir menores membros nas famílias.

Embora não seja claro o porquê de mais pessoas no coorte etário de (40-64) diminuam os níveis de emissões, os resultados de Liddle and Lung (2010) mostram que a proporção de indivíduos entre 35 e 64 anos possuem coeficientes negativos e significativos tanto para consumo de energia residencial quanto para consumo residencial de eletricidade.

Considerando o grupo de países de baixa renda (*low*), observa-se que a população de 0-59 anos possui efeitos superiores à população idosa (60+). Além disso, há uma concentração relativamente maior de emissões na população nos três primeiros coortes etários (0-14), o que indica que esses intervalos se sobrepõem aos demais na estrutura demográfica. Os trabalhos que buscam analisar o efeito da estrutura demográfica em países não desenvolvidos, avaliam apenas os intervalos da poluição em idade ativa (15-64) e, em alguns casos, a população idosa (65 anos ou mais). Em sua maioria, os resultados possuem sinal positivo, porém, não significativo.

Para o grupo de países de média alta renda (*upper*), observa-se que o coorte etário a partir dos 45+ torna-se positivo, o que indica que, em média, a população nessa faixa etária contribui mais para emissões que as demais. Novamente, a literatura não tem explorado os efeitos da estrutura demográfica para conjuntos de países em desenvolvimento, possivelmente, por conta da maior dificuldade na obtenção dos dados.

Por fim, embora não significativo, a curva para os países de baixa média renda (*lower*) é similar ao de (*upper*), isto é, a população com idade acima de 45 anos contribui, em média, com um percentual maior que os demais coortes etários.

Com base nos resultados encontrados, ao menos duas hipóteses podem ser constatadas: *i*) a estrutura demográfica parece exercer influência nas emissões, isto é, a forma como a população está distribuída nos diferentes coortes etários tem efeitos sobre os níveis de emissões de CO₂; e *ii*) a estrutura de consumo da população produz resultados diferentes nas emissões de CO₂ para cada coorte etário. Isto é, a forma como os indivíduos nos diferentes coortes etários consomem é o fator predominante para a compreensão dos efeitos da estrutura demográfica nas emissões.

4.2 Teste de robustez

Para avaliar a consistência dos modelos estimados, na Tabela 4 são apresentados os resultados para mais 7 modelos. Os modelos **M1** a **M4** referem-se as regressões anteriores para os 4 grupos de países. Porém, ao invés de considerar a estrutura polinomial para avaliar os efeitos demográficos, utiliza-se os resultados anteriores para delinear os coortes etários da população. Isto é, para o modelo **M1**, países de alta renda (*high*), considera-se os coortes etários de (0-9), (10-39), (40-64) e (65+). Para **M3** (*upper*) e **M4** (*lower*) são considerados os coortes (0-44) e (45+), e (0-49) e (50+), respectivamente. A exceção é o modelo **M2**, no qual no coorte etário positivo, de acordo com o polinômio, é dividido em duas partes (0-24) e (25-59). O objetivo é

capturar os efeitos do primeiro coortes etários que possui um efeito superior nas emissões. Além disso, inclui-se o coorte (60+) para completar a especificação do polinômio.

No modelo *M5*, por sua vez, é realizada a análise com a estrutura polinomial considerando os países desenvolvidos, contudo, delimita-se a localidade, isto é, apenas os países da Europa central são avaliados. O objetivo é avaliar se ao considerar países da mesma localidade, os resultados se mantêm. Por fim, nos modelos *M6* e *M7* são introduzidas as variáveis de proporção de produção industrial (*ind*) e agrícola (*agr*) em relação ao PIB, considerando os grupos de países de alta e média alta renda (*high* e *upper*). O objetivo é avaliar se a estrutura de produção dos grupos de países modifica os efeitos dos coortes etários.

Tabela 4 – Resultados do impacto da estrutura demográfica nas emissões de CO₂ segundo diferentes coortes etários (Estimação por System GMM). Período: 1970-2010

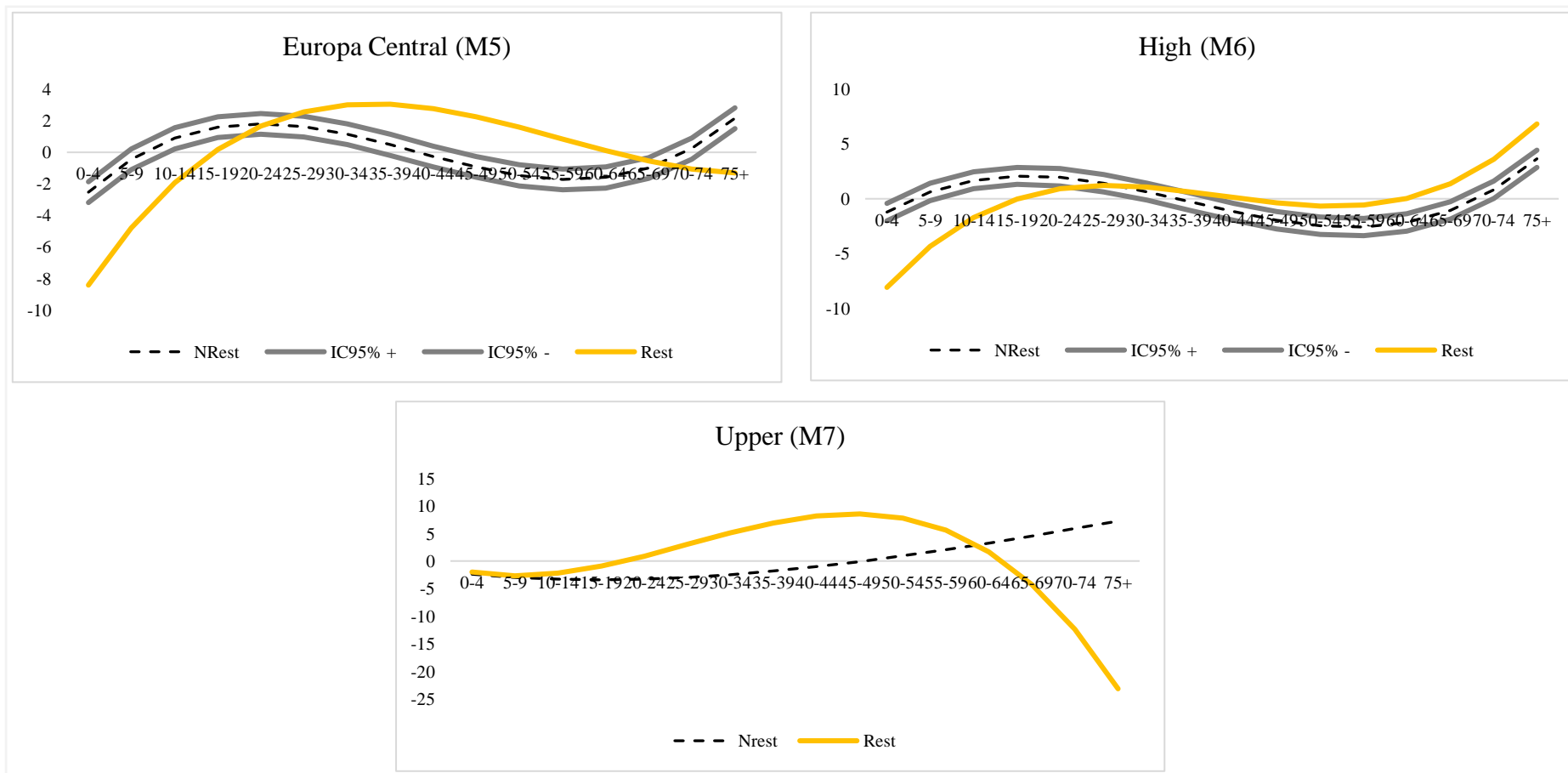
Variáveis	high (M1)	Low (M2)	upper (M3)	Lower (M4)	Europe central (M5)	high2 (M6)	upper2 (M7)
dens	-	-	-	-	-0.04	-0.09	0.40
absor	0.39***	2.19***	0.78***	0.67***	0.53***	0.81***	0.77***
eny_gdp	0.28***	1.27***	0.47***	0.42**	0.40***	0.44**	0.60***
p0_9	-0.42***	-	-	-	-	-	-
p10_39	0.46**	-	-	-	-	-	-
p40_64	-0.17	-	-	-	-	-	-
p65+	0.22	-	-	-	-	-	-
p0_24	-	1.19	-	-	-	-	-
p25_59	-	-0.85	-	-	-	-	-
p60+	-	-1.77***	-	-	-	-	-
p0_44	-	-	-0.64***	-	-	-	-
p45+	-	-	1.21***	-	-	-	-
p0_49	-	-	-	-0.22	-	-	-
p50+	-	-	-	0.06	-	-	-
z1	-	-	-	-	3.38***	3.28*	-0.96
z2	-	-	-	-	-0.48***	-0.53*	0.14
z3	-	-	-	-	0.02***	0.02**	0.00
co2t-1	0.28*	0.28***	0.20***	0.47***	0.44***	0.19	0.26*
ind	-	-	-	-	-	0.05	0.09
agr	-	-	-	-	-	-0.01	-0.03
ar(1)	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.04	0.07
ar(2)	0.23	0.78	0.55	0.73	0.27	0.13	0.92
sargan test	0.78	1.00	1.00	0.99	0.11	0.27	0.69
N	320	80	208	216	72	111	126

Fonte: Elaboração própria.

* Em todos os modelos foram incluídas *dummies* de tempo e país

Observa-se na Tabela 4 que, embora não significativos para todos, os resultados dos coortes etários correspondem, exatamente, aos encontrados na estrutura polinomial. Isto é, os sinais encontrados correspondem a estrutura definida por meio dos polinômios. Ademais, na Figura 3 é plotada os resultados para os modelos *M5* a *M7*. Constata-se, portanto, que a consideração de grupos de países e a inclusão de outras variáveis não alteram os resultados encontrados anteriormente.

Figura 3 – Teste de Robustez, efeito da estrutura demográfica nas emissões de Co2, países selecionados e controle da estrutura de produção



Fonte: Elaboração própria.

CONCLUSÕES

Os efeitos da ação humana nas emissões CO₂ têm sido analisados por meio da especificação teórica IPAT. Os resultados com relação às variáveis e econômicas e populacionais (em termos de tamanho e crescimento) foram exaustivamente testadas e seus efeitos são bem estabelecidos na literatura, conforme discutido ao longo desse artigo. No entanto, os efeitos com relação à estrutura demográfica são poucos explorados e/ou não se tem uma direção quanto aos seus efeitos nas emissões de CO₂. Os trabalhos que buscaram avaliar tal questão, em sua maioria, especificaram coortes etários limitados e selecionados de forma *ad hoc*, o que pode levar a conclusões e análises equivocadas.

Uma vez que os efeitos negativos das emissões trazem prejuízos ao bem-estar em geral, a compreensão mais acurada de como e em que medida a estrutura etária afeta as emissões pode ser um fator para o direcionamento de políticas que visam a redução dos níveis de emissões. Portanto, esse artigo analisou o efeito da estrutura demográfica nas emissões de CO₂ para quatro grupos de países classificados de acordo com o nível de renda. Fazendo uso do modelo teórico IPAT, especificou-se uma estrutura polinomial para avaliar os efeitos de 16 coortes etários nas emissões de CO₂.

Usar os polinômios para especificar os coortes etários tem vários benefícios. O primeiro, como mencionado anteriormente, é a possibilidade de estimar o efeito conjunto de todas as variáveis demográficas nas regressões. Em segundo lugar, em vez de usar seleções de coortes etários de forma *ad hoc*, pode-se utilizar os resultados dos polinômios para delinear os exatos pontos de corte, e com isso, obter variáveis explicativas mais precisas.

Diferente da suposição usualmente testada, isto é, apenas os efeitos da população economicamente ativa (15-64), os resultados encontrados mostram que os efeitos da estrutura demográfica variam ao longo dos coortes etários e grupos de países. Para o grupo de países de alta renda (*high*), os resultados demonstram um aspecto interessante: a população de 40-64, em média, emite níveis menores de CO₂ que os demais coortes etários. Além disso, exclusivamente para grupos de países de alta e média renda (*high e upper*), a população idosa produz níveis emissões superiores aos demais coortes etários.

Embora não se tenha uma explicação empírica para compreender esses resultados é possível levantar algumas hipóteses: *i*) Como já discutidos, a população idosa (65+ anos) tende a ficar mais em suas residências e possuem uma estrutura familiar reduzida, o que leva maiores níveis de consumo de energia residencial e elétrica; *ii*) A população a partir dos 40 anos, possivelmente, já acumulou bens de consumo, isto é, uma população que já se encontra alocada do mercado de trabalho e atingiu seu maior nível de consumo.

Por outro lado, os países de renda baixa (*low*) parecem possuir níveis maiores de emissões nos primeiros coortes etários (0-14), posteriormente, mantendo-se constante até os 65 anos, onde ocorre uma redução drástica dos níveis de emissão. Por fim, os efeitos da estrutura demográfica nos países de média alta renda (*upper*) concentram-se no coorte etário a partir de 45 anos. Ainda não se sabe o porquê da ocorrência dessa estrutura de emissões. No entanto, é possível que a forma como a população está distribuída e os diferentes padrões de consumo sejam os elementos centrais para compreensão.

De modo geral, os resultados encontrados corroboram com as hipóteses levantadas inicialmente nessa pesquisa. Logo, a forma como a população está distribuída ao longo dos coortes etários produz diferentes níveis de emissões. No entanto, a estrutura de consumo para cada coorte etário, possivelmente, é o fator predominante nas explicações das emissões.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante avaliar os efeitos demográficos considerando as diferentes estruturas de consumo para cada coortes etário. Dessa forma, seria possível compreender a forma como os indivíduos alteram seu padrão de emissões ao longo da vida.

REFERÊNCIA

AL-MULALI, U. et al. Investigating the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis by utilizing the ecological footprint as an indicator of environmental degradation. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 315–323, 2015.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some Tests of Specification for Panel Carlo Application to Data: **Rewiev of Economic Studies**, v. 58, p. 277–297, 1991.

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

ARNOTT, R. D.; CHAVES, D. B. Markets , and the Economy. v. 68, n. 1, p. 23–46, 2012.

BRUECKNER, M.; SCHWANDT, H. Income and Population Growth. **Economic Journal**, v. 125, n. 589, p. 1653–1676, 2015.

BURNEY, N. A. Socioeconomic development and electricity consumption A cross-country analysis using the random coefficient method. **Energy Economics**, v. 17, n. 3, p. 185–195, 1995.

COLE, M.A., NEUMAYER, E. Examining the Impact of Demographic Factors On Air Pollution. v. 26, n. 1, p. 5–21, 2004.

CUTLER, D.; DEATON, A.; LLERAS-MUNEY, A. The Determinants of Mortality. **Journal of Economic Perspectives**, v. 20, n. 3, p. 97–120, 2006.

DALTON, M. et al. Population aging and future carbon emissions in the United States. **Energy Economics**, v. 30, n. 2, p. 642–675, 2008.

DIETZ, T.; ROSA, E. A. Rethinking the Environmental Impacts of Population , Affluence and Technolog '. **Human Ecology Review**, v. 1, n. Summer/Autumn, p. 277–300, 1994.

EHRILICH, P. R.; HOLDREN, J. P. Impact of Population Growth on JSTOR. **Science**, v. 171, n. 3977, p. 1212–1217, 1971.

FAIR, B. R. A. Y. C.; DOMINGUEZ, K. M. Effects of the Changing U.S. Age Distribution on Macroeconomic Equations. *The American Economic Review* , Vol . 81 , No . 5 (Dec ., 1991), pp . 1276-1294 Publis. v. 81, n. 5, p. 1276–1294, 2016.

FAN, Y. et al. Analyzing impact factors of CO2 emissions using the STIRPAT model. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 26, n. 4, p. 377–395, 2006.

HERZER, D.; STRULIK, H.; VOLLMER, S. The long-run determinants of fertility: One century of demographic change 1900-1999. **Journal of Economic Growth**, v. 17, n. 4, p. 357–385, 2012.

HIGGINS, M. Demography, National Savings, and International Capital Flows. **International Economic Review**, v. 39, n. 2, p. 343–369, 2012.

JIANG, L.; HARDEE, K. How do Recent Population Trends Matter to Climate Change? **Population Research and Policy Review**, v. 30, n. 2, p. 287–312, 2011.

JONES, D. W. Urbanization and Energy Use In Economic Development Published by : International Association for Energy Economics Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/41322370> Urbanization and Energy Use In Economic Development. v. 10, n. 4, p. 29–44, 2016.

JORGENSEN, A. K. Does foreign investment harm the air we breathe and the water we drink? A cross-national study of carbon dioxide emissions and organic water pollution in less-developed countries, 1975 to 2000. **Organization and Environment**, v. 20, n. 2, p. 137–156, 2007.

KENWORTHY, J. R.; LAUBE, F. B. Patterns of automobile dependence in cities: An international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 33, n. 7–8, p. 691–723, 1999.

LARIVIÈRE, I.; LAFRANCE, G. Modelling the electricity consumption of cities: Effect of urban density. **Energy Economics**, v. 21, n. 1, p. 53–66, 1999.

LIDDLE, B. 10.1023_B-POEN.0000039951.37276.f3.pdf. **Population and Environment**, v. 26, n. 1, p. 23–39, 2004.

LIDDLE, B. Consumption-driven environmental impact and age structure change in OECD countries: A cointegration-STIRPAT analysis. **Demographic Research**, v. 24, p. 749–770, 2011.

LIDDLE, B. Urban density and climate change: A STIRPAT analysis using city-level data. **Journal of Transport Geography**, v. 28, p. 22–29, 2013.

LIDDLE, B.; LUNG, S. Age-structure, urbanization, and climate change in developed countries: Revisiting STIRPAT for disaggregated population and consumption-related environmental impacts. **Population and Environment**, v. 31, n. 5, p. 317–343, 2010.

MARCOTULLIO, P. J. et al. The geography of urban greenhouse gas emissions in Asia: A regional analysis. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 4, p. 944–958, 2012.

MARRERO, G. A. Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe. **Energy Economics**, v. 32, n. 6, p. 1356–1363, 2010.

MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; MARUOTTI, A. The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries. **Ecological Economics**, v. 70, n. 7, p. 1344–1353, 2011a.

MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; MARUOTTI, A. The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries. **Ecological Economics**, v. 70, n. 7, p. 1344–1353, 2011b.

MENZ, T.; WELSCH, H. Population aging and carbon emissions in OECD countries: Accounting for life-cycle and cohort effects. **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 842–849, 2012.

OZCAN, B. The nexus between carbon emissions, energy consumption and economic growth in Middle East countries: A panel data analysis. **Energy Policy**, v. 62, p. 1138–1147, 2013.

PARIKH, J.; SHUKLA, V. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development. **Global Environmental Change**, v. 5, n. 2, p. 87–103, 2002.

POUMANYVONG, P.; KANEKO, S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. **Ecological Economics**, v. 70, n. 2, p. 434–444, 2010.

RECHERCHE, M. DE. A Distributed Simulation Environment for Cyber-Physical Systems. v.

9255, n. September 2015, p. 279–308, 1996.

ROCA, J. The IPAT formula and its limitations. **Ecological Economics**, v. 42, n. 1–2, p. 1–2, 2002.

SHAHBAZ, M. et al. The effect of urbanization, affluence and trade openness on energy consumption: A time series analysis in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 683–693, 2015.

SHARMA, S. S. Determinants of carbon dioxide emissions: Empirical evidence from 69 countries. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 376–382, 2011.

SHI, A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: Evidence from pooled cross-country data. **Ecological Economics**, v. 44, n. 1, p. 29–42, 2003.

YANG, Y. et al. Research on impacts of population-related factors on carbon emissions in Beijing from 1984 to 2012. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 55, p. 45–53, 2015.

YORK, R. Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960-2025. **Social Science Research**, v. 36, n. 3, p. 855–872, 2007a.

YORK, R. Structural influences on energy production in South and East Asia, 1971-2002. **Sociological Forum**, v. 22, n. 4, p. 532–554, 2007b.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. Bridging Environmental Science with Environmental Policy: Plasticity of Population, Affluence, and Technology. **SOCIAL SCIENCE QUARTERLY**, v. 28, n. 1, p. 1609–1614, 2002.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. **Ecological Economics**, v. 46, n. 3, p. 351–365, 2003.

ZHOU, Y.; LIU, Y. Does population have a larger impact on carbon dioxide emissions than income? Evidence from a cross-regional panel analysis in China. **Applied Energy**, v. 180, p. 800–809, 2016.

ZHU, Q.; PENG, X. The impacts of population change on carbon emissions in China during 1978-2008. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 36, p. 1–8, 2012.