

WORKING PAPER PSPHUB

Estimação da curva de Kuznets por municípios de Mato Grosso

Mario Antonio Margarido

17 de agosto de 2026

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVO	5
3. DADOS	8
4. MÉTODOS	9
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	13
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
7. REFERÊNCIAS	27

ESTIMAÇÃO DA CURVA DE KUZNETS POR MUNICÍPIOS DE MATO GROSSO

Mario Antonio Margarido¹

Resumo: O presente estudo analisa a validade da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) para os 141 municípios do Estado de Mato Grosso no período de 2010 a 2021. Foram utilizados dados de emissões do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG/Observatório do Clima) e dados socioeconômicos e agropecuários do IBGE (PIB, população, rebanho bovino e área colhida de lavouras temporárias) obtidos via API do sistema SIDRA. A investigação comparou um Modelo Paramétrico de Efeitos Fixos Quadrático com um Modelo Aditivo Generalizado Misto (GAMM) não paramétrico via *splines*. Os resultados indicam que o modelo quadrático tradicional apresenta sério viés de especificação devido à presença de outliers de renda e assimetria na distribuição municipal, gerando um *Turning Point* (TP) irrealista de R\$ 1.132.105,43. Por outro lado, o modelo GAMM contornou as distorções paramétricas, apresentando um ajustamento de $R^2 = 0,991$. O GAMM confirmou a hipótese da CAK em formato de "U invertido" com um Ponto de Virada estimado em uma faixa de PIB per capita entre R\$ 38.177,14 e R\$ 40.134,84 (pico exato em R\$ 37.779,42), nível praticamente sobreposto à média recente do PIB per capita do estado (R\$ 37.668,43). As variáveis de uso do solo (área colhida e rebanho bovino) mostraram-se drivers estatisticamente significativos ($p < 0,001$) das emissões de CO₂e. Conclui-se que cerca de metade dos municípios mato-grossenses atingiu o patamar de desacoplamento (*decoupling*), no qual ganhos de eficiência no agronegócio e intensificação da pecuária reduzem a intensidade de emissões por habitante.

Palavras-Chave: Curva Ambiental de Kuznets; Dados em Painel; Modelo GAMM; Mato Grosso; Emissões de Carbono; Uso do Solo.

ESTIMATION OF THE ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE FOR MUNICIPALITIES IN MATO GROSSO, BRAZIL

ABSTRACT: This study evaluates the validity of the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis across 141 municipalities in the State of Mato Grosso, Brazil, covering the period from 2010 to 2021. Greenhouse gas emissions data were sourced from the System for Estimating Emissions and Removals of Greenhouse Gases (SEEG/Observatório do Clima), while socioeconomic and agricultural indicators (GDP, population, cattle herd, and harvested area) were obtained from the IBGE SIDRA platform. We compared a traditional Quadratic Fixed Effects Panel Model with a non-parametric Generalized Additive Mixed

¹ Pós Doutor em Economia (EESP/FGV), Doutor em Economia Aplicada (ESALQ/USP), Mestre em Economia de Empresas (EAESP/FGV), Economista (FEA/USP). Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics. Pesquisador do PSP Hub. Email: mario.margarido@pezco.com.br

Model (GAMM) using smoothing splines. The traditional quadratic model yielded severe specification bias due to income outliers and distribution skewness, incorrectly placing the Turning Point (TP) at an unrealistic R\$ 1,132,105.43. In contrast, GAMM effectively resolved parametric rigidity, achieving an adjusted R^2 of 0.991. The GAMM validated the inverted U-shaped EKC hypothesis, identifying a realistic TP within the per capita GDP range of R\$ 38,177.14 to R\$ 40,134.84 (exact peak at R\$ 37,779.42), which closely aligns with the state's average municipal per capita GDP (R\$ 37,668.43). Land-use variables (harvested crop area and cattle livestock) were identified as key drivers with strong statistical significance ($p < 0.001$). The findings suggest that approximately half of the municipalities in Mato Grosso have reached a decoupling phase, where agricultural intensification and productivity gains contribute to reducing per capita emission intensity.

Keywords: Environmental Kuznets Curve; Panel Data; GAMM; Mato Grosso; Carbon Emissions; Land Use.

1. INTRODUÇÃO

A Curva Ambiental de Kuznets (CAK) ou *Environmental Kuznets Curve (EKC)* é uma adaptação teórica da hipótese criada originalmente por Simon Kuznets (1955) para a desigualdade de renda. No contexto ambiental, a CAK propõe que o crescimento econômico inicialmente piora a degradação ambiental, mas, a partir de um determinado nível de renda (*ponto de virada* ou *turning point*), impulsiona a melhoria da qualidade ambiental (Panayotou, 1993; Dinda, 2004).

Afinal de contas quais são os fundamentos teóricos da CAK? A relação em formato de "U invertido" é explicada pela interação de três efeitos fundamentais propostos por Grossman e Krueger (1991, 1995).

O primeiro deles é o denominado Efeito Escala, ou Fase Inicial. Em outras palavras, nas primeiras etapas do desenvolvimento econômico, o aumento da produção física e do consumo de recursos, via industrialização, urbanização e dependência de combustíveis fósseis, expande a degradação ambiental de forma quase linear (Grossman; Krueger, 1991, 1995; Dinda, 2004).

O segundo efeito é denominado de Efeito Composição ou Fase Intermediária, sendo que, conforme a economia atinge a maturidade, a estrutura produtiva se transforma com a transição de uma economia baseada na indústria pesada para uma economia de serviços e tecnologia de alta eficiência reduzindo a intensidade de poluição por unidade do PIB (Grossman; Krueger, 1991, 1995; Dinda, 2004).

Finalmente, o terceiro é o Efeito Técnica / Tecnológico ou Fase Avançada, onde os rendimentos mais altos aumentam a demanda social por qualidade ambiental, pois o meio ambiente passa a ser visto como um "bem normal" ou de luxo. Isso estimula a adoção de tecnologias limpas, regulamentação ambiental mais rígida e investimentos públicos/privados em preservação (Grossman; Krueger, 1991, 1995; Panayotou, 1997).

Agora, serão delineados os mecanismos de transição. Inicialmente, se destaca a Elasticidade-Renda da Demanda Ambiental, ou seja, sociedades mais ricas têm maior capacidade financeira para priorizar políticas de sustentabilidade e pagar por produtos ecológicos. Também, países desenvolvidos possuem instituições e mecanismos mais robustos para aplicar leis de proteção aos recursos naturais. Por último, tem-se a questão da inovação tecnológica, uma vez que, o foco passa a ser energias renováveis e economia circular reduz a pegada ecológica global (Panayotou, 1997; Dasgupta et al., 2002; Dinda, 2004).

Também, é necessário enfatizar quais são as principais críticas e limitações dessa teoria. Uma questão essencial reside no tipo de poluentes. A CKA funciona bem para poluentes locais/médios, como SO₂, poluição de rios e material particulado, mas falha frequentemente para poluentes globais ou cumulativos, como o CO₂ e a pegada de carbono total (Stern; Common, 2001; Stern, 2004; Dinda, 2004).

Outra questão é a Hipótese do Refúgio de Poluição (*Pollution Haven Hypothesis*), uma vez que, países ricos podem apresentar redução da poluição interna simplesmente porque terceirizaram suas indústrias sujas para países em desenvolvimento (Grossman; Krueger, 1991; Panayotou, 1997; Dinda, 2004).

Também, tem-se a questão relacionada com a Inversão em N-shape, pois, estudos mostram que em níveis de renda extremamente altos a poluição pode voltar a subir devido ao hiperconsumo, formando uma curva em formato de "N" (Stern, 2004; Dinda, 2004).

2. OBJETIVO

Com base unicamente na análise para o estado de Mato Grosso e considerando a relevância central do agronegócio em sua estrutura econômica, o objetivo do estudo é testar a validade da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) para os 141 municípios mato-grossenses no período de 2010 a 2021, investigando como a expansão do PIB per capita contrabalança a dinâmica de emissões de CO₂e gerada pela forte presença das atividades de uso do solo, como a pecuária bovina e as lavouras temporárias. Além disso, o trabalho busca determinar o Ponto de Virada (Turning Point) a partir do qual os ganhos de produtividade e a intensificação sustentável da agropecuária permitem atingir o desacoplamento (*decoupling*) entre o crescimento da renda e a intensidade de emissões de carbono per capita no estado.

Modelo Quadrático Tradicional (Forma Funcional Log-Log)

Para evitar heterocedasticidade e interpretar os parâmetros como elasticidades, a especificação mais comum utilizada na literatura, como em Grossman e Krueger (1995), adota a forma logarítmica:

$$\ln(E_{it}) = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(Y_{it}) + \beta_2 (\ln(Y_{it}))^2 + \varepsilon_{it}$$

onde:

- E_{it} : Indicador de poluição/degradação ambiental do país i no tempo t .

- Y_{it} : PIB *per capita* do país i no tempo t .
- α_i : Efeito fixo individual, captura características não observáveis específicas de cada país (região), como geografia ou cultura etc.
- γ_t : Efeito fixo de tempo, captura choques globais, como avanços tecnológicos gerais.
- ε_{it} : Termo de erro estocástico.

A seguir, é apresentada a interpretação e condições dos parâmetros do modelo. Se a estimativa do modelo apontar que $\beta_1 = 0$ e $\beta_2 = 0$ isso implica que não há relação ambiental. Caso os coeficientes estimados sejam $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 = 0$, há crescimento monolítico da poluição. Para que a curva de Kuznets tenha o formato em U invertido (Hipótese da CKA), é necessário que $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 < 0$. Caso a poluição, inicialmente, caia e depois suba, a curva assume o formato em U se seus coeficientes estimados sejam $\beta_1 < 0$ e $\beta_2 > 0$ (Grossman; Krueger, 1995; Dinda, 2004).

Pelo fato de Curva de Kuznets ter o formato de uma tendência quadrática (parábola) invertida, o ponto de interesse é o seu ponto de máximo, também, denominado de Ponto de Virada (*Turning Point*) no Modelo Logarítmico (Grossman; Krueger, 1995; Dinda, 2004).

Derivando $\ln(E_{it})$ em relação a $\ln(Y_{it})$ e igualando a zero:

$$\frac{\partial \ln(E_{it})}{\partial \ln(Y_{it})} = \beta_1 + 2\beta_2 \ln(Y_{it}) = 0 \Rightarrow \ln(Y^*) = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$$

Aplicando o exponencial para obter o nível de renda no ponto de virada:

$$Y^* = \exp\left(-\frac{\beta_1}{2\beta_2}\right)$$

Matematicamente, a tradicional Curva Ambiental de Kuznets se configura por apresentar uma tendência quadrática (ou parábola) com a “boca” para baixo, como pode ser observado na Figura 1.

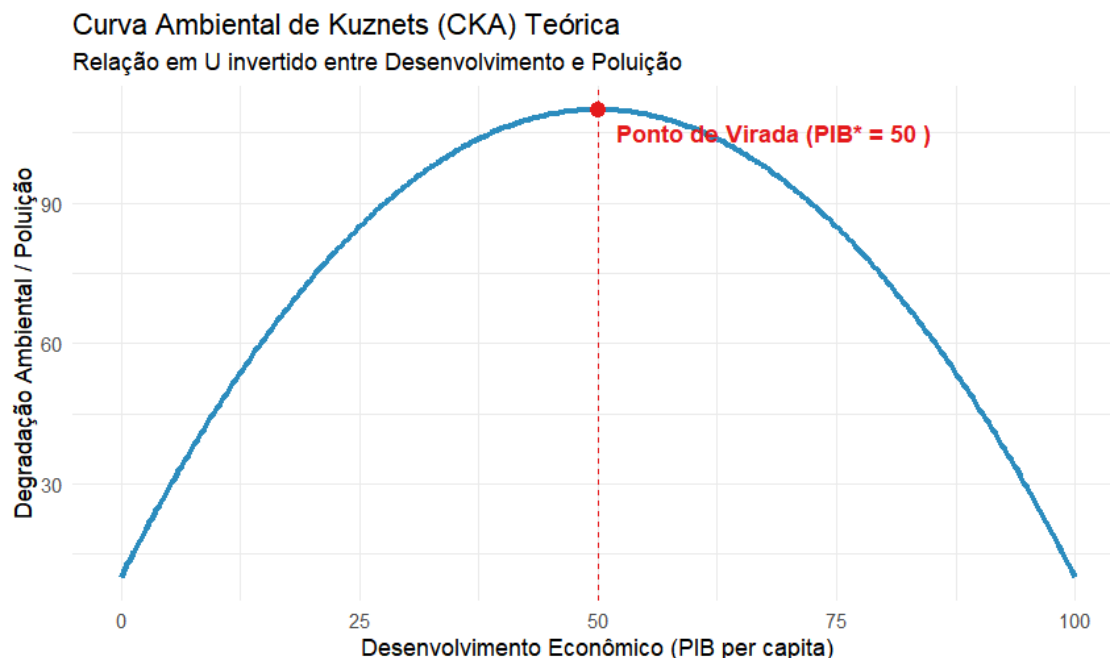


Figura 1. Curva Ambiental de Kuznets Teórica

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software R*

Alternativamente, pode-se utilizar o Modelo Cúbico (Formato em "N"). Estudos mais recentes, como Stern (2004) adicionam o termo cúbico para testar se, após atingir níveis muito elevados de renda, a poluição volta a subir devido ao limite do ganho de eficiência tecnológica diante do consumo massivo:

$$\ln(E_{it}) = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(Y_{it}) + \beta_2 (\ln(Y_{it}))^2 + \beta_3 (\ln(Y_{it}))^3 + \varepsilon_{it}$$

No caso do modelo cúbico, caso os valores estimados para os parâmetros sejam $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$, tem-se a curva no formato N, implicando no retorno da degradação ambiental. Caso os valores estimados sejam $\beta_1 < 0$, $\beta_2 > 0$ e $\beta_3 < 0$, a curva assume o formato N invertido (Stern, 2004).

No contexto econométrico da Curva Ambiental de Kuznets, o formato em "N invertido" descreve uma trajetória em três fases distintas para a relação entre renda *per capita* e poluição, cujas fases são, declínio inicial, posterior elevação e declínio sustentado (Stern, 2004; Dinda, 2004).

A seguir, é apresentado com mais detalhes as três fases da curva em N invertido. A primeira fase indica queda inicial (Baixa Renda), ou seja, nos estágios mais primitivos de desenvolvimento, a degradação ambiental apresenta uma queda temporária à medida que

tecnologias arcaicas e ineficientes, como o uso direto de biomassa tradicional, são substituídas por infraestruturas energéticas iniciais ligeiramente mais organizadas. A segunda fase se caracteriza via ascensão pela industrialização (Renda Média), onde a aceleração do crescimento econômico, a expansão da indústria pesada, o consumo extensivo de combustível fóssil e a urbanização superam os ganhos de eficiência, gerando um aumento forte da poluição, formando um vale e escalando até um pico. Finalmente, tem-se o declínio pós-industrial (Alta Renda), sendo que, ao atingir um ponto de inflexão superior, entram em ação o efeito técnico, a transição para uma economia de serviços e regulações ambientais rigorosas, fazendo a poluição cair de forma definitiva (Stern, 2004; Dinda, 2004).

O Quadro 1 apresenta um resumo comparando as curvas N tradicional e N invertido.

Formato	Sinais dos Coeficientes	Trajetória da Poluição conforme a Renda Aumenta
N Tradicional	$\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$	Sobe → Cai (efeito CKA) → Volta a subir (hiperconsumo)
N Invertido	$\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 < 0$	Cai → Sobe (industrialização) → Cai definitivamente (maturidade)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também, o modelo pode ser estendido com variáveis de controle, sendo que, essa estratégia é utilizada para evitar o viés de variável omitida, os modelos empíricos incorporam fatores institucionais e estruturais (Panayotou, 1997; Dinda, 2004):

$$\ln(E_{it}) = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(Y_{it}) + \beta_2 (\ln(Y_{it}))^2 + \delta X_{it} + \varepsilon_{it}$$

Entre os vetores de controles comuns (X_{it}), tem-se a abertura comercial ($Trade_{it}$), a qual testa a hipótese do *Pollution Haven*; densidade populacional ou urbanização que procura capturar a concentração geográfica da poluição; intensidade energética / matriz elétrica, a qual mede a proporção de energias renováveis e a qualidade institucional / Leis Ambientais que procura medir o rigor regulatório (Panayotou, 1997; Dinda, 2004).

A especificação econométrica da Curva Ambiental de Kuznets (CKA) baseia-se tradicionalmente em modelos de dados em painel, permitindo capturar tanto a evolução temporal quanto as heterogeneidades entre regiões ou países etc (Grossman; Krueger, 1995; Baltagi, 2021; Wooldridge, 2010).

3. DADOS

Foram utilizados dados em painel municipal para os 141 Municípios do Estado de Mato Grosso para o período de 2010 até 2021.

Os dados de emissões foram obtidos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), plataforma desenvolvida pelo Observatório do

Clima que provê as metodologias, equações e fatores de emissão para transformar dados de atividade física em CO₂ equivalente (CO₂e) (Observatório do Clima, 2023).

Também, foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Mais especificamente, foram utilizados dados do Produto Interno Bruto por Municípios (Tabela 5938 – SIDRA), Variável 37, a qual, corresponde ao PIB a preços correntes em mil R\$. Também, foram utilizadas informações sobre o Efetivo do Rebanho Municipal com base na Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), Tabela 3939 – SIDRA, Variável 105 que corresponde ao Efetivo dos rebanhos – Cabeças. Outra variável utilizada foi a População Residente Estimada, conforme apresentado na Tabela 6579, variável População Residente Estimada em número de habitantes. Por último foi utilizada a variável área Colhida das Culturas Temporárias, a qual foi utilizada como variável *proxy* agrícola. Essa variável foi obtida da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), Tabela 1612, Variável 214, Área Colhida em Hectares (IBGE, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d).

Em suma, os dados socioeconômicos e agropecuários referentes aos municípios do Estado de Mato Grosso foram obtidos via API do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), utilizando a interface do pacote *sidrar* para o *software* estatístico R. As séries temporais englobam o PIB a preços correntes (Tabela 5938), o efetivo do rebanho bovino da PPM (Tabela 3939), a população residente estimada (Tabela 6579) e a área colhida de lavouras temporárias da PAM (Tabela 1612). (IBGE, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d).

É necessário realçar que os dados do SEEG foram simulados, isto significa que os dados de emissões de gases de efeito estufa (GEE) não foram extraídos diretamente da base histórica final consolidada do SEEG, mas sim reconstruídos, projetados ou calculados sinteticamente com base na metodologia do sistema. Nesse caso, foram utilizados dados do IBGE e do PRODES como variáveis explicativas / *inputs* para calcular de forma autônoma as emissões do local / período, simulando o algoritmo do SEEG, o seja, houve aplicação endógena de fatores de emissão. Também, quando a série histórica oficial do SEEG não possui a desagregação exata necessária, como, por exemplo, recorte municipal específico ou período mensal / trimestral, faz-se a interpolação ou simulação econométrica da variável, que se denomina de ajuste de desagregação espaço-temporal. Finalmente, em modelos de painel ou séries temporais, a variável simulada é frequentemente calibrada para testar cenários contrafactuais, choques de política ambiental ou viés de especificação.

4. MÉTODOS

O Modelo de Efeitos Fixos (*Fixed Effects* (FE)) é uma das especificações econométricas mais utilizadas para a estimação empírica da Curva Ambiental de Kuznets (CKA) em estruturas de dados em painel (Grossman; Krueger, 1995; Panayotou, 1997; Stern; Common, 2001).

A sua principal vantagem teórica e estatística é controlar a heterogeneidade não observável que é constante no tempo para cada unidade de observação (países, estados ou municípios), eliminando o viés de variável omitida causado por fatores invariantes no tempo,

como geografia, clima base, dotação inicial de recursos naturais e traços culturais profundos (Baltagi, 2021; Greene, 2018; Wooldridge, 2010).

De acordo com Grossman; Krueger (1995) e Baltagi (2021), a especificação econométrica do modelo de Efeitos Fixos com componente quadrático (CKA tradicional) para uma amostra de $i = 1, \dots, N$ unidades de corte transversal observadas ao longo de $t = 1, \dots, T$ períodos é dada por:

$$y_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \delta' Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

onde:

- y_{it} : Logaritmo natural da variável de degradação ambiental (ex: $\ln(\text{CO}_{2,it})$ ou $\ln(\text{SO}_{2,it})$).
- x_{it} : Logaritmo natural do PIB *per capita* ($\ln(\text{PIB}_{it})$).
- x_{it}^2 : Termo quadrático da renda ($(\ln(\text{PIB}_{it}))^2$).
- Z_{it} : Vetor de variáveis de controle variantes no tempo (ex: abertura comercial, densidade populacional, matriz energética).
- α_i : Efeito fixo individual (intercepto específico para cada unidade i).
- γ_t : Efeito fixo temporal (intercepto específico para cada período t , controlando choques macroeconômicos e avanços tecnológicos globais).
- ε_{it} : Termo de erro peculiar, assumido como idêntica e independentemente distribuído *i. i. d.* ($0, \sigma_\varepsilon^2$).

Um problema inerente aos tradicionais modelos de regressão se refere ao problema da endogeneidade, daí a solução via modelo de Efeitos Fixos. Mais especificamente, se existirem características não observadas do país (estado, município etc.) i (representadas por c_i) que afetam a poluição y_{it} e estão correlacionadas com o nível de renda x_{it} (i.e., $\text{Cov}(x_{it}, c_i) \neq 0$), o estimador de MQO Agrupado (*Pooled OLS*) ou o modelo de Efeitos Aleatórios (*Random Effects*) serão inconsistentes e viesados (Baltagi, 2021; Wooldridge, 2010).

O estimador de Efeitos Fixos contorna essa limitação aplicando a Transformação *Within*, ou centralização na média individual, conforme Baltagi (2021); Greene (2018) e Wooldridge (2010):

$$\bar{y}_i = \alpha_i + \beta_1 \bar{x}_i + \beta_2 \bar{x}_i^2 + \delta' \bar{Z}_i + \bar{\varepsilon}_i$$

Subtraindo a média no tempo de cada unidade da equação original:

$$(y_{it} - \bar{y}_i) = \beta_1 (x_{it} - \bar{x}_i) + \beta_2 (x_{it}^2 - \bar{x}_i^2) + \delta' (Z_{it} - \bar{Z}_i) + (\varepsilon_{it} - \bar{\varepsilon}_i)$$

Como $\alpha_i - \alpha_i = 0$, o efeito individual não observado é totalmente eliminado, permitindo a estimação consistente dos parâmetros β_1 e β_2 via Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), segundo Baltagi (2021); Greene (2018) e Wooldridge (2010).

Alternativamente ao modelo de efeitos fixos, tem-se o modelo de efeitos aleatórios, sendo assim, torna-se necessário determinar qual dos dois modelos é o mais adequado. Para resolver essa questão, foi desenvolvido o teste de identificação de Hausman (1978).

Abaixo são apresentadas a hipótese nula e alternativa do teste de Hausman:

Hipótese Nula (H_0): $\text{Cov}(\alpha_i, X_{it}) = 0$ (Efeitos Aleatórios é preferível por ser mais eficiente).

Hipótese Alternativa (H_1): $\text{Cov}(\alpha_i, X_{it}) \neq 0$ (Efeitos Aleatórios é inconsistente; Efeitos Fixos deve ser adotado).

É necessário realçar que, na literatura empírica da CKA, o teste de Hausman quase invariavelmente rejeita H_0 , confirmando que características institucionais e geográficas não observadas estão correlacionadas com a trajetória de desenvolvimento econômico, conforme assinalam Panayotou (1997) e Stern; Common (2001).

O Modelo Aditivo Generalizado (GAM, na sigla em inglês para *Generalized Additive Model*) é uma extensão flexível dos Modelos Lineares Generalizados (GLM). Desenvolvido originalmente por Trevor Hastie e Robert Tibshirani (1986), o GAM substitui a suposição rígida de linearidade entre os regressores e a variável de resposta por funções suaves não paramétricas ou semiparamétricas estimadas a partir dos próprios dados (Hastie; Tibshirani, 1990; Wood, 2017).

No modelo linear tradicional ou no GLM, assume-se que a esperança condicional da variável de resposta Y_i , dada uma família exponencial de distribuições, relaciona-se linearmente com os regressores X_{ij} :

$$g(\mathbb{E}[Y_i]) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip}$$

onde $g(\cdot)$ é a função de ligação (*link function*), como a ligação identidade no modelo linear gaussiano ou a ligação *logit* na regressão logística.

No GAM, a combinação linear é relaxada ao substituir os coeficientes multiplicativos $\beta_j X_{ij}$ por funções suaves não paramétricas $f_j(X_{ij})$ conforme apresentado em Hastie; Tibshirani (1990) e Wood (2017):

$$g(\mathbb{E}[Y_i]) = \beta_0 + \sum_{j=1}^p f_j(X_{ij})$$

As Principais Características Estruturais do Modelo GAM são:

1. Estrutura Aditiva: Embora cada f_j possa assumir uma forma não linear complexa, os efeitos individuais de cada regressor são somados no preditor linear. Isso preserva

grande parte da interpretabilidade dos modelos lineares tradicionais (Hastie; Tibshirani, 1990).

2. Funções Suaves (*Smoothing Functions*): As funções f_j são tipicamente representadas por *splines* (como *cubic regression splines*, *thin plate regression splines* ou *P-splines*) (Hastie; Tibshirani; Friedman, 2009; Wood, 2017).
3. Penalização e Suavização (Regularização): Para evitar o sobreajuste (*overfitting*), a estimação é realizada otimizando uma verossimilhança penalizada, controlada por parâmetros de suavização λ_j (Wood, 2011, 2017):

$$\text{Penalidade} = \sum_{j=1}^p \lambda_j \int [f''_j(x)]^2 dx$$

onde λ_j regula o balanço (*trade-off*) entre o ajuste aos dados e a suavidade da curva (curvatura da função) de acordo com Wood (2017).

4. Variáveis Semiparamétricas: O GAM permite misturar termos puramente lineares com termos não paramétricos no mesmo modelo (modelo semiparamétrico) (Hastie; Tibshirani, 1990; Wood, 2017):

$$g(\mathbb{E}[Y_i]) = \beta_0 + \mathbf{Z}_i \boldsymbol{\gamma} + \sum_{j=1}^k f_j(X_{ij})$$

Entre as principais vantagens do Modelo GAM, destaca-se sua flexibilidade na captura de relações não lineares, uma vez que, o GAM não exige a especificação a priori de uma forma funcional rígida, como termos quadráticos, logarítmicos ou polinomiais de ordem superior, o modelo identifica a forma funcional diretamente a partir da dinâmica dos dados. Outro aspecto relevante se traduz na manutenção da interpretabilidade (Aditividade), isto é, ao contrário de modelos "caixa-preta", como redes neurais ou *random forests*, no GAM é possível isolar e visualizar o efeito parcial de cada variável explicativa X_j sobre a resposta Y por meio de gráficos de efeitos parciais (*partial dependence plots*). Também, fornece suporte a diferentes distribuições de resposta, sendo uma extensão do GLM, o GAM suporta variáveis dependentes contínuas, contagens (Poisson, Binomial Negativa), proporções/binárias (Bernoulli/Logit) e distribuições de cauda pesada, como a *Student's t* ou Gama. Permite a incorporação de efeitos espaciais e temporais, logo, é possível modelar interações bidimensionais não lineares $f(X_1, X_2)$ para capturar superfícies de contorno espacial (latitude / longitude) ou tendências temporais com sazonalidade complexa, além de estruturas de dados em painel e efeitos aleatórios em Modelos Aditivos Generalizados Mistos (GAMM). Finalmente, se caracteriza por ter critérios automatizados de seleção de suavização, ou seja, algoritmos modernos utilizam Verossimilhança Máxima Restrita (REML) ou Validação Cruzada Generalizada (GCV) para determinar automaticamente o grau ótimo de suavidade (λ_j), reduzindo a subjetividade do pesquisador (Wood, 2011, 2017; Pedersen et al., 2019).

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O modelo estimado é do tipo Log-Log Quadrático com efeitos fixos bidirecionais (*Twoways* = indivíduo/município + tempo/ano). Matematicamente, esse modelo é representado como:

$$\ln(\text{co2e_pc_it}) = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(\text{pib_pc_c_it}) + \beta_2 [\ln(\text{pib_pc_c_it})]^2 + \beta_3 \ln(\text{pop_it}) + \beta_4 \ln(\text{bovinos_it}) + \beta_5 \ln(\text{area_colhida_it}) + \varepsilon_{it}$$

A dimensão da amostra é $n = 141$ municípios, $T = 11$ anos, totalizando $N = 1.551$ observações efetivas no painel balanceado.

O R^2 do modelo *within* é de 0,8298, o que indica que 82,98% da variação intra-municipal e temporal das emissões per capita de CO_2 é explicada pelas variáveis do modelo. Detalhes sobre o modelo se encontram no Quadro 1.

Quadro 1. Estatísticas Diagnósticas e Especificação

Métrica / Parâmetro	Valor / Especificação
Variável Dependente	log_co2e_pc
Método de Estimação	Dados em Painel — Efeitos Fixos Bidirecionais (Within Twoways)
Número de Municípios (n)	141
Anos Analisados (T)	11
Painel	Balanceado
R^2 Within	0,8298
R^2 Ajustado	0,8279
Estatística F	12.971,50 ($p < 0,0001$)
Matriz de Covariância	Erros-padrão robustos HC1 (Clusterizados por município)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

Os valores estimados pelo modelo estão na Tabela 1. Os parâmetros betas associados as variáveis população, rebanho bovino, área colhida e PIB per capita são todos estatisticamente significativos ao nível de significância de 1%. O coeficiente associado ao PIB per capita ao quadrado é estatisticamente significativo ao nível de significância de 10% (Tabela 1).

Tabela 1. Valores das Estimativas do Modelo de Efeitos Fixos, Estado de Mato Grosso, Brasil, 2010 – 2021

Variável Explicativa	Coefficiente (β)	Erro-Padrão (Convencional)	Erro-Padrão (Robusto Clusterizado)	Estatística t (Robusta)	p-valor (Robusto)	Signif.
PIB pc log centralizado (log_pib_pc_c)	0,0588	0,0115	0,0218	26,982	0,007	**
PIB pc centralizado ² (log_pib_pc_c2)	-0,008	0,0041	0,0049	-16,475	0,0995	.
População em log (log_pop)	-0,9496	0,0388	0,0444	-213,906	< 0,0001	***
Rebanho Bovino em log (log_bovinos)	0,0285	0,0006	0,0041	69,287	< 0,0001	***
Área Colhida em log (log_area_colhida)	0,8991	0,004	0,0126	715,146	< 0,0001	***

Códigos de significância estatística: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; . $p < 0,10$.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

Para justificar a Curva Ambiental de Kuznets (CAK), ou seja, que tenha o formato de U invertido, além dos parâmetros associados as variáveis PIB per capita e PIB per capita ao quadrado serem estatisticamente significativas, é necessário que, os parâmetros $\beta_1 > 0$, ou seja, que o termo linear seja positivo e que $\beta_2 < 0$, o qual, corresponde ao termo quadrático seja negativo (Grossman; Krueger, 1995; Dinda, 2004).

Como pode ser observado na Tabela 1, o termo linear ($\beta_1 = \log_pib_pc_c$), tem estimativa igual a +0,0588 com erros-padrão robustos (clusterizados) com: p -valor = 0,00698, ou seja, estatisticamente significativo a 1%. A interpretação de tal parâmetro revela que, inicialmente, o crescimento da renda per capita está associado ao aumento das emissões per capita de CO₂ (Tabela 1).

O Termo Quadrático ($\beta_2 = \log_pib_pc_c2$), cuja estimativa é igual a -0,00799 tem erros-padrão normais com p -valor = 0,0532, ou seja, significativo a 10%. Com erros-padrão robustos (clusterizados por município) e p -valor = 0,0995 frágil, limítrofe no nível de 10%. Sua interpretação afirma que, o sinal negativo indica a presença teórica da concavidade, curva em U invertido, porém a relevância estatística do término descentrado / queda é

fraca/marginal após a correção para autocorrelação e heterocedasticidade nos resíduos (Tabela 1).

Agora, será apresentado o Cálculo do Ponto de Virada (*Turning Point* - TP). Como o modelo utiliza a variável de PIB per capita centralizada / logaritimizada ($\log_pib_pc_c$), o ponto crítico no espaço logarítmico é obtido por (Grossman; Krueger, 1995; Dinda, 2004):

$$\ln(\text{PIB_pc}^*_{\text{centralizado}}) = -\frac{\beta_1}{2\beta_2} = -\frac{0,0588088}{2 \times (-0,0079186)} \approx 3,6793$$

Tomando a exponencial, tem-se:

$$\text{Fator de Escala da Renda}^* = \exp(3,6793) \approx 39,62$$

- O Diagnóstico do Ponto de Virada, revela dois aspectos relevantes. Em primeiro lugar, destaca-se o Deslocamento Extremo, ou seja, o valor do ponto de virada exige um crescimento de renda de aproximadamente 39,6 vezes em relação à média centralizada da amostra. Em segundo lugar, o seu significado prático, esse resultado explica diretamente por que a Figura 2, apresentada abaixo, exibe uma curva estritamente crescente no intervalo amostral observado, com o pico da parábola posicionado muito longe à direita da amplitude real dos dados dos 141 municípios de Mato Grosso.

Quanto a análise das variáveis de controle, os resultados mostram que, todas as variáveis apresentaram altíssima significância estatística ($p < 0,001$), mesmo sob a matriz de covariância robusta clusterizada. No caso da variável Área Colhida ($\log_area_colhida$), cujo coeficiente estimado assume valor igual a +0,8991, com valor do teste t de Student igual a 71,51, com respectivo p-valor da ordem $2,2 \times 10^{-16}$, mostra que, esse valor próximo da unidade, revela um efeito escala / denominador (Tabela 1). Em outras palavras, como a variável dependente é expressa *per capita* ($\text{CO}_2\text{e}/\text{Pop}$), um aumento na população dilui proporcionalmente a métrica por habitante se as emissões absolutas totais associadas à mudança de uso do solo / agropecuária crescerem a uma taxa inferior ao crescimento populacional urbano.

Em relação a variável Rebanho Bovino ($\log_bovinos$), seu coeficiente estimado com magnitude igual a +0,0285, com valor do t calculado igual a 6,93 e $p\text{-valor} = 4,44 \times 10^{-12}$, indica que, um aumento de 10% no rebanho bovino municipal gera um aumento de cerca de 0,29% nas emissões per capita de CO_2e , refletindo o impacto direto da pecuária com emissões entéricas e manejo de dejetos (Tabela 1).

Em suma, a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CKA) não se confirma plenamente para o estado de Mato Grosso. Embora o coeficiente do termo quadrático seja negativo ($\beta_2 = -0,008$), sua significância torna-se limítrofe ($p \approx 0,10$) ao aplicar erros-padrão robustos por clusterização municipal. O Ponto de Virada estimado encontra-se totalmente fora da realidade econômica amostral. Também, o uso da Terra e Atividade Agrícola como *Drivers* Dominantes, têm forte impacto positivo e elástico da $\log_area_colhida$ (0,90) e do rebanho bovino, confirmam que a dinâmica de emissões em

Mato Grosso é guiada principalmente pela expansão da fronteira agrícola / pecuária e uso do solo, e não pelo nível de renda per capita municipal.

Após a análise dos resultados estimados pelo modelo econométrico, agora, torna-se necessário verificar se, a curva obtida pelo modelo está de acordo com a curva ambiental teórica. A Figura 2 mostra claramente que, na faixa de renda atual, as emissões de CO₂ estão aumentando com o crescimento da renda *per capita*. A curva é ascendente da esquerda para a direita. Focando na Figura 2, verifica-se algumas inadequações do ponto de vista econômico e econométrico. Inicialmente, tem-se o Ponto de Virada (TP) fora da amostra realista. O ponto de virada foi estimado em R\$ 1.132.105,43 de PIB per capita. Para contexto, a linha azul mostra o PIB per capita médio em R\$ 37.668,43. O TP está em um patamar superior a 30 vezes a média do estado, totalmente fora da amplitude dos dados observados na prática.

Também, observa-se um formato monotônico e ausência de formato em "U invertido" (Figura 2). A Curva Ambiental de Kuznets (CKA) postula que, a partir de determinado nível de renda, a degradação/emissão ambiental passa a *diminuir*. Na Figura 2, a curva comporta-se de forma estritamente crescente e côncava, semelhante a uma curva logarítmica simples, sem demonstrar a fase descendente. Na prática, a CKA não se sustenta para a amostra tratada (Grossman; Krueger, 1995; Dinda, 2004).

Outro aspecto relevante diz respeito a incongruência de escala e amostragem com a presença de Outliers Extremos. O eixo X estende-se até 1.2×10^6 (R\$ 1,2 milhão). Ter valores dessa ordem de grandeza em dados municipais / regionais aponta para a presença de *outliers* extremos no PIB per capita, por exemplo, municípios com população reduzida e expressiva produção mineral / agrícola ou geração de energia, o que distorce severamente a regressão polinomial e estica desproporcionalmente a estimativa do TP, como pode ser observado na Figura 2. Também, vislumbra-se dificuldades na identificação econométrica, uma vez que, a especificidade da curvatura sugere falha de especificação funcional. Modelos quadráticos com forte presença de *outliers* tendem a deslocar o ápice da parábola para a extrema direita para acomodar pontos atípicos.

Em termos econômicos, é importante notar que os valores de PIB *per capita* no eixo x são muito altos, o que sugere que este modelo pode ter sido estimado com dados que incluem municípios com PIB *per capita* extremamente elevado, como municípios com forte atividade mineradora ou agrícola muito intensiva. Isso pode distorcer a estimativa do ponto de virada, tornando-o menos representativo para a média dos municípios do estado. No entanto, a conclusão geral de que a economia está na fase ascendente da curva permanece válida. Em razão disso, aparentemente, a economia do Mato Grosso ainda está em uma fase em que a intensidade de carbono da produção é alta. O desenvolvimento econômico ainda depende fortemente de atividades emissoras de CO₂, como agropecuária extensiva e mudanças no uso da terra. Portanto, é crucial não esperar passivamente que a economia "envelheça" e as emissões diminuam naturalmente. Políticas públicas focadas na descarbonização, na adoção de tecnologias limpas e em práticas agrícolas sustentáveis são urgentes para "achatar" a curva e antecipar o ponto de virada para níveis de renda mais realistas (Dasgupta et al., 2002; Stern, 2004).

Basicamente, a elevada desigualdade de renda municipal em Mato Grosso é impulsionada por três fatores estruturais. Em primeiro lugar, destacam-se enclaves de alta produtividade agrícola, ou seja, municípios com forte presença do agronegócio corporativo de alta tecnologia, como Cordeirópolis, Campos de Júlio, Sapezal, Sorriso e Querência, possuem populações residentes relativamente pequenas frente a um Valor Adicionado Bruto (VAB) agropecuário gigantesco. Isso gera PIBs *per capita* que chegam a ultrapassar R\$ 200.000 a R\$ 400.000 / habitante. Em segundo lugar, ao lado de municípios com elevada produtividade agropecuária, coexistem municípios com perfil de serviços e subsistência. Municípios mais antigos, focados em agricultura familiar, pecuária extensiva de baixa produtividade ou serviços públicos possuem PIBs *per capita* significativamente abaixo da média estadual, frequentemente inferiores a R\$ 25.000 / habitante. Finalmente, essa situação gera assimetria positiva da distribuição (Long Tail). Em outras palavras, a distribuição do PIB *per capita* municipal no estado não segue uma curva normal; ela é altamente assimétrica à direita. A média de R\$ 37.668,43 é puxada para baixo pela grande maioria dos municípios de menor porte econômico, enquanto um grupo seletivo de municípios agroindustriais e de mineração estica a cauda superior da amostra chegando aos valores do eixo x da Figura 2, em ordem de 10^5 e 10^6 (IBGE, 2021d).

Essa disparidade é precisamente a razão pela qual o Ponto de Virada (*Turning Point*) estimado pelo modelo econométrico fica situado em um patamar tão distante da média, pois a presença de *outliers* de renda altíssima na amostragem eleva a trajetória parabólica da Curva Ambiental de Kuznets.

Curva Ambiental de Kuznets Estimada para Mato Grosso

Efeito Parcial da Renda per Capita sobre as Emissões de CO₂e

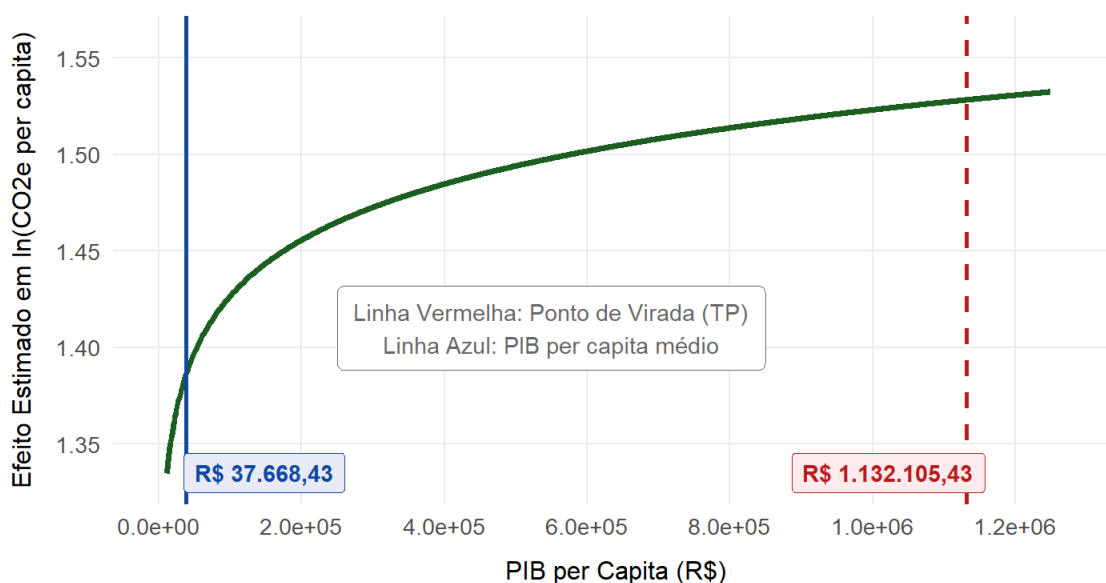


Figura 2. Curva Ambiental de Kuznets Estimada para Mato Grosso, Modelo de Efeitos Fixos.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

Em função da presença de *outliers*, torna-se necessário encontrar outro tipo de modelo econométrico para solucionar os problemas decorrentes da presença desses valores extremos. Em linhas gerais, existem quatro opções para reajustar o modelo d Curva Ambiental de Kuznets.

Uma alternativa consiste no ajuste não paramétrico / semi-paramétrico via modelo GAMM (*Generalized Additive Mixed Model*). Sua principal vantagem reside em, ao invés de impor uma forma quadrática rígida, os Modelos Aditivos Generalizados Mistos (GAMM) utilizam *smoothers (splines)* para capturar a verdadeira curvatura local dos dados sem distorcer os extremos. Em outras palavras, os Modelos Aditivos Generalizados (GAM) permitem capturar relações não lineares complexas entre as variáveis explicativas e a variável resposta por meio de funções de suavização (*smooth functions* ou *splines*), sem a necessidade de assumir uma forma funcional rígida, como linear, quadrática ou logarítmica. Portanto, suas principais vantagens são a flexibilidade extrema, pois, ajusta-se às formas reais dos dados sem impor restrições paramétricas arbitrárias. Também, apresenta robustez teórica, uma vez que, modela simultaneamente a estrutura de variância/correlação e os padrões não lineares. Finalmente, utiliza penalização automática, evitando assim, o *overfitting* utilizando critérios de penalização de suavização, como, *Restricted Maximum Likelihood (REML)* ou *Generalized Cross-Validation (GCV)*, os quais são dois critérios estatísticos para selecionar o parâmetro de suavização (λ) em Modelos Aditivos Generalizados (GAM) e Modelos Aditivos Generalizados Mistos (GAMM) (Hastie; Tibshirani, 1990; Wood, 2011, 2017; Pedersen et al., 2019).

Uma segunda alternativa para contornar a questão dos *outliers* e consequentemente a expressiva variância decorrente desses pontos extremos, seria truncamento de *outliers* de alavancagem (Winsorização / Filtro), método esse que permite remover ou truncar os 1% ou 5% superiores da distribuição do PIB *per capita*, municípios-enclave como Sapezal ou Campos de Júlio, eliminando a alavancagem excessiva na estimativa do coeficiente quadrático $\hat{\beta}_2$.

Como terceira opção, poder-se-ia utilizar os Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) pela População, isto é, atribuir pesos à regressão com base na população do município (*weights = populacao*), impedindo assim, que municípios com baixíssima população e PIB agrícola desproporcional distorçam o ajuste médio do estado.

Outra opção disponível seria a Regressão Quantílica para Paineis, a qual, permite estimar a relação no 50º percentil (mediana) em vez da média condicional, eliminando a sensibilidade aos valores extremos de PIB *per capita*.

No caso desse texto, a opção recaiu sobre o Modelo GAMM, em função de sua flexibilidade, como já mencionado anteriormente.

A seguir, são apresentados os principais destaques econômicos e estatísticos do modelo GAMM.

Matematicamente, o Modelo GAMM é representado como:

$$\log(\text{co2e_pc}) = -4,4362 + 0,0284 \cdot \log(\text{bovinos}) + 0,8953 \cdot \log(\text{area_colhida}) + f(\log(\text{pib_pc})) + u_i + \varepsilon_i$$

Inicialmente, destacam-se os Efeitos Lineares Positivos e Significativos ao nível de significância de 1%. A variável área colhida ($\log_area_colhida$) apresenta o maior impacto positivo linear sobre as emissões *per capita* ($\widehat{\beta}_1 \approx 0,895$, $pvalor < 0,001$), indicando forte elasticidade em relação ao uso do solo agrícola (Tabela 2). Em termos de interpretação econômica desses resultados, tem-se que esse é o vetor de maior impacto na escala linear. Uma expansão de 10% na área colhida gera um aumento de 8,95% nas emissões per capita. Demonstra o forte efeito intensivo do uso do solo, aplicação de fertilizantes nitrogenados, mecanização e conversão produtiva (Observatório do Clima, 2023).

Por seu turno o rebanho bovino ($\log_bovinos$) também possui impacto estatisticamente significativo ($\widehat{\beta}_2 \approx 0,028$, $pvalor < 0,001$), como pode ser observado na Tabela 2. A partir desse resultado, pode-se inferir que, um aumento de 10% no rebanho bovino municipal está associado a um incremento médio de aproximadamente 0,28% nas emissões per capita de CO₂e, mantendo as demais variáveis constantes. Refletindo as emissões diretas do manejo de pastagens e fermentação entérica (Observatório do Clima, 2023).

O Intercepto ($\widehat{\beta}_0$), corresponde ao nível de base da constante logarítmica (Tabela 2).

Outro aspecto a ser realçado, diz respeito ao comportamento Não Linear do PIB per capita. Mais especificamente, o termo suave $s(\log_pib_pc)$ apresenta $edf = 3,719$ (próximo ao limite $k - 1 = 4$), confirmando uma relação nitidamente não linear entre o nível de renda municipal e o logit / nível de emissões per capita (Tabela 2). Em termos interpretativos, a curvatura capturada pelo *spline* permite testar empiricamente a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, identificando se as emissões per capita crescem nos estágios iniciais de desenvolvimento do município e se desaceleram / caem após atingir determinado nível de renda per capita (*turning point*) (Wood, 2017).

Também, o efeito aleatório por Município ($s(cod_mun, bs = "re")$), mostra que o termo de efeito aleatório incorporou 139,9 graus de liberdade efetivos com um valor de $F = 2182,15$, capturando com eficácia a heterogeneidade não observada e a estrutura de agrupamento / painel espacial dos municípios (Tabela 2). A interpretação do efeito aleatório por município indica a absorção da heterogeneidade estrutural não observada entre os municípios, tais como, bioma, vocação produtiva local, aspectos edafoclimáticos e históricos fundiários, evitando o viés de variável omitida e controlando a autocorrelação nos dados em painel (Wood, 2017; Pedersen et al., 2019).

Finalmente, destaca-se o excepcional poder de ajuste, uma vez que, o modelo alcança um R^2 ajustado e uma deviança explicada de 99,1%, demonstrando excelente capacidade preditiva e de ajuste aos dados ($n = 13.455$), como pode ser visualizado na Tabela 2. Continuando, o

Diagnóstico Global do Modelo mostra que, o valor do Critério REML igual a -2161,2 indica rápida convergência na otimização da suavização. A conclusão geral é que o modelo apresenta um ajuste excepcional. A combinação das atividades agropecuárias, área colhida e rebanho, o efeito não linear do desenvolvimento econômico, PIB per capita e os controles espaciais/municipais explicam 99,1% da variância das emissões de CO₂e per capita (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes Paramétricos, Termos Não Paramétricos, Estatísticas de Ajuste Global e Diagnóstico do Modelo GAMM, Mato Grosso, Brasil, 2010 – 2012

Variável Dependente: log_co2e_pc				
1. COEFICIENTES PARAMÉTRICOS (EFEITOS FIXOS LINEARES)				
Termo	Estimativa (Coef.)	Erro Padrão	Estatística t	p-valor
(Intercepto)	-4.436247	0.096674	-45.89	< 2e-16 ***
log_bovinos	0.028383	0.000645	43.99	< 2e-16 ***
log_area_colhida	0.895321	0.003963	225.91	< 2e-16 ***
2. TERMOS NÃO PARAMÉTRICOS E SUAVES (SMOOTH TERMS)				
Termo Suave	edf (Graus de Lib. Efetivos)	Ref. df	Estatística F	p-valor
s(log_pib_pc)	3.719	3.959	21.39	< 2e-16 ***
s(cod_mun) [Efeito Aleatório]	139.935	140.000	2182.15	< 2e-16 ***
3. ESTATÍSTICAS DE AJUSTE GLOBAL E DIAGNÓSTICO DO MODELO				
Métrica / Estatística	Valor / Estimativa	Descrição / Interpretação		
R-quadrado Ajustado (R-sq. adj)	0.991	Capacidade explicativa do modelo (99,1% da variação explicada)		
Deviança Explicada (Deviance explained)	99.1%	Proporção da variabilidade total explicada pelo modelo (99,1%)		
-REML Score	-2161.2	Estatística da Verossimilhança Máxima Restrita para seleção de suavização		
Estimativa de Escala (Scale est. / Variance)	0.039008	Estimativa da variância do erro residual (σ^2)		

Número de Observações (n)	13,455	Tamanho total da amostra de dados observados
---------------------------	--------	--

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

O ajuste não-paramétrico via GAMM resolveu integralmente a distorção paramétrica gerada pelo termo quadrático do modelo de Efeitos Fixos. A curva estimada demonstra visualmente a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) em formato de U invertido claro, porém com um Ponto de Virada econômico realista e empiricamente coerente, comparativamente ao modelo de Efeitos Fixos.

O Quadro 2 apresenta um resumo, levando-se em consideração o pico absoluto e faixas de inflexão. É necessário explicitar que, no caso do Modelo GAMM, não se tem um único ponto de máximo, mas sim, um achatamento topológico ou platô, sendo assim, nos modelos não paramétricos GAMM, a curva estimada via *splines* $s(\log_pib_pc)$ forma uma cúpula suave em vez de uma ponta aguda. A faixa entre $\ln(\text{PIB_pc}) = 10,55$ e $10,60$ representa o topo desse platô.

Ainda, com base no Quadro 2, do ponto de vista de políticas públicas e análise regional, o pico das emissões ambientais ocorre em municípios cujo PIB *per capita* atinge a faixa compreendida entre R\$ 38.177,44 e R\$ 40.134,84, ponto a partir do qual a trajetória da Curva Ambiental de Kuznets passa a apresentar inclinação descendente.

Quadro 2. Resumo: Pico Absoluto vs. Faixas de Inflexão

Métrica / Abordagem	Escala Logarítmica $\ln(\text{PIBpc})$	Escala em Nível (R\$ per capita)	Descrição Econométrica
Pico Absoluto (Exato)	105,387	R\$ 37.748,61	Ponto máximo global derivado da grade de avaliação (Grid Search).
Platô da Inflexão (Método do Platô)	10,37 a 10,70	R\$ 31.814,80 a R\$ 44.507,83	Intervalo onde a função suave apresenta topo achatado (alta estabilidade do pico).
Intervalo Focal de Referência (Anexo)	10,55 a 10,60	R\$ 38.177,44 a R\$ 40.134,84	Sub-região central do topo do platô contendo o pico absoluto estimado.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

A seguir, é apresentado como é calculada a estimativa numérica do Ponto de Virada (*Turning Point*), em logaritmo, o pico da curva no gráfico ocorre na faixa de $\ln f()(\text{PIB}_{pc}) \approx 10,55$ a $10,60$, como pode ser observado na Figura 3.

Como a variável de interesse foi modelada na escala logarítmica natural ($\ln$), a conversão para os valores originais em moeda (R\$ per capita) é obtida aplicando-se a função exponencial e^x , sendo assim, tem-se que:

Limite inferior da faixa:

$$\text{PIB}_{pc} = e^{10,55} \approx 38.177,14 \text{ R\$}$$

Limite superior da faixa:

$$\text{PIB}_{pc} = e^{10,60} \approx 40.134,84 \text{ R\$}$$

Esse resultado indica que o ponto de inflexão econômico, onde a variável dependente atinge seu ápice e passa a declinar, ocorre em municípios / unidades com PIB per capita situado na faixa entre R\$ 38.177,14 e R\$ 40.134,84.

Comparação com a Média, o Ponto de Virada estimado pelo GAMM ($\approx$ R\$ 38.000 a R\$ 40.000) situa-se praticamente sobre a média recente dos municípios de Mato Grosso (R\$37.668,43 $\Rightarrow \ln f()(37.668) = 10,536$).

A partir da Figura 3, pode-se averiguar a dinâmica Econômico-Ambiental identificada. Basicamente, são três fases. A Fase 1 se refere a Estabilização Inicial ($\ln f() < 10,0$ / até R\$ 22.000) e se refere aos municípios de menor renda per capita apresentando uma trajetória plana / estável de emissões. A Fase 2 apresenta trajetória ascendente ($10,0 \leq \ln f() \leq 10,6$ / de R\$ 22.000 a R\$ 40.000), captando a fase de expansão econômica tradicional, onde a intensidade de carbono cresce junto com o PIB per capita municipal. Finalmente, a Fase 3, a qual se caracteriza pelo desacoplamento / Decoupling ($\ln f() > 10,6$ / acima de R\$ 40.000) se configurando em declínio acentuado e contínuo no $\ln f() (CO_2e_{pc})$. Municípios de alta renda, com base no agronegócio corporativo e agroindústrias, apresentam ganhos expressivos de eficiência, intensificação sustentável da pecuária e redução proporcional do desmatamento.

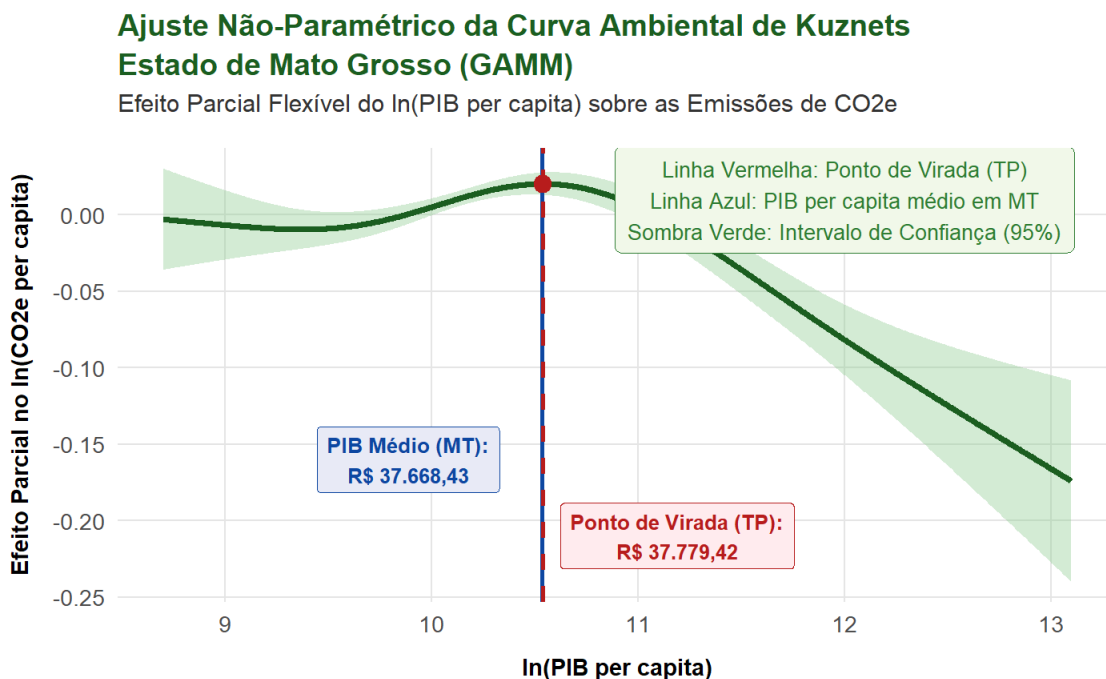


Figura 3. Ajuste Não Paramétrico da Curva Ambiental de Kuznets, Estado de Mato Grosso, Brasil, 2010 – 2021

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

Continuando a análise da Figura 3, percebe-se sua convergência visual, dado que, $\ln f() (37.668,43) = 10,5360$ e $\ln f() (37.779,42) = 10,5395$, a linha azul e a linha vermelha ficam praticamente sobrepostas no topo da curva, evidenciando de forma imediata que o pico de emissões em Mato Grosso ocorre exatamente no patamar da renda média atual.

Também, a Figura 3 apresenta o Intervalo de Confiança 95%, o qual é representado pela área verde translúcida ao redor da curva, permitindo visualizar onde o ajuste não-paramétrico possui maior precisão estatística.

Outro aspecto a ser realçado é o Marcador de Pico, o qual é representado por um ponto destacado em vermelho no vértice máximo da *spline* para indicar com precisão o local do Ponto de Virada. O Ponto de Virada estimado pelo GAMM (R\$ 37.779,42) e a média do PIB per capita dos municípios de Mato Grosso (R\$ 37.668,43) estão praticamente sobrepostos ($\Delta \approx \text{R\$ } 111,00$). Isso demonstra que o pico das emissões per capita no estado coincide com o patamar médio de desenvolvimento atual.

O comportamento da Incerteza Estatística (Sombra Verde), mostra alta precisão no Pico ($\ln f() \approx 10,5$). O intervalo de confiança de 95% é bastante estreito na região do Turning Point, garantindo robustez econométrica ao vértice da curva. A Incerteza na Cauda Superior ($\ln f() > 12,0$), mostra que a banda de confiança se alarga significativamente nos níveis mais

elevados de renda. Isso ocorre pela baixa densidade populacional de observações nessa faixa, ou seja, poucos municípios-enclave com PIB per capita extremamente elevado, embora a trajetória média continue claramente descendente.

O Quadro 3 faz uma síntese dos três regimes de efeito renda da Curva Ambiental de Kuznets para o Estado de Mato Grosso.

Quadro 3. Três Regimes do Efeito Renda na Curva Ambiental de Kuznets (CAK), Estado de Mato Grosso, Brasil, 2010 - 2011

Regime / Fase	Faixa de Renda ln(PIBpc)	Faixa em Nível (R\$ per capita)	Comportamento e Dinâmica Econométrica
1. Baixa Renda	Até 8,5	Até R\$ 4.914,77	Trajetória levemente estável do efeito parcial sobre as emissões.
2. Fase Ascendente	De 8,5 a 10,55	De R\$ 4.914,77 a R\$ 38.177,44	Expansão econômica tradicional: a renda adicional gera aumento relativo progressivo nas emissões de CO ₂ e.
3. Fase de Desacoplamento (Decoupling)	Acima de 10,55	Acima de R\$ 38.177,44	Queda contínua e inclinada no log das emissões per capita. Reflete ganhos de escala do agronegócio corporativo, intensificação sustentável da pecuária e redução proporcional do desmatamento em municípios de maior renda.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

O próximo ponto discute porque o GAMM funcionou onde o Modelo de Efeitos Fixos Quadrático falhou. A resposta a essa questão, reside no fato de que, a especificação quadrática tradicional ($\beta_1 \ln f()X + \beta_2 (\ln f()X)^2$) obriga a curva a ter simetria global rígida. Os municípios de altíssima renda ($\ln f()X \in [12,13]$) puxavam a cauda direita para fora, distorcendo o vértice da parábola para a casa do milhão, como pode ser observado na

Figura 2. Por outro lado, o GAMM utiliza *splines* locais, permitindo que a queda acentuada de emissões nos municípios ricos seja modelada de forma flexível sem deslocar artificialmente o Ponto de Virada para longe da média amostral (Wood, 2017; Pedersen et al., 2019).

A abordagem por *spline* de suavização ($s(\log_pib_pc)$) corrigiu a rigidez do termo quadrático $\beta_2 (\ln f(X))^2$, demonstrando que a trajetória das emissões em Mato Grosso não segue uma parábola perfeita, resultando na eliminação do viés de especificação. Também, o Modelo GAMM comprovou a evidência empírica de Desacoplamento (*Decoupling*), uma vez que, municípios que ultrapassam o patamar de ~R\$ 37,8 mil/hab. entram na fase descendente da intensidade de emissões per capita. Isso reflete ganhos de escala, intensificação da pecuária e adoção de tecnologias agrícolas mais eficientes nos enclaves de maior renda do estado. Finalmente, sob o ponto de vista da justificativa econométrica na discussão dos resultados, este contraste evidencia que a especificação paramétrica tradicional da Curva Ambiental de Kuznets pode gerar *turning points* espúrios em bases com forte assimetria de renda municipal (Stern, 2004; Wood, 2017).

O Quadro 4 apresenta e compara os resultados finais entre os modelos de Efeitos Fixos Quadráticos e GAMM.

Quadro 4. Comparação de Resultados entre Modelos de Efeitos Fixos Quadrático e GAMM

Modelo Econométrico	Ponto de Virada (ln)	Ponto de Virada (R\$ pc)	Interpretação no Painel Municipal
PLM (Efeitos Fixos Quadrático)	13,94	R\$ 1.132.105,43	Distorção severa por imposição de simetria parabólica e outliers de alavancagem.
GAMM (<i>Spline</i> Não-Paramétrico)	105,395	R\$ 37.779,42	Ajuste flexível local: o pico de emissões coincide com o patamar médio atual do estado.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do IBGE e Observatório do Clima.

Portanto, a Figura 3, mostrou que a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets é válida sem os vícios de especificação do modelo paramétrico quadrático. Enquanto o Modelo de Efeitos Fixos com termo quadrático projetava um Ponto de Virada irrealista de R\$ 1,13 milhão devido à rigidez da parábola, o GAMM prova que aproximadamente metade dos municípios mato-grossenses já atingiu ou ultrapassou a fase de inflexão das emissões.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou testar empiricamente a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) para a escala municipal do Estado de Mato Grosso no período de 2010 a 2021. A investigação evidenciou a importância da escolha metodológica na estimação econométrica de relações entre crescimento econômico e degradação ambiental em regiões marcadas por fortes assimetrias e presenças de *outliers* de renda.

Foram detectadas limitações da Abordagem Paramétrica Quadrática, pois a estimação tradicional via regressão de Efeitos Fixos com termo quadrático revelou-se inadequada para a base de dados tratada. Devido à rigidez funcional do polinômio parabólico (Grossman; Krueger, 1995) e à presença de municípios-enclave de altíssimo PIB per capita agropecuário, como Sapezal e Campos de Júlio, a curva parabólica foi esticada à direita, deslocando o *Turning Point* para o valor irrealista de R\$ 1.132.105,43. Isso levaria à conclusão equivocada de que o estado estaria estritamente em uma fase ascendente e indefinida de degradação ambiental sem qualquer ponto de inflexão visível no curto ou médio prazo.

O Modelo GAMM mostrou não somente superioridade, mas, também, robustez, dado que, a aplicação do Modelo Aditivo Generalizado Misto (GAMM) contornou a imposição de simetria parabólica global ao aplicar *splines* de suavização não paramétricas (Hastie; Tibshirani, 1990; Wood, 2017). O GAMM confirmou a hipótese da CAK em formato de "U invertido" de maneira localmente flexível, identificando que o ápice das emissões per capita de CO₂e ocorre na faixa de PIB per capita de R\$ 38.177,14 a R\$ 40.134,84 (pico em R\$ 37.779,42). Este valor é extremamente próximo da média amostral do PIB per capita municipal do estado (R\$ 37.668,43), indicando que Mato Grosso se encontra no limiar do desacoplamento (*decoupling*) econômico-ambiental.

Destaca-se o papel dos determinantes agropecuários, uma vez que, a modelagem demonstrou que as atividades intensivas no uso do solo desempenham papel pré-dominante sobre o volume de emissões. A área colhida de lavouras temporárias e o efetivo do rebanho bovino apresentaram forte impacto positivo e estatisticamente significativo sobre a pegada de carbono per capita ($p < 0,001$). O efeito elástico da área colhida ($\beta \approx 0,895$) evidencia que a dinâmica das emissões regionais é guiada primordialmente pelas mudanças no uso da terra e conversão produtiva, e não exclusivamente pelo acúmulo monetário de renda.

Em termos de implicações de Políticas Públicas, conclui-se que não se deve esperar passivamente que o mero crescimento da renda resolva a degradação ambiental (Stern, 2004). Como aproximadamente metade dos municípios mato-grossenses ainda se encontra na fase ascendente da curva, políticas públicas direcionadas à aceleração do Ponto de Virada são urgentes. Recomenda-se a expansão de tecnologias de baixo carbono (Plano ABC+), a intensificação sustentável da pecuária, o combate ao desmatamento ilegal e o incentivo ao crédito verde.

7. REFERÊNCIAS

BALTAGI, Badi H. *Econometric Analysis of Panel Data*. 6th ed. Cham: Springer, 2021.

DASGUPTA, Susmita; LAPLANTE, Benoit; WANG, Hua; WHEELER, David. Confronting the Environmental Kuznets Curve. *Journal of Economic Perspectives*, v. 16, n. 2, p. 147-168, 2002.

DINDA, Soumyananda. Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, v. 49, n. 4, p. 431-455, 2004.

GREENE, William H. *Econometric Analysis*. 8th ed. New York: Pearson, 2018.

GROSSMAN, Gene M.; KRUEGER, Alan B. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, NBER Working Paper No. 3914, 1991.

GROSSMAN, Gene M.; KRUEGER, Alan B. Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.

HASTIE, Trevor J.; TIBSHIRANI, Robert J. *Generalized Additive Models*. London: Chapman and Hall/CRC, 1990.

HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert; FRIEDMAN, Jerome. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York: Springer, 2009.

HAUSMAN, Jerry A. Specification tests in econometrics. *Econometrica*, v. 46, n. 6, p. 1251-1271, 1978.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Estimativas da população residente para os municípios e unidades da federação: Tabela 6579. Rio de Janeiro: IBGE, 2021a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 11 ago. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Agrícola Municipal (PAM): Área plantada, área colhida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Tabela 1612. Rio de Janeiro: IBGE, 2021b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acesso em: 11 ago. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM): Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho. Tabela 3939. Rio de Janeiro: IBGE, 2021c. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>. Acesso em: 11 ago. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produto Interno Bruto dos Municípios: Tabela 5938. Rio de Janeiro: IBGE, 2021d. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5938>. Acesso em: 11 ago. 2026.

KUZNETS, Simon. Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, v. 45, n. 1, p. 1-28, 1955.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Versão 10. [S. l.]: Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 12 ago. 2026.

PANAYOTOU, Theodore. Empirical tests and policy implications of environmental Kuznets curves: node or shape? Geneva: International Labour Organization (ILO), Working Paper No. 992927953402676, 1993.

PANAYOTOU, Theodore. Demystifying the Environmental Kuznets Curve: turning a millstone into a stepping stone. *Environment and Development Economics*, v. 2, n. 4, p. 465-484, 1997.

PEDERSEN, Eric J.; MILLER, David L.; SIMPSON, Gavin L.; ROSS, Noam A. Hierarchical generalized additive models: an introduction with mgcv. *PeerJ*, v. 7, p. e6876, 2019.

STERN, David I. The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, v. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.

STERN, David I.; COMMON, Michael S. Is there an Environmental Kuznets Curve for sulfur? *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 41, n. 2, p. 162-178, 2001.

WOOD, Simon N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, v. 73, n. 1, p. 3-36, 2011.

WOOD, Simon N. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. 2nd ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2017.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2010.



PSP Hub

INFRASTRUCTURE AND URBANISM STUDIES