POLÍTICA DE DESCARBONIZAÇÃO OU REDISTRIBUIÇÃO PRODUTIVA? EVIDÊNCIAS SUBNACIONAIS SOBRE O RENOVABIO NO MERCADO DE ETANOL BRASILEIRO

Ana Maria Paula Rosa [1]
Ingryd Yohane Bezerra Almeida Santos [2]
Luiz Moreira Coelho Junior [3]

Resumo

A transição energética reforçou a importância dos biocombustíveis na descarbonização, com destaque para o etanol de cana-de-açúcar no Brasil e para o RenovaBio. Este estudo analisa a associação entre o período pós-operacionalização da política e a dinâmica produtiva estadual do setor sucroenergético, considerando diferenças entre etanol anidro e hidratado. Para isso, utilizam-se modelos de dados em painel com efeitos fixos para as 26 unidades federativas brasileiras, no período de 2015 a 2023, incorporando variáveis econômicas, produtivas, energéticas, climáticas e institucionais. Os resultados indicam associação positiva do RenovaBio com a produção de etanol anidro e negativa com a de etanol hidratado, evidenciando respostas heterogêneas entre segmentos e regiões. A produtividade apresentou efeito positivo em ambos os modelos, reforçando o papel da eficiência produtiva na expansão da bioenergia. Conclui-se que políticas de descarbonização podem reconfigurar dinâmicas territoriais e produtivas, atuando não apenas como instrumentos ambientais, mas também como vetores de redistribuição produtiva no setor sucroenergético brasileiro.

Palavras-chave: Descarbonização; Transição energética; Bioenergia; Economia regional; Heterogeneidade territorial

Abstract

The energy transition has reinforced the importance of biofuels in decarbonization, with particular emphasis on sugarcane ethanol in Brazil and on RenovaBio. This study analyzes the association between the post-operationalization period of the policy and the state-level productive dynamics of the sugar-energy sector, considering differences between anhydrous and hydrous ethanol. To this end, fixed-effects panel data models are applied to the 26 Brazilian federative units over the period from 2015 to 2023, incorporating economic, productive, energy, climatic, and institutional variables. The results indicate a positive association between RenovaBio and anhydrous ethanol production, and a negative association with hydrous ethanol production, revealing heterogeneous responses across segments and regions. Productivity showed a positive effect in both models, reinforcing the role of productive efficiency in the expansion of bioenergy. The study concludes that decarbonization policies may reshape territorial and productive dynamics, acting not only as environmental instruments but also as drivers of productive redistribution in the Brazilian sugar-energy sector.

Keywords: Decarbonization; Energy transition; Bioenergy; Regional economics; Territorial heterogeneity.

Área 8. Economia Ecológica, Mudança Climática e Sustentabilidade

JEL: Q2; Q4.

---

[1] Pesquisadora Visitante PRH-ANP 35/UFPB, Laboratório de Economia de Baixo Carbono, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e-mail: ana.rosa@cear.ufpb.br.

[2] Graduanda em Engenharia de Energias Renováveis, Laboratório de Economia de Baixo Carbono, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e-mail: ingrydyohane@estudante.cear.ufpb.br .

[3] Professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e-mail: luiz@cear.ufpb.br .

1. Introdução

A transição energética integra um processo mais amplo de transformação ecológica, no qual políticas públicas buscam reconfigurar incentivos econômicos, padrões produtivos e trajetórias tecnológicas. Nesse cenário, os biocombustíveis assumem papel estratégico por articularem descarbonização, segurança energética e desenvolvimento agroindustrial (Liu; Shen; Razzaq, 2023). No Brasil, esse debate ganha relevância particular. Em 2023, a produção nacional de etanol e biodiesel alcançou quase 43 bilhões de litros, recorde histórico segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (ANP, 2024). A produção de etanol totalizou 35,4 bilhões de litros, com crescimento de 15,5% em relação ao ano anterior; o etanol anidro cresceu 13,5% e o hidratado 16,8% no mesmo período (ANP, 2024). Esses dados evidenciam a centralidade dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e na agenda de transição para uma economia de baixo carbono.

O Brasil consolidou-se como uma das principais referências internacionais na produção e no uso de etanol de cana-de-açúcar. A experiência nacional demonstra a viabilidade de uma matriz energética com elevada participação de fontes renováveis e de uma cadeia produtiva capaz de integrar agricultura, indústria, logística e mercado de combustíveis. Segundo o Balanço Energético Nacional, os derivados da cana-de-açúcar permanecem entre as principais fontes renováveis da matriz energética brasileira (EPE, 2024). Ainda assim, a expansão do setor sucroenergético brasileiro permanece marcada por assimetrias regionais, concentração produtiva, dependência de condições climáticas e diferenças expressivas de capacidade industrial entre estados (Oliveira; Zanin, 2015; Vidal, 2019).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017 (BRASIL, 2017), representa um dos principais instrumentos brasileiros de descarbonização no setor de combustíveis. A política introduziu metas nacionais de redução de emissões e mecanismos de mercado, como os Créditos de Descarbonização (CBIOs), buscando alinhar incentivos econômicos à eficiência ambiental e à ampliação da oferta de biocombustíveis (SILVA et al., 2019). O RenovaBio insere-se em um movimento internacional de adoção de instrumentos econômicos voltados à transição energética e à redução da intensidade de carbono das matrizes energéticas (Yan, 2024; Zou; Wang, 2024).

Sob uma perspectiva keynesiana e pós-keynesiana, políticas públicas voltadas à transição energética não devem ser interpretadas apenas como mecanismos de correção de falhas de mercado ou de precificação ambiental. Elas atuam também como instrumentos de coordenação de expectativas, indução do investimento e orientação da estrutura produtiva em contextos marcados por incerteza fundamental. Em Keynes (1936), o investimento depende das expectativas empresariais quanto à rentabilidade futura, sendo fortemente influenciado pelo ambiente institucional e pelas decisões do Estado. Nessa mesma direção, Carvalho (1992) destaca que, em uma economia monetária

da produção, as decisões privadas são tomadas sob incerteza não probabilística, o que torna a ação pública fundamental para estabilizar expectativas e sustentar trajetórias de investimento. Assim, o RenovaBio pode ser compreendido não apenas como política de descarbonização, mas como instrumento de política industrial, energética e regional, capaz de induzir investimentos, reorganizar capacidades produtivas e alterar a distribuição territorial da produção.

Estudos empíricos internacionais indicam que políticas energéticas e ambientais produzem efeitos heterogêneos, condicionados por estrutura produtiva, intensidade industrial, disponibilidade de matéria-prima, arranjos institucionais e capacidade regional de resposta (Zhang; Khalid; Mahmood, 2023; Trebat, 2025). Pesquisas aplicadas à economia da energia têm utilizado modelos de dados em painel para examinar relações entre produção de energia renovável, crescimento econômico, emissões e políticas públicas, permitindo controlar heterogeneidades não observadas entre unidades espaciais e variações temporais (Armeanu; Vintilă; Gherghina, 2017; Busu; Nedelcu, 2021; Kurniadi; Aimon; Amar, 2021). Essa abordagem mostra-se particularmente adequada ao caso brasileiro, dada a elevada desigualdade regional na produção de etanol, na estrutura industrial e na base agrícola.

Apesar da relevância do RenovaBio, ainda são limitadas as evidências sobre como essa política se manifesta na dinâmica produtiva estadual. O problema central não se restringe à identificação de efeitos médios agregados. A questão fundamental consiste em compreender como o sistema produtivo reage a instrumentos de descarbonização em um país marcado por fortes desigualdades regionais. Nesse contexto, torna-se relevante investigar se a política opera predominantemente como mecanismo de expansão setorial ou como vetor de redistribuição produtiva entre estados e segmentos do setor sucroenergético.

A compreensão dessas diferenças possui relevância econômica e institucional. Políticas de descarbonização podem ampliar assimetrias regionais quando os ganhos se concentram em estados com maior capacidade produtiva, infraestrutura industrial e acesso a mecanismos de certificação. A identificação de padrões heterogêneos de resposta torna-se fundamental para avaliar os limites e as possibilidades de instrumentos voltados à transição energética em economias emergentes (Busu, 2019; Liu, 2013).

Essa heterogeneidade regional pode ser interpretada à luz da tradição keynesiana-estruturalista, especialmente a partir das contribuições de Kaldor (1966, 1970) e Myrdal (1957), para os quais o desenvolvimento econômico tende a assumir caráter cumulativo e espacialmente desigual. Regiões dotadas de maior base industrial, infraestrutura produtiva, densidade tecnológica e capacidade institucional tendem a responder de forma mais intensa aos estímulos de política pública, enquanto regiões periféricas podem permanecer limitadas por restrições estruturais. No caso brasileiro, essa leitura dialoga diretamente com Furtado (1959, 1961), ao enfatizar que o

desenvolvimento nacional foi historicamente marcado por heterogeneidade estrutural e concentração regional de capacidades produtivas. Desse modo, os efeitos do RenovaBio sobre a produção estadual de etanol devem ser analisados não apenas em termos de eficiência ambiental, mas também em sua capacidade de alterar ou reforçar padrões territoriais de desenvolvimento.

Este estudo analisa os efeitos associados das políticas de biocombustíveis sobre a produção estadual de etanol no Brasil. Busca-se investigar os padrões de resposta produtiva ao RenovaBio, identificar os determinantes econômicos, produtivos e climáticos da produção e examinar diferenças estruturais entre os mercados de etanol anidro e hidratado. A hipótese central sustenta que os efeitos associados à política não ocorrem de forma homogênea entre as unidades federativas, sendo mediados por fatores como capacidade produtiva instalada, atividade industrial, disponibilidade de cana-de-açúcar, produtividade e condições climáticas.

A estratégia empírica utiliza modelos de dados em painel com efeitos fixos aplicados às 26 unidades federativas brasileiras no período de 2015 a 2023. A estimação separada para etanol anidro e hidratado permite captar respostas distintas entre dois segmentos com lógicas econômicas diferentes. O etanol anidro está associado à mistura obrigatória com a gasolina, enquanto o hidratado é comercializado diretamente ao consumidor final e tende a responder de forma mais sensível às condições de mercado. Essa separação reduz vieses de agregação e permite analisar se o RenovaBio opera como política de descarbonização ampla ou como vetor de reorganização produtiva entre segmentos e regiões.

O artigo está estruturado em quatro seções. Após esta introdução, a Seção dois descreve os procedimentos metodológicos, as variáveis utilizadas e a base de dados da pesquisa. A Seção três apresenta e discute os resultados empíricos, com ênfase na heterogeneidade das respostas produtivas entre estados e segmentos do setor sucroenergético. Por fim, a Seção quatro reúne as conclusões, destacando as implicações dos resultados para políticas de transição energética, desenvolvimento regional e fortalecimento da cadeia de biocombustíveis no Brasil.

2. Material e Métodos

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, incluindo a definição da base de dados, as variáveis utilizadas e a estratégia econométrica empregada.

2.1 Objeto de Estudo

A presente pesquisa utiliza um conjunto de dados em painel balanceado que integra dimensões temporal e transversal, permitindo explorar simultaneamente a variação entre unidades federativas e ao longo do tempo. A dimensão transversal (N) compreende as 26 Unidades da Federação brasileiras, enquanto a dimensão temporal (T) abrange o período de 2015 a 2023. A escolha desse recorte

temporal e geográfico fundamenta-se na necessidade de capturar os efeitos associados à implementação e consolidação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017. Especificamente, o período analisado contempla tanto a fase pré-RenovaBio quanto o período posterior à sua efetiva operacionalização, iniciada em 2017, permitindo a identificação de possíveis efeitos associados à política. Ademais, essa delimitação assegura a utilização de bases de dados consistentes e comparáveis, especialmente aquelas disponibilizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). O quadro 1 apresenta a descrição das variáveis.

Quadro 1- Descrição das variáveis da pesquisa

Variável	**Dimensão**	**Definição**	**Fonte de Dados**
$PROD_{EtanolA,\ it}$	Volume (m^3)	Produção total de etanol anidro no estado *i* no tempo *t*.	ANP - Séries Históricas de Produção.
$PROD_{Etanol\ H\ it}$	Volume (m^3)	Produção total de etanol hidratado no estado *i* no tempo *t*.	ANP - Séries Históricas de Produção.
$PREÇO_{Ait}$	Valor (R$/Litro)	Preço médio ponderado do etanol anidro no estado *i*.	ANP (Pesquisa de Preços) e/ou CEPEA/ESALQ.
$PREÇO_{Hit}$	Valor (R$/Litro)	Preço médio ponderado do etanol hidratado no estado *i*.	ANP (Pesquisa de Preços) e/ou CEPEA/ESALQ.
$PROD_{cana,it}$	Volume (Toneladas)	Volume produzido da principal matéria-prima do etanol (cana-de-açúcar) no estado *i*. no tempo *t.*	CONAB (Séries Históricas de Safras) e IBGE (PAM).
PIB agropecuária	Valor(R$)	Produto Interno Bruto (PIB) do estado *i*. no tempo *t*, para controle do crescimento econômico geral.	IPEA DATA
PIB indústria	Valor(R$)	Produto Interno Bruto (PIB) do estado *i*. no tempo *t*, para controle do crescimento econômico geral.	IPEA DATA
PIB serviços	Valor(R$)	Produto Interno Bruto (PIB) do estado *i*. no tempo *t*, para controle do crescimento econômico geral.	IPEA DATA
Consumo de energia elétrica	Megawatt-hora (MWh)	proxy da demanda energética regional	IPEA DATA

População estimada	Habitantes	demanda potencial por combustíveis	IPEA DATA
D_{RBio}	Binária	Variável dummy que assume valor 1 para os anos após a implementação efetiva do RenovaBio (a partir de 2020) e 0 antes.	Regulamentação RenovaBio (Lei 13.576/2017, Decretos e Resoluções ANP
Precipitação	Milímetros	Quantidade média de chuva anual do estado *i*. no tempo *t*	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)
Temperatura	ºC	Temperatura média anual do estado *i*. no tempo *t*	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)
Produtividade	Kg/hectare	Produção média de cana de açúcar por hectare plantado do estado *i*. no tempo *t*	Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar

A variável dependente do modelo é a produção estadual de etanol, mensurada em volume (m^3), com base em dados desagregados por tipo de combustível. Considerando as diferenças estruturais relevantes entre o etanol anidro e o etanol hidratado no mercado brasileiro, optou-se pela estimação de modelos em painel separados para cada tipo. O etanol anidro é destinado majoritariamente à mistura obrigatória com a gasolina, sendo sua demanda fortemente condicionada por instrumentos regulatórios e parâmetros institucionais. Por sua vez, o etanol hidratado é comercializado diretamente ao consumidor final, apresentando maior sensibilidade a fatores de mercado, como preços relativos e condições de demanda. Dessa forma, a estimação separada permite captar funções de resposta heterogêneas às variáveis explicativas, evitando vieses de agregação e a imposição de restrições paramétricas indevidas, em linha com estudos empíricos recente em economia da energia.

As variáveis explicativas foram selecionadas de modo a representar as dimensões econômica, produtiva, energética e institucional associadas ao setor de biocombustíveis. Inicialmente, incluem-se os preços médios do etanol anidro e hidratado (R$/litro), que capturam os incentivos de mercado à produção, refletindo a dinâmica de oferta e demanda. Adicionalmente, a produção de cana-de-açúcar, medida em toneladas, é incorporada como variável estrutural de capacidade produtiva, uma vez que constitui a principal matéria-prima do etanol no Brasil, condicionando diretamente o volume produzido.

Para controlar o nível de atividade econômica regional, utilizam-se variáveis relacionadas ao Produto Interno Bruto (PIB) estadual, permitindo captar efeitos associados à estrutura produtiva e ao dinamismo econômico das unidades federativas. Inclui-se também o consumo de energia elétrica

como proxy da intensidade da atividade econômica e industrial, bem como a população estimada, que representa a escala econômica e a demanda potencial por combustíveis.

Por fim, incorpora-se uma variável dummy (D_RBio) para capturar os efeitos institucionais associados ao RenovaBio, assumindo valor igual a 1 para os anos a partir de 2020 e 0 para os períodos anteriores. Essa variável permite avaliar, ainda que de forma parcial, associação entre o período pós-operacionalização do RenovaBio e a produção de etanol, sendo particularmente relevante no contexto de análises de avaliação de políticas públicas.

Nesse contexto, a estimação separada permite identificar funções de resposta heterogêneas (heterogeneous response functions) às variáveis explicativas, evitando vieses de agregação e a imposição de restrições paramétricas indevidas que poderiam comprometer a consistência dos estimadores em um modelo unificado. Ademais, essa abordagem está alinhada à pesquisas empírica recente em economia da energia e políticas ambientais, que enfatiza a necessidade de modelar separadamente diferentes vetores energéticos diante de suas especificidades tecnológicas, institucionais e de mercado, especialmente em análises em painel voltadas à avaliação de políticas públicas.

Para a estimação dos modelos econométricos, todas as variáveis foram transformadas em logaritmo natural, com o objetivo de linearizar as relações entre as variáveis, reduzir a influência de valores extremos e permitir a interpretação dos coeficientes estimados como elasticidades. As estimações serão realizadas por meio do software Stata, adotando técnicas apropriadas para dados em painel.

2.2 Dados em Painel

Dados em painel são usados em estudos econômicos que visam abordar tanto a heterogeneidade entre as unidades de análise (estados, no presente caso) quanto os efeitos dinâmicos ao longo do tempo. Esta abordagem possui algumas vantagens: i) permitem considerar um grande número de observações ao longo de diferentes unidades; ii) ajudam a reduzir o efeito da colinearidade entre as variáveis e; iii) aumentam o número de graus de liberdade. Estes pontos, resultam em uma melhor eficiência do estimador (Greene, 2020).

A abordagem em dados em painel oferece flexibilidade na modelagem das variações de comportamento entre os indivíduos. A equação clássica é representada pelo seguinte modelo de regressão:

$$y_{it} = x'_{it}\beta + z'_{i}\alpha + \varepsilon_{it}$$

onde x_{it} contém K regressores, z_i representa a heterogeneidade, ou efeito individual, e contém um conjunto de variáveis individuais. Se z_i conter apenas um termo constate é possível estimar o modelo por Mínimos Quadrados Ordinários. No caso de z_i ser não observável há duas estratégias que podem ser seguidas: modelo de efeitos fixos ou modelo de efeitos aleatórios (Greene, 2020).

No modelo de efeito fixo temos o caso que z_i é correlacionado com x_{it}, ou seja, permite que os efeitos individuais não observáveis estejam correlacionados com as variáveis incluídas no modelo, representado pela equação abaixo:

$$y_{it} = x'_{it}\beta + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

onde $\alpha_i = z_i = A$ incorpora os efeitos observáveis e especifica uma média condicional estimável. Neste caso, a heterogeneidade entre grupos é capturada no termo constante. Destaca-se que o termo "fixo" é utilizado para refletir a correlação de $z'_i\alpha$ e x_{it} (Greene, 2020).

No modelo de efeitos aleatório, a heterogeneidade individual não observada é não correlacionada com x_{it}:

$$y_{it} = x'_{it}\beta + \alpha + u_i + \varepsilon_{it}$$

onde u_i é a heterogeneidade aleatória da *i*-ésima observação e é constante ao longo do tempo.

Em suma, os dois modelos diferem a depender se o efeito individual não observado irá ou não incorporar elementos que estão correlacionados com os regressores do modelo. Para a escolha do modelo de melhor adequação é utilizado o teste Hausman, a hipótese nula é que ambos os estimadores (efeitos fixos e efeitos aleatórios) são consistentes e a hipótese alternativa é de que o efeito fixo é preferível. (Greene, 2020). A inclusão de μ_i e λ_t é crucial para eliminar vieses de variáveis omitidas endógenas ao nível estadual e temporal, garantindo a robustez das estimativas. Além disso, serão utilizados erros-padrão clusterizados por estado para corrigir potenciais problemas de heterocedasticidade e correlação serial

Com base na estrutura dos dados em painel e nos objetivos do estudo, a estratégia empírica consiste na estimação de modelos econométricos com efeitos fixos, permitindo controlar a heterogeneidade não observada entre as unidades federativas, bem como choques comuns ao longo do tempo.

O modelo básico estimado pode ser representado da seguinte forma:

$$\ln(Produção_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(Preço_{it}) + \beta_2 \ln(Cana_{it}) + \beta_3 \ln(PIB_{it}) + \beta_4 \ln(Energia_{it}) + \beta_5 \ln(População_{it}) + \beta_6 D_{RBio_t} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

onde:

- ln ($Produc\tilde{a}o_{it}$)representa o logaritmo da produção de etanol (anidro ou hidratado) no estado $i$no período t;
- ln ($Preco_{it}$)corresponde ao logaritmo do preço médio do etanol;
- ln ($Cana_{it}$)refere-se à produção de cana-de-açúcar;
- ln (PIB_{it})captura o nível de atividade econômica regional;
- ln ($Energia_{it}$)representa o consumo de energia elétrica;
- ln ($Popula\overset{\backslash c}{\tilde{a}}o_{it}$)corresponde à população estadual;
- D_{RBio_t}é a variável dummy associada à implementação do RenovaBio;
- $\mu_i$representa efeitos fixos específicos de cada estado (heterogeneidade não observada);
- $\lambda_t$representa efeitos fixos de tempo (choques macroeconômicos comuns);
- ε_{it}é o termo de erro idiossincrático.

A escolha pelo estimador de efeitos fixos justifica-se pela necessidade de controlar características invariantes no tempo das unidades federativas, tais como condições agroclimáticas, infraestrutura produtiva e especificidades institucionais regionais, que podem influenciar a produção de etanol e estar correlacionadas com as variáveis explicativas. Adicionalmente, a inclusão de efeitos fixos de tempo permite controlar choques agregados, como variações macroeconômicas, mudanças regulatórias nacionais e flutuações no mercado energético.

3. Resultados

Esta seção apresenta os resultados empíricos obtidos a partir das estimações em dados em painel, com o objetivo de identificar os determinantes da produção de etanol no Brasil e avaliar os efeitos das políticas de biocombustíveis, em especial o RenovaBio. Inicialmente, são discutidos os resultados para o etanol anidro e, em seguida, para o etanol hidratado, destacando-se as diferenças estruturais entre os dois segmentos. A análise concentra-se nos modelos de efeitos fixos com erros robustos, conforme indicado pelo teste de Hausman, permitindo uma interpretação mais consistente dos coeficientes estimados.

3.1 Análise dos Resultados descritivos

A Tabela 01 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo, permitindo uma visão geral da distribuição dos dados ao longo do período de 2015 a 2023.

Tabela 01- Análise descritiva das variáveis (dependente e exógenas) usadas na pesquisa, 2015 a 2023

Variável	Média	Desvio-padrão	Valor mínimo	Valor máximo	CV (%)
Renovabio	0,44	0,31	0,00	1,00	283,45
Preço médio do etanol anidro	3,59	0,59	2,33	6,10	25,78
Preço médio do etanol hidratado	3,74	0,89	2,00	6,00	23,76
Produção de etanol anidro	580.874,07	1.258.369,00	0,00	12.589.658,00	287,94
Produção de etanol hidratado	720.539,03	1.105.161,00	0,00	10.038.496,00	246,87
Produção da cana de açúcar	1.399,85	4.424,25	0,00	32.642,00	316,05
Consumo de energia elétrica	18.409.273,98	26.750.705,29	883.031,00	130.846.818,00	145,34
População estimada	7.952.400,83	9.174.997,44	505.665,00	46.649.132,00	115,38
PIB agropecuária	8.258.093,13	8.352.735,78	104.738,00	44.305.470,00	101,13
PIB indústria	31.839.051,39	51.340.987,06	553.484,00	274.492.844,00	161,25
PIB serviços	92.876.786,44	163.358.018,80	5.503.398,00	916.424.479,00	175,89
Temperatura	25,09	1,99	20,00	27,00	18,78
Precipitação	1.475,65	472,31	591,00	2.580,00	101,28
Produtividade	329,20	855,53	0,00	4.773,00	122,85

A estatística descritiva revela, em primeiro lugar, um elevado grau de heterogeneidade entre as unidades federativas brasileiras no período analisado. Isso já era esperado, dada a forte concentração regional da produção sucroenergética e as diferenças estruturais entre os estados em termos de escala econômica, densidade populacional, base agroindustrial e consumo energético.

A variável Renovabio apresentou média de 0,1111, desvio padrão de 0,3149 e coeficiente de variação de 283,45%. Como se trata de uma variável dicotômica, esse resultado decorre da própria forma de construção da dummy e não deve ser interpretado da mesma maneira que nas variáveis contínuas. Ainda assim, ele sinaliza baixa incidência relativa do valor 1 na amostra, o que é compatível com a operacionalização presente na estimação.

As variáveis de preço do etanol (anidro e hidratado) apresentam médias de 3,5890 e 3,7350, respectivamente, com coeficientes de variação relativamente baixos (25,78% e 23,76%). Isso indica menor dispersão relativa quando comparadas às demais variáveis, sugerindo maior homogeneidade espacial e temporal nos preços. Por outro lado, as variáveis de produção de etanol exibem elevada variabilidade. A produção de etanol anidro apresenta coeficiente de variação de 287,94%, enquanto a

produção de etanol hidratado apresenta 246,87%. Os valores mínimos iguais a zero indicam ausência de produção em determinados estados e/ou períodos, evidenciando forte concentração regional da atividade. A produção de cana-de-açúcar apresenta o maior coeficiente de variação (316,05%), indicando elevada dispersão entre os estados. Esse resultado reforça a existência de desigualdades significativas na base produtiva agrícola, fator central para a produção de etanol.

As variáveis de escala econômica e energética também apresentam alta heterogeneidade. O consumo de energia elétrica possui coeficiente de variação de 145,34%, enquanto a população estimada apresenta 115,38%. Esses valores refletem diferenças estruturais relevantes entre os estados, tanto em termos de dimensão econômica quanto demográfica. No que se refere às variáveis de atividade econômica, os coeficientes de variação do PIB agropecuário (101,13%), industrial (161,25%) e de serviços (175,89%) indicam forte desigualdade na estrutura produtiva regional. Em especial, o elevado grau de dispersão do PIB industrial e de serviços sugere diferenças significativas no nível de desenvolvimento econômico entre as unidades federativas.

As variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, apresentam comportamentos distintos. A temperatura mostra baixa variabilidade (CV de 18,78%), indicando relativa estabilidade entre os estados. Já a precipitação apresenta maior dispersão (CV de 101,28%), refletindo a diversidade climática do território brasileiro. Por fim, a variável produtividade apresenta coeficiente de variação de 122,85%, indicando elevada dispersão e possíveis diferenças significativas de eficiência produtiva entre os estados.

Em conjunto, a análise descritiva aponta para três características centrais da amostra. Primeiro, há forte assimetria regional, tanto nas variáveis de produção quanto nas variáveis econômicas. Segundo a presença de valores mínimos iguais a zero em variáveis produtivas reforça a existência de estados fora do núcleo histórico da cadeia sucroenergética. Terceiro, os elevados coeficientes de variação sugerem que o uso de modelos em painel com efeitos fixos é particularmente adequado, uma vez que a heterogeneidade não observada entre os estados tende a ser substantiva e persistente no tempo.

3.2 Análise dos Resultados Econométricos

Dada a curta dimensão temporal do painel (2015–2023), a estimação de modelos dinâmicos mostrou-se metodologicamente limitada, uma vez que a aplicação de primeiras diferenças e a incorporação de defasagens reduziriam substancialmente o número de observações disponíveis e comprometeriam a precisão dos estimadores. Por essa razão, optou-se pela estimação de modelos estáticos em painel, nas especificações de efeitos fixos e efeitos aleatórios.

A escolha entre ambas foi orientada pelo teste de Hausman, cuja estatística indicou preferência pelo modelo de efeitos fixos para os dois tipos de etanol, sugerindo correlação entre os efeitos não observados dos estados e as variáveis explicativas. Tal procedimento é consistente com trabalhos empíricos em painel aplicada à energia e ao meio ambiente, na qual o teste de Hausman é recorrentemente utilizado para selecionar entre efeitos fixos e aleatórios. Em particular, Busu e Nedelcu (2021) também empregam esse critério em painel para países da União Europeia, partindo explicitamente da hipótese nula favorável a efeitos aleatórios e admitindo efeitos fixos quando há correlação entre os regressores e o erro composto.

3.2. Etanol Anidro

A Tabela 02 apresenta os resultados das estimações para a produção de etanol anidro. A análise concentra-se no modelo de efeitos fixos com erros robustos, por ser a especificação mais adequada do ponto de vista econométrico. O teste de Hausman ($\chi^2 = 32$) indica a superioridade do modelo de efeitos fixos, sugerindo correlação entre as características não observadas das unidades federativas e as variáveis explicativas, o que justifica a escolha dessa especificação, em linha com estudos empíricos em energia e meio ambiente (BUSU; NEDELCU, 2021).

Tabela 02 - Resultados empíricos Etanol Anidro, 2015 a 2023

Variável	Modelo de Efeito Fixo		Modelo de Efeito Fixo Corrigido	
	Parâmetro	**P-valor**	**Parâmetro**	**P-valor**
Renovabio	0,0131	0,018*	0,0131	0,070**
Preço médio do etanol anidro	0,2683	0,012*	0,2683	0,019*
Produção de etanol anidro	-0,1207	0,001*	-0,1207	0,005*
Produção da cana de açúcar	0,1850	0,036*	0,1850	0,094**
Consumo de energia elétrica	0,3626	0,186	0,3626	0,125
População estimada	-3,1391	0,001*	-3,1391	0,006*
PIB agropecuária	0,0132	0,902	0,0132	0,910
PIB indústria	0,3888	0,009*	0,3888	0,005*
PIB serviços	0,2015	0,677	0,2015	0,071**
Temperatura	-2,8897	0,059*	-2,8897	0,039*
Precipitação	-0,0597	0,028*	-0,0597	0,054*
Produtividade	0,8221	0,087**	0,8221	0,002*
Intercepto	50,8346	0,001	50,8346	0,014
Teste de Hausmann	32			

Nota: * Significativo a um nível de 5%. ** Significativo a um nível de 10%

A variável associada ao RenovaBio apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo no modelo de efeitos fixos ($\beta = 0{,}0131$; $p < 0{,}05$), com significância marginal na versão robusta. Esse resultado indica associação positiva entre a política e a produção de etanol anidro, sugerindo que instrumentos regulatórios e de mercado podem exercer influência sobre a dinâmica produtiva do setor. Evidências internacionais apontam que políticas energéticas podem estimular a expansão de fontes renováveis, embora seus efeitos sejam frequentemente condicionados a fatores institucionais e estruturais (Zhang; Khalid; Mahmood, 2023; Trebat, 2025).

O preço médio do etanol anidro apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo em ambas as especificações ($p < 0{,}05$), indicando relação direta entre preços e produção. Esse resultado está em consonância com a literatura que identifica os preços como um dos principais determinantes da oferta de energia, ao refletirem sinais de rentabilidade e incentivos de mercado (Kurniadi; Aimon; Amar, 2021).

A variável produção de etanol hidratado apresentou coeficiente negativo e altamente significativo ($p < 0{,}01$), sugerindo relação inversa entre os dois tipos de etanol. Esse resultado pode indicar a existência de um trade-off produtivo dentro das usinas, refletindo decisões de alocação entre diferentes produtos, conforme condições tecnológicas e de mercado.

A produção de cana-de-açúcar apresentou coeficiente positivo e significância estatística, ainda que marginal na versão robusta, reforçando seu papel como principal determinante estrutural da produção de etanol. Esse achado está alinhado com estudos que destacam a importância da disponibilidade de matéria-prima para a expansão da bioenergia (Molina; Doussoulin, 2025).

O consumo de energia elétrica não apresentou significância estatística, sugerindo que a intensidade energética agregada não constitui um determinante robusto da produção de etanol anidro no período analisado.

A variável população estimada apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo, indicando associação inversa com a produção. Esse resultado sugere que estados mais populosos, em geral mais urbanizados e economicamente diversificados, não são necessariamente os principais polos de produção de etanol, o que evidencia a importância da especialização produtiva regional.

No que se refere às variáveis de atividade econômica, o PIB da indústria apresentou coeficiente positivo e altamente significativo ($p < 0{,}01$), indicando forte associação entre a produção de etanol e a estrutura industrial regional. Esse resultado reforça a evidência de que a produção de biocombustíveis depende não apenas da base agrícola, mas também de infraestrutura, capacidade de processamento e encadeamentos produtivos. Tal evidência é consistente com a literatura que associa o desenvolvimento econômico à expansão da energia renovável (Armeanu; Vintilă; Gherghina, 2017).

Por outro lado, o PIB agropecuário não apresentou significância estatística, enquanto o PIB de serviços apresentou apenas significância marginal na versão robusta.

As variáveis climáticas também se mostraram relevantes. A temperatura apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo, enquanto a precipitação apresentou coeficiente negativo com significância estatística no modelo padrão e marginal na versão robusta. Esses resultados indicam que variações climáticas estão associadas à produção de etanol, evidenciando a sensibilidade do setor a fatores ambientais.

Por fim, a variável produtividade apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo, especialmente na versão robusta, indicando associação direta com a produção de etanol. Esse resultado sugere que ganhos de eficiência produtiva desempenham papel relevante na dinâmica do setor.

Em síntese, os resultados evidenciam que a produção de etanol anidro no Brasil é influenciada por um conjunto de fatores econômicos, produtivos e climáticos. Destacam-se, em particular, o papel dos preços, da base agrícola, da estrutura industrial e da produtividade. Adicionalmente, os resultados indicam que políticas públicas como o RenovaBio podem estar associadas a mudanças na dinâmica produtiva do setor, ainda que essa associação seja condicionada por fatores estruturais, institucionais e regionais específicos. Essas evidências reforçam a necessidade de abordagens analíticas capazes de incorporar a heterogeneidade regional e setorial na avaliação de políticas de transição energética.

3.2.2 Etanol Hidratado

A Tabela 03 apresenta os resultados para a produção de etanol hidratado. Assim como no caso anterior, a análise se concentra no modelo de efeitos fixos com erros robustos.

Tabela 03 - Resultados empíricos Etano Hidratado, 2015 a 2023

Variável	Modelo de Efeito Fixo		Modelo de Efeito Fixo Corrigido	
	Parâmetro	**P-valor**	**Parâmetro**	**P-valor**
Renovabio	-0,2851	0,027*	-0,2851	0,019*
Preço médio do etanol hidratado	0,0854	0,075**	0,0854	0,664
Produção de etanol hidratado	-0,7173	0,001*	-0,7173	0,004*
Produção da cana de açúcar	-0,0570	0,079**	-0,0570	0,781
Consumo de energia elétrica	-0,4330	0,519	-0,4330	0,572
População estimada	-4,1568	0,079**	-4,1568	0,035*
PIB agropecuária	0,6483	0,012*	0,6483	0,204
PIB indústria	0,5455	0,013*	0,5455	0,120
PIB serviços	1,8811	0,011*	1,8811	0,128
Temperatura	-0,1526	0,066**	-0,1526	0,964**
Precipitação	0,0238	0,047*	0,0238	0,929**
Produtividade	2,8379	0,000*	2,8379	0,010*
Intercepto	26,7401	0,097**	26,7401	0,036*
Teste de Hausmann	17,68			

Nota: * Significativo a um nível de 5%. ** Significativo a um nível de 10%

A variável RenovaBio apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo em ambas as especificações ($\beta = -0,2851$; $p < 0,05$), indicando associação inversa com a produção de etanol hidratado. Esse resultado sugere que a implementação da política esteve relacionada a uma redução relativa na produção desse segmento no período analisado. Evidências internacionais indicam que os efeitos de políticas energéticas podem ser heterogêneos e não lineares, variando conforme o desenho institucional e as características do mercado (Zhang; Khalid; Mahmood, 2023; Trebat, 2025).

O preço médio do etanol hidratado apresentou coeficiente positivo e significância marginal no modelo padrão ($p < 0,10$), mas perdeu significância na versão robusta, indicando ausência de evidência estatística consistente sobre sua influência na produção.

A variável produção de etanol anidro (ou variável cruzada equivalente) apresentou coeficiente negativo e altamente significativo ($p < 0,01$), evidenciando relação inversa entre os dois tipos de etanol. Esse resultado reforça a existência de interação produtiva entre os segmentos, possivelmente associada à alocação interna de produção nas usinas. A produção de cana-de-açúcar apresentou coeficiente negativo com significância marginal no modelo padrão, mas não se mostrou estatisticamente significativa na versão robusta, indicando ausência de evidência robusta sobre sua influência direta na produção de etanol hidratado.

O consumo de energia elétrica não apresentou significância estatística, sugerindo que a intensidade energética agregada não constitui um determinante relevante para a produção de etanol hidratado no período analisado. A variável população estimada apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo na versão robusta ($p < 0,05$), indicando associação inversa com a produção. Esse resultado sugere menor produção relativa em estados mais populosos.

No que se refere às variáveis de atividade econômica, o PIB agropecuário, o PIB da indústria e o PIB de serviços apresentaram coeficientes positivos e estatisticamente significativos no modelo padrão, embora tenham perdido significância na versão robusta. Esse resultado indica que a associação entre atividade econômica e produção de etanol hidratado não é robusta a diferentes especificações.

As variáveis climáticas apresentaram resultados distintos. A temperatura apresentou coeficiente negativo com significância marginal no modelo padrão, mas não significativo na versão robusta. Já a precipitação apresentou coeficiente positivo e significativo no modelo padrão, perdendo significância após correção robusta. Por fim, a variável produtividade apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo em ambas as especificações ($p < 0,01$), indicando associação direta com a produção de etanol hidratado.

Em conjunto, os resultados indicam que a produção de etanol hidratado apresenta maior sensibilidade a variáveis institucionais e produtivas específicas, com destaque para o efeito da política pública, a interação com o etanol anidro e os ganhos de produtividade. Por outro lado, variáveis de mercado, estruturais e climáticas mostraram menor robustez estatística, evidenciando a complexidade dos determinantes desse segmento.

3.3 Discussão dos resultados

A análise conjunta dos resultados para etanol anidro e hidratado evidencia diferenças estruturais relevantes na forma como cada segmento responde aos determinantes econômicos, produtivos e institucionais. Esses achados reforçam a hipótese central do estudo de que os efeitos das políticas de biocombustíveis não são homogêneos, sendo mediados por características específicas dos mercados e das estruturas produtivas regionais.

Um primeiro aspecto distintivo refere-se ao efeito do RenovaBio. Enquanto a política apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo para o etanol anidro, observou-se um efeito negativo e significativo para o etanol hidratado. Essa divergência sugere que a política pode ter incentivado de forma diferenciada os segmentos do setor, possivelmente favorecendo o etanol anidro, cuja demanda está vinculada à mistura obrigatória com a gasolina, em detrimento do etanol hidratado, que opera em um ambiente mais competitivo e sensível a condições de mercado. Esse resultado é

consistente com os trabalhos internacionais, que aponta que políticas energéticas frequentemente geram efeitos assimétricos entre diferentes fontes e mercados (Zhang; Khalid; Mahmood, 2023; Trebat, 2025).

A assimetria observada entre o etanol anidro e o etanol hidratado reforça a necessidade de interpretar o RenovaBio como uma política com efeitos distributivos e estruturais, e não apenas ambientais. Enquanto o etanol anidro está associado a uma demanda regulada, vinculada à mistura obrigatória com a gasolina, o etanol hidratado depende mais diretamente das condições de mercado e da concorrência no consumo final. Essa diferença sugere que políticas de descarbonização podem favorecer segmentos mais integrados a marcos regulatórios estáveis e a cadeias produtivas consolidadas. Sob uma perspectiva pós-keynesiana, tal resultado indica que a política pública atua sobre estruturas produtivas previamente desiguais, podendo reforçar trajetórias já estabelecidas caso não seja acompanhada de instrumentos complementares de financiamento, coordenação e desenvolvimento regional.

No que se refere às variáveis de mercado, observa-se que o preço exerce influência mais consistente sobre o etanol anidro do que sobre o hidratado. Enquanto o preço do etanol anidro apresentou coeficiente positivo e robusto, o preço do etanol hidratado mostrou baixa significância estatística. Esse resultado sugere que a produção de etanol anidro responde mais diretamente a sinais de rentabilidade, ao passo que o etanol hidratado apresenta maior rigidez ou depende de outros fatores não capturados no modelo. Evidências semelhantes são encontradas na literatura, que indica que preços nem sempre constituem o principal determinante da produção de bioenergia, especialmente no curto prazo (Kurniadi; Aimon; Amar, 2021).

Outro ponto central diz respeito à interação entre os dois produtos. Em ambos os modelos, observa-se uma relação negativa e estatisticamente significativa entre a produção de etanol anidro e hidratado, indicando a existência de um trade-off produtivo. Esse resultado sugere que as usinas ajustam a alocação de produção entre os dois tipos de etanol em função de condições técnicas e econômicas, reforçando a interdependência entre os segmentos.

No âmbito dos fatores estruturais, a produção de cana-de-açúcar mostrou-se mais relevante para o etanol anidro, apresentando coeficiente positivo e estatisticamente significativo, enquanto sua influência sobre o etanol hidratado não se mostrou robusta. Esse resultado indica que o etanol anidro está mais diretamente condicionado à base agrícola, enquanto o hidratado pode depender de fatores adicionais, como decisões de mercado ou estratégias produtivas. A literatura internacional enfatiza a centralidade da matéria-prima na produção de biocombustíveis, especialmente em economias baseadas em biomassa (Molina; Doussoulin, 2025).

As variáveis de atividade econômica também apresentam padrões distintos. O PIB da indústria mostrou-se robustamente associado à produção de etanol anidro, enquanto seus efeitos sobre o etanol

hidratado foram menos consistentes. Esse resultado reforça a ideia de que o etanol anidro está mais integrado a estruturas produtivas industriais, enquanto o hidratado apresenta dinâmica mais difusa. Esse padrão é consistente com evidências que associam a expansão da energia renovável ao nível de desenvolvimento econômico e à densidade produtiva (Armeanu; Vintilă; Gherghina, 2017).

Em relação às variáveis demográficas, a população apresentou coeficiente negativo em ambos os modelos, indicando que estados mais populosos tendem a apresentar menor produção relativa de etanol. Esse resultado sugere que a produção está concentrada em regiões menos urbanizadas e mais especializadas na atividade agroindustrial, reforçando a importância da dimensão territorial e da especialização regional.

As variáveis climáticas apresentaram efeitos mais claros para o etanol anidro do que para o hidratado. Temperatura e precipitação mostraram-se estatisticamente relevantes no primeiro caso, enquanto seus efeitos foram menos robustos no segundo. Isso sugere que o etanol anidro pode ser mais sensível a condições agroclimáticas, possivelmente devido à sua maior dependência direta da produção agrícola.

Por fim, a variável produtividade apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo em ambos os modelos, indicando que ganhos de eficiência produtiva desempenham papel central na expansão da produção de etanol, independentemente do tipo. Esse resultado reforça a importância de avanços tecnológicos e melhorias nos processos produtivos como elementos-chave da transição energética.

Em síntese, os resultados comparativos evidenciam que o etanol anidro apresenta maior sensibilidade a fatores estruturais e econômicos tradicionais, como preços, base agrícola e atividade industrial, enquanto o etanol hidratado mostra maior sensibilidade a fatores institucionais e maior instabilidade na resposta às variáveis analisadas. Essas efidências reforçam a necessidade de políticas públicas diferenciadas, que considerem as especificidades de cada segmento, bem como a heterogeneidade regional do setor de biocombustíveis no Brasil.

4.Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar os determinantes da produção de etanol no Brasil e avaliar os efeitos das políticas de biocombustíveis, com ênfase no RenovaBio, a partir de uma abordagem em dados em painel para o período de 2015 a 2023. Ao estimar modelos separados para etanol anidro e hidratado, foi possível capturar a heterogeneidade estrutural do setor e identificar diferenças relevantes na resposta às variáveis econômicas, produtivas e institucionais.

Os resultados indicam que a produção de etanol no Brasil é fortemente influenciada por fatores estruturais, especialmente a base agrícola, a atividade industrial e a produtividade. No entanto,

observa-se que os efeitos das políticas públicas não são uniformes entre os segmentos. O RenovaBio apresentou associação positiva com a produção de etanol anidro e negativa com a produção de etanol hidratado, sugerindo respostas diferenciadas entre os segmentos e condicionadas às especificidades institucionais e mercadológicas de cada produto.

Essa evidência reforça que a transição energética não ocorre de forma linear ou homogênea, mas sim por meio de processos complexos, nos quais políticas públicas interagem com estruturas produtivas preexistentes. Nesse sentido, os resultados sugerem que a eficácia de instrumentos como o RenovaBio pode ser ampliada por meio de políticas complementares, voltadas à redução de assimetrias regionais, ao fortalecimento da base produtiva e à coordenação entre os diferentes elos da cadeia sucroenergética.

Sob uma perspectiva keynesiana e pós-keynesiana, os resultados sugerem que a eficácia de instrumentos como o RenovaBio depende da existência de uma estratégia pública mais ampla de coordenação produtiva, tecnológica e regional. A transição energética exige mais do que incentivos de mercado ou mecanismos de precificação ambiental; requer ação estatal capaz de reduzir incertezas, orientar expectativas, induzir investimentos e articular instrumentos regulatórios, financeiros e industriais. Nesse sentido, políticas de descarbonização devem ser combinadas a políticas industriais verdes, financiamento de longo prazo, apoio à inovação e mecanismos de redução das assimetrias regionais. Dessa forma, a expansão da bioenergia pode contribuir não apenas para a eficiência ambiental, mas também para uma trajetória de desenvolvimento territorialmente mais equilibrada, em consonância com a tradição keynesiana-estruturalista de análise do desenvolvimento econômico.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui ao fornecer evidência empírica subnacional sobre os determinantes da produção de biocombustíveis, destacando a importância da heterogeneidade regional e setorial. Metodologicamente, reforça a relevância do uso de modelos em painel com efeitos fixos para capturar diferenças estruturais persistentes entre unidades espaciais.

Como limitações, destaca-se o curto horizonte temporal da análise, que pode não capturar plenamente os efeitos de longo prazo das políticas. Além disso, a possível presença de endogeneidade entre variáveis econômicas sugere cautela na interpretação dos resultados.

Como agenda futura, recomenda-se a incorporação de modelos dinâmicos, a análise de efeitos defasados das políticas e a investigação de heterogeneidades regionais mais detalhadas. Também se destaca a importância de explorar mecanismos específicos de transmissão das políticas, especialmente no contexto de mercados interdependentes como o de etanol anidro e hidratado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n°2025/03815-2. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PRH-ANP 35/UFPB – Transição Energética, contribuindo à pesquisa, à formação de recursos humanos e ao desenvolvimento do setor energético no contexto da transformação ecológica.

REFERÊNCIAS

AJANOVIC, A. Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*, v. 36, n. 4, p. 2070–2076, 2011.

ALEXANDRA, C. Anticipating ecological transformation in the Coorong, Australia: Capacities and knowledge for upstream engagement. *Environmental Science and Policy*, Amsterdam, v. 171, p. 104147, 2025.

AL-ZUHAIR, S. Production of biodiesel: possibilities and challenges. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 1, n. 1, p. 57–66, 2007.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024*. Rio de Janeiro: ANP, 2024.

ARMEANU, D. Ș.; VINTILĂ, G.; GHERGHINA, Ș. C. Does renewable energy drive sustainable economic growth? *Energies*, v. 10, n. 3, 2017.

BOTHA, I. et al. Investigating the drivers of renewable energy production. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 2022.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

BUSU, M. The role of renewables in a low-carbon society: evidence from a multivariate panel data analysis at the EU level. *Sustainability*, v. 11, n. 5260, 2019.

BUSU, M.; NEDELCU, A. C. Analyzing the renewable energy and CO_2 emission levels nexus at an EU level: a panel data regression approach. *Processes*, v. 9, n. 1, 2021.

CARVALHO, Fernando J. Cardim de. *Mr. Keynes and the Post Keynesians: principles of macroeconomics for a monetary production economy*. Aldershot: Edward Elgar, 1992.

COELHO JUNIOR, L. M. et al. Avaliação do uso do solo e dos recursos florestais no semiárido do estado da Paraíba. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 72–88, jan./mar. 2020.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

GREENE, W. H. *Econometric Analysis*. 8. ed. Pearson Education Limited, 2020.

FURTADO, Celso. *Formação econômica do Brasil*. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1959.

FURTADO, Celso. *Desenvolvimento e subdesenvolvimento*. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961.

HERDIYANTI, H.; SUYANTO, B.; MAS'UDAH, S. Social capital and ecological transformation in post-mining land restoration in Indonesia. *Ambio*, Dordrecht, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13280-025-02223-8. Acesso em: 28 out. 2025.

HOU, J.; ZHANG, M.; LI, Y. Can digital economy truly improve agricultural ecological transformation? *Humanities & Social Sciences Communications*, London, v. 11, n. 153, 2024.

JIANG, S. et al. Ecological transformation is the key to improve ecosystem health for resource-exhausted cities. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 921, p. 171147, 2024.

KALDOR, Nicholas. Causes of the slow rate of economic growth of the United Kingdom. Cambridge: *Cambridge University Press*, 1966.
KALDOR, Nicholas. The case for regional policies. *Scottish Journal of Political Economy*, v. 17, n. 3, p. 337-348, 1970.
KALECKI, Michal. Theory of economic dynamics: an essay on cyclical and long-run changes in capitalist economy. London: *George Allen & Unwin*, 1954.
KEYNES, John Maynard. *The general theory of employment, interest and money*. London: Macmillan, 1936.
KURNIADI, A. P.; AIMON, H.; AMAR, S. Determinants of biofuels production and consumption. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 11, n. 5, 2021.
LASSWELL, H. D. *The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis*. College Park: University of Maryland Press, 1956.
LIU, W.; SHEN, Y.; RAZZAQ, A. Renewable energy investment and transition: Evidence from G7 countries. *Renewable Energy*, v. 206, p. 1188–1197, 2023.
LIU, Y. Energy production and regional economic growth in China. *Energies*, v. 6, 2013.
LIU, Wei; SHEN, Yujie; RAZZAQ, Abdul. Renewable energy investment and transition: Evidence from G7 countries. *Renewable Energy*, v. 206, p. 1188–1197, 2023.
LOWI, T. J. American business, public policy, case-studies, and political theory. *World Politics*, v. 16, n. 4, p. 677–715, 1964.
MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, v. 6, n. 7, e1000097, 2009.
MYRDAL, Gunnar. *Economic theory and under-developed regions*. London: Duckworth, 1957.
MOLINA, S.; DOUSSOULIN, J. P. Circular bioeconomy and biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 2025.
NUNES, A. M. M. et al. Public policies for renewable energy. *Energies*, v. 16, n. 485, p. 1–28, 2023.
OLIVEIRA, K. C.; ZANIN, V. A bioeconomia e os biocombustíveis no cenário brasileiro. *Revista iPecege*, v. 1, n. 2, p. 23–43, 2015.
PENNA, K. E. D. V. N. Testes HEGY de raízes unitárias sazonais. 2009. Dissertação (Mestrado em Estatística) – USP, São Paulo, 2009.
PETTICREW, M.; ROBERTS, H. *Systematic Reviews in the Social Sciences*. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.
SILVA, W. K. M. et al. Effects of climate change on sugarcane production. *Climatic Change*, v. 154, n. 1–2, p. 195–209, 2019.
TREBAT, T. J. Biofuels and the global energy transition. *Journal of Economic Issues*, v. 59, n. 2, 2025.
VIDAL, M. de F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. *Caderno Setorial ETENE*, v. 4, n. 79, maio 2019.
YAN, J. Climate governance and industrial ecological transformation. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2024.
ZHANG, J.; KHALID, S.; MAHMOOD, H. Environmental policies in OECD countries. *Energy & Environment*, v. 35, n. 8, 2023.
ZOU, Y.; WANG, M. Environmental regulation and energy transition performance. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 104, p. 107335, 2024.