



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Sociais Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Economia

Ensaio sobre Bioeconomia no Brasil

JULIANE DO CARMO DUARTE MAGALHÃES

João Pessoa - PB
2025

Ensaaios sobre Bioeconomia no Brasil

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Economia da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, em cumprimento às exigências do
Curso de Doutorado em Economia.

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Sociais Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Economia

Orientador: Wallace Patrick Farias

João Pessoa - PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M161e Magalhães, Juliane do Carmo Duarte.
 Ensaaios sobre Bioeconomia no Brasil / Juliane do
Carmo Duarte Magalhães. - João Pessoa, 2025.
 76 f. : il.

 Orientação: Wallace Patrick Farias.
 Tese (Doutorado) - UFPB/CCSA.

 1. Bioeconomia. 2. Emprego verde. 3.
Biocombustíveis. 4. Agroindústria. I. Farias, Wallace
Patrick. II. Título.

UFPB/BC

CDU 332(81)(043)



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Sociais Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Economia

Campus Universitário I – Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa – Paraíba
Tel: (83) 3216-7482 – <https://sigaa.ufpb.br/sigaa/public/programa/portal.jsf?id=1875> – E-mail: ppge.ccsa@gmail.com

Ata da reunião da Banca Examinadora designada para avaliar o trabalho de tese da doutoranda **Juliane do Carmo Duarte Magalhães**, submetida para obtenção do grau de doutora em Economia, área de concentração em **Economia Aplicada**.

Aos vinte e sete dias, do mês de junho, do ano dois mil e vinte e cinco, às quatorze horas, no Programa de Pós-Graduação em Economia, do Centro de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Federal da Paraíba, reuniram-se, em cerimônia pública, os membros da Banca Examinadora, constituída pelos professores doutores **Wallace Patrick Santos de Farias de Souza** (Orientador), da Universidade Federal da Paraíba; **Jevuks Matheus de Araújo** (Examinador Interno), da Universidade Federal da Paraíba; **Hilton Martins de Brito Ramalho** (Examinador Interno), da Universidade Federal da Paraíba; **Salomão Franco Neves** (Examinador Externo), da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, **Luís Abel da Silva Filho** (Examinador Externo), da Universidade Regional do Cariri - URCA, a fim de examinarem a candidata ao grau de doutora em **Economia**, área de concentração em **Economia Aplicada**, **Juliane do Carmo Duarte Magalhães**. Além dos examinadores e da examinanda, compareceram também, representantes do Corpo Docente e do Corpo discente. Iniciando a sessão, o professor **Wallace Patrick Santos de Farias de Souza**, na qualidade de presidente da Banca Examinadora, comunicou aos presentes a finalidade da reunião e os procedimentos de encaminhamento desta. A seguir, concedeu a palavra à candidata, para que fizesse oralmente a exposição do trabalho, apresentado sob o título: **“Ensaio sobre Bioeconomia no Brasil”**. Concluída a exposição, o senhor presidente solicitou que fosse feita a arguição por cada um dos examinadores. A seguir foi concedida a palavra à candidata, para que respondesse e esclarecesse as questões levantadas. Terminadas as arguições, a Banca Examinadora passou a proceder à avaliação e ao julgamento da candidata. Em seguida, o senhor presidente comunicou aos presentes que a Banca Examinadora, por unanimidade, **aprovou** a tese apresentada e defendida com o conceito **APROVADO**, concedendo assim, o grau de **Doutora em Economia**, área de concentração em **Economia Aplicada**, a doutoranda **Juliane do Carmo Duarte Magalhães**. E, para constar, eu, Ivone Dias da Silva, secretária *ad hoc* do Programa de Pós-Graduação em Economia, lavrei a presente ata, que assino junto com os membros da Banca Examinadora. João Pessoa, 27 de junho de 2025.

Prof. Dr. Wallace Patrick Santos de Farias de Souza
Orientador – UFPB

Prof. Dr. Jevuks Matheus de Araújo
Examinador Interno – UFPB



Documento assinado digitalmente
JEVUKS MATHEUS DE ARAUJO
Data: 15/07/2025 09:07:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente
WALLACE PATRICK SANTOS DE FARIAS SOUZA
Data: 01/07/2025 20:17:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Hilton Martins de Brito Ramalho
Examinador Interno – UFPB



Documento assinado digitalmente
HILTON MARTINS DE BRITO RAMALHO
Data: 02/07/2025 09:21:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luís Abel da Silva Filho
Examinador Externo – URCA



Documento assinado digitalmente
LUIS ABEL DA SILVA FILHO
Data: 02/07/2025 07:46:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Salomão Franco Neves
Examinador Externo – UFAM



Documento assinado digitalmente
SALOMAO FRANCO NEVES
Data: 16/07/2025 13:27:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ivone Dias da Silva
Secretária Ad Hoc – PPGE/ UFPB



Documento assinado digitalmente
IVONE DIAS DA SILVA
Data: 17/07/2025 15:04:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Resumo

A bioeconomia é o setor que apresenta um considerável potencial de inovação devido ao seu uso nas mais diversas áreas da ciência: biologia, agronomia, ecologia, alimentar e social, além de biotecnologias. O setor abrange também as mais diversas possibilidades industriais e tecnológicas: nanotecnologia, biotecnologia comunicação e informação e engenharia. A bioeconomia, está focada no valor gerado por atividades de negócios oriundas do uso inovador e sustentável dos recursos biológicos. O campo se mostra a chave para o enfrentamento dos desafios na mudança no estilo de manutenção das necessidades humanas. A bioeconomia brasileira demanda maior engajamento jurídico, administrativo e organizacional de forma que alcance os países já em estado de consolidação de muitos de seus sistemas e assim com a transitoriedade para uma economia mais sustentável economicamente viável, mais perto da realidade. O presente trabalho visa analisar o impacto da inserção na bioeconomia nos padrões de mobilidade interna entre trabalhadores da produção de biocombustíveis e outros setores. Utilizando dados do setor de biocombustíveis presente no Censo Demográfico de 2010, propõe-se testar a hipótese de maior dinamismo do setor verde a partir de uma combinação do método Propensity Score Matching (PSM) associado ao balanceamento por entropia. Em um segundo momento, a partir dos dados da Rais e de métodos de inferência causal baseados em aprendizagem de máquina, propõe-se analisar efeitos sobre os salários decorrentes da migração setorial, bem como o impacto direto da inserção no setor de biocombustíveis.

Palavras-chave: Bioeconomia, Sustentabilidade, Emprego Verde

Abstract

Bioeconomy is a sector with considerable innovation potential due to its applications across a wide range of scientific fields: biology, agronomy, ecology, food sciences, social sciences, and biotechnology. The sector also encompasses various industrial and technological possibilities, including nanotechnology, biotechnology, communication and information technologies, and engineering. Bioeconomy focuses on the value generated by business activities stemming from the innovative and sustainable use of biological resources. This field is seen as a key element in addressing the challenges posed by the changing ways in which human needs are met. Brazilian bioeconomy requires greater legal, administrative, and organizational engagement in order to reach the level of countries that have already consolidated many of their systems, thereby facilitating the transition toward a more economically viable and sustainable economy. This study aims to analyze the impact of entry into the bioeconomy on internal mobility patterns among workers in biofuel production compared to other sectors. Using data from the 2010 Demographic Census, the study proposes to test the hypothesis of greater dynamism in the green sector through a combination of the Propensity Score Matching (PSM) method and entropy balancing. In a second stage, using RAIS data, it aims to analyze the effects on wages resulting from sectoral migration, as well as the direct impact of entry into the biofuel sector.

Key-words: Bioeconomics, Sustainability, Green Jobs

Lista de tabelas

Tabela 1 – Médias das características observáveis dos diferentes tipos de atividade e cultivos de lavouras segundo a condição de migração	37
Tabela 2 – Balanceamento por Entropia Covariadas do modelo de migração - Bioeconomia e Petróleo	40
Tabela 3 – Efeitos Marginais Médios (AME) – Modelo Logístico	42
Tabela 4 – Estimativas das equações de decisão migratória - Biocombustíveis e Petróleo	44
Tabela 5 – Estimativas das equações de decisão migratória - Biocombustíveis e lavouras	46
Tabela 6 – Estimativas das equações de decisão migratória - Comparação setores	48
Tabela 7 – Estimativas das equações de decisão migratória - Migrantes retornados e permanentes	50
Tabela 8 – Distribuição de trabalhadores nos setores de Cana e Etanol (2011–2019) . .	56
Tabela 9 – Perfil médio dos trabalhadores formais nos setores de etanol e lavoura de cana (2011–2019)	58
Tabela 10 – Comparativo entre métodos de inferência causal	64
Tabela 11 – Resumo dos Efeitos Médios do Tratamento (ATT) Estimados por Diferentes Métodos	66
Tabela 12 – Efeitos heterogêneos estimados pelo Causal Forest segundo subgrupos . . .	68

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo de usinas de etanol da cana e milho no Brasil	30
Figura 2 – Trabalhadores do setor sucroenergético	31
Figura 3 – Trabalhadores da produção de biocombustíveis por UF	35
Figura 4 – Densidade real do salário-hora para migrantes, não migrantes e retornados .	38
Figura 5 – Evolução do emprego formal nos setores de lavoura de cana e produção de etanol (2011–2019)	57
Figura 6 – Distribuição Logarítmica dos Salários dos Migrantes Cana → Etanol (2018–2019)	59

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Revisão da literatura	11
1.2	Bioeconomia: Conceitos e Definições	11
1.3	Evidências empíricas	13
1.3.1	Bioeconomia no mundo	13
1.3.2	Evidências para o Brasil	19
1.3.3	Mobilidade laboral, migração interna e escolha ocupacional no Brasil	23
2	BIOECONOMIA E MIGRAÇÃO: EVIDÊNCIAS PARA OS TRABALHADORES DO SETOR DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL	25
2.1	Introdução	25
2.2	Biocombustíveis	28
2.3	Metodologia	32
2.3.1	Balanceamento por Entropia	32
2.3.1.1	Propensity Score Matching (PSM)	33
2.3.2	Modelo Empírico	34
2.3.3	Base de Dados e Tratamento	35
2.4	Resultados	38
2.4.1	Determinantes da decisão de migrar	39
2.4.1.1	Bioeconomia e Petróleo	39
2.4.1.2	Bioeconomia e lavouras	44
2.4.1.3	Bioeconomia, alimentos e construção	47
2.4.1.4	Migração de retorno	49
2.5	Conclusão	50
3	MIGRAÇÃO SETORIAL - UMA ANÁLISE ENTRE SEGMENTOS DA AGROINDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA	52
3.1	Introdução	52
3.2	Fundamentos teóricos da migração setorial e efeitos salariais	54
3.3	Base de dados e tratamento	56
3.3.1	Base Rais identificada	56
3.4	Metodologia	59
3.4.1	Métodos Tradicionais	59
3.4.1.1	Propensity Score Matching (PSM)	59
3.4.1.2	Balanceamento por entropia	60

3.4.2	Métodos Baseados em Aprendizado de Máquina	61
3.4.2.1	Double Machine Learning (DML)	61
3.4.2.2	Causal Forest (CF)	62
3.4.2.3	Targeted Maximum Likelihood Estimation (TMLE)	63
3.4.3	Síntese Comparativa dos Métodos	63
3.4.4	Estratégia empírica	65
3.5	Resultados	66
3.5.1	Considerações Finais	68

REFERÊNCIAS	70
------------------------------	-----------

1 Introdução

A transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia sustentável é cada vez mais necessária devido aos desafios do século XXI. Embora a economia atual, centrada em recursos não renováveis, como o petróleo, proporcione um estilo de vida mais abundante, a escassez desses recursos e as preocupações ambientais estão impulsionando a busca por alternativas sustentáveis. Nesse contexto, a união de setores voltados para o uso de recursos biológicos apresenta-se como uma solução viável e atrativa. Com isso, o termo bioeconomia torna-se central, e ganha força desde o início do século XXI, com a realização de conferências e a formulação de políticas voltadas para o setor (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

O setor bioeconômico tem se mostrado uma oportunidade promissora para o Brasil, considerando as vantagens comparativas do país no desenvolvimento dessa área. A partir de recursos biológicos renováveis e resíduos de processos extrativos ou de transformação, são produzidos alimentos, energia, artigos químicos e têxteis, entre outros, que possuem valor econômico e ambiental (SILVA; PEREIRA; MARTINS, 2018).

Diversos estudos têm investigado o potencial econômico da bioeconomia, especialmente em termos de geração de renda e criação de empregos. Na Europa, por exemplo, a bioeconomia tem mostrado efeitos positivos tanto no emprego quanto no valor agregado, embora esses impactos possam variar dependendo do tipo de bioenergia produzida (STEININGER; WOJAN, 2011). A avaliação do tamanho do setor bioeconômico pode ser realizada através da quantidade de biomassa utilizada como insumo ou pela análise da produção industrial e sua integração na economia (VANDERMEULEN et al., 2011). Além disso, estudos de caso têm sido conduzidos para avaliar o impacto socioeconômico dos investimentos na bioeconomia, utilizando modelos que analisam os fluxos de bens e serviços e seus efeitos nas regiões (LEHTONEN; OKKONEN, 2016).

No centro das discussões sobre bioeconomia, encontra-se o tema da produção de energia renovável, especialmente no que diz respeito aos biocombustíveis. O interesse na produção comercial de biocombustíveis para transporte aumentou significativamente na década de 1970, em resposta à crise no mercado do petróleo. Isso levou ao desenvolvimento de programas e iniciativas que visavam reduzir a dependência de combustíveis fósseis aumentando a diversidade energética, fortalecer a segurança no fornecimento de energia, reduzir emissões de gases do efeito estufa e promover inclusão social dos agricultores. No Brasil, programas como o Pró-Álcool e o Pró-Óleo estimularam a produção de alternativas à gasolina e ao diesel. Em 2003, o governo federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), para introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira e promover a inclusão social dos agricultores familiares, abordando preocupações ambientais, políticas, econômicas e sociais (MADUREIRA; GUERRA,

2014).

O PNPB foi lançado com o objetivo de inserir empresas de diferentes setores industriais na produção de biodiesel. O programa visava promover a diversificação da matriz energética e incentivar a agricultura no país. Foi criado um grupo interministerial para estudar a viabilidade do biodiesel como fonte de energia alternativa. O relatório desse grupo indicou a possibilidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa com o uso do biodiesel. A partir de 2004, foram estabelecidas bases regulatórias para o biodiesel, incluindo a definição da porcentagem mínima de biodiesel na mistura com o diesel. O programa também contemplou a certificação social do combustível e a oferta de incentivos fiscais. A introdução oficial do biodiesel na matriz energética brasileira ocorreu em 2005, com a promulgação da Lei 11.097. O PNPB tinha como meta incentivar a produção de biodiesel a partir de diferentes tipos de triglicerídeos e promover a inclusão social de produtores rurais (RODRIGUES, 2021).

Mais recentemente, em 2016, surge a RenovaBio como resultado do compromisso do Brasil em relação ao Acordo de Paris, visando aumentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Para alcançar essas metas, são estabelecidas certificações de produção de biocombustíveis e metas obrigatórias para distribuidores de combustíveis. O RenovaBio busca incentivar a produção eficiente de biocombustíveis e valorizar as externalidades ambientais positivas, sem sobrecarregar as finanças públicas com subsídios (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022).

A bioeconomia oferece possibilidades de desenvolvimento sustentável para economias que foram moldadas pela dependência de recursos fósseis e minerais. A transição para uma economia baseada em recursos renováveis tem se tornado uma necessidade cada vez mais urgente. Embora existam desafios a serem enfrentados, muitos países já estão mostrando potencialidades na adoção de uma economia de base sustentável (DIETZ et al., 2018).

Para além das discussões focadas nos campos da biotecnologia, biomedicina, produtos farmacêuticos e genética, assim como o trabalho sobre a economização da vida agregada com ênfase nas práticas tecnocientíficas, como estatísticas e controle de, é de suma importância a discussão sobre as mudanças na mobilidade decorrentes da inserção da bioeconomia no meio econômico dos indivíduos. O foco em mobilidade e migração permite questionar quais formas de acumulação da vitalidade persistem e quais sofreram mudanças. Em paralelo, há grande foco no crescimento verde, na eficiência dos recursos e na concorrência para apoiar e estimular o crescimento econômico e a criação de emprego nas zonas rurais, permitindo que os produtores primários e as zonas rurais se beneficiem dessas oportunidades. (ANDERSSON, 2022; ANDERSSON; GRUNDEL, 2021).

1.1 Revisão da literatura

A bioeconomia é um setor que apresenta um considerável potencial de inovação devido à sua aplicação em diversas áreas da ciência, como biologia, agronomia, ecologia, alimentar e social, além de biotecnologias. O setor abrange também uma gama de possibilidades industriais e tecnológicas, incluindo nanotecnologia, biotecnologia, comunicação e informação e engenharia (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

1.2 Bioeconomia: Conceitos e Definições

O conceito de bioeconomia surgiu das ciências da vida e esferas da biotecnologia, com base nas oportunidades de uma economia sustentável, utilizando elementos ecológicos. Basicamente, a biotecnologia pode ser entendida como a ciência de usar seres vivos para produzir bens e serviços. A bioeconomia, por sua vez, está mais focada no valor gerado por atividades de negócios oriundas do uso inovador e sustentável dos recursos biológicos (SILVA; PEREIRA; MARTINS, 2018; MCCORMICK; KAUTTO, 2013). Uma definição clara é fornecida pela Comissão Europeia e Direção-Geral da Investigação e Inovação:

The bioeconomy encompasses the production of renewable biological resources and their conversion into food, feed, bio-based products and bioenergy. It includes agriculture, forestry, fisheries, food and pulp and paper production, as well as parts of chemical, biotechnological and energy industries. Its sectors have a strong innovation potential due to their use of a wide range of sciences (life sciences, agronomy, ecology, food science and social sciences), enabling and industrial technologies (biotechnology, nanotechnology, information and communication technologies (ICT), and engineering), and local and tacit knowledge (EUROPEAN COMMISSION, 2012) pag. 5.¹

Segundo a OECD (2009), a bioeconomia configura-se como um cenário onde a biotecnologia contribui para uma parcela significativa da produção econômica através dos diversos setores: agricultura, indústria e saúde. A OCDE afirma ainda que a bioeconomia envolve três elementos: o uso de conhecimentos avançados de genes e processos celulares para projetar e desenvolver novos processos e produtos; o uso de biomassa² renovável e bioprocessos eficientes para simular a produção sustentável; e a integração de conhecimentos e aplicações de biotecnologia em vários setores.

¹ A bioeconomia abrange a produção de recursos biológicos renováveis e a sua conversão em gêneros alimentícios, alimentos para animais, produtos de base biológica¹ e bioenergia. Inclui agricultura, silvicultura, pesca, produção de alimentos e celulose e papel, bem como partes das indústrias química, biotecnológica e energética. Os seus setores têm um forte potencial de inovação devido à utilização de uma vasta gama de ciências (ciências da vida, agronomia, ecologia, ciência alimentar e ciências sociais), tecnologias facilitadoras e industriais (biotecnologia, nanotecnologia, informação e comércio), tecnologias de comunicação (TIC) e engenharia) e conhecimento local e tácito.

² Matéria orgânica renovável, de origem vegetal ou animal, utilizada na produção de energia ou bioprodutos como biocombustíveis e materiais bio-baseados.

Entre as definições do termo bioeconomia está o conceito de transição industrial global para o uso de recursos renováveis para produção de benefícios econômicos, ambientais e sociais finais e intermediários (MORRISON; GOLDEN, 2015; GOLDEN et al., 2015). Esse conceito afirma que a bioeconomia é uma alternativa às atuais formas de produção não sustentáveis, baseada em recursos fósseis. Dessa forma, essa alternativa deve compreender a parte da economia que utiliza recursos renováveis para produção de bioenergia, bioprodutos e biocombustíveis (KAMM; GRUBER; KAMM, 2008; NALI; RIBEIRO; HORA, 2016; VANDERMEULEN et al., 2011).

As oportunidades de promover o crescimento sustentável em todos os setores econômicos utilizando uma base biológica alternativa são consenso na literatura de bioeconomia. No entanto, uma transformação sustentável de base biológica não é garantida. Para além das oportunidades, estão os desafios do modelo emergente, com estruturas e práticas estabelecidas muito antes do surgimento do paradigma biológico e biosustentável. Esse sistema possui uma estrutura que forma o sistema econômico de uma maneira que dificulta o desenvolvimento de uma economia de base biológica, embora possa trazer sustentabilidade significativa (DIETZ et al., 2018).

Segundo Pülzl, Kleinschmit e Arts (2014), embora o termo "bioeconomia" esteja cada dia mais em pauta, seu significado ainda parece mudar constantemente. De acordo com os autores, alguns críticos argumentam que o termo é apenas um *slogan* novo para ideias antigas. No entanto, métodos de busca simples vêm consolidando o termo, cuja referência progressiva é um indicador de que a bioeconomia pode ter o potencial de se tornar o novo metadiscurso³ global influente e, assim, impactar as concepções de florestas e silvicultura e a formulação de políticas.

É fácil perceber que, embora flutuante, o conceito de bioeconomia permeia novas alternativas que, embora já existentes em estado bruto, vêm sendo moldada de forma a oferecer valor tal como os processos já consolidados. A economia baseada em fontes não renováveis como o petróleo oferece um estilo de vida mais rico, e sua escassez ainda não se mostra alarmante. No entanto, novas políticas e ações vêm chamando a atenção para novidades na forma de ver o uso de recursos fósseis. Cada vez mais, surge a existência de sustentabilidade na criação de recursos para manter o estilo de vida moderno a longo prazo.

Uma das discussões mais importantes desse "novo" sistema gira em torno, principalmente, dos biocombustíveis e da bioenergia. A alternativa à exploração sujeita à futura escassez possui apoio político dominante nas metas de produção compulsória. A resposta das nações surge nas metas de redução de emissões. Desde o início deste século, a importância do bioetanol⁴ como combustível oxigenado e como biocombustível pode ser mapeada. Muitos países estão recorrendo à bioenergia para reduzir as emissões de gases nocivos, substituindo a queima de carvão por lenha. Já é possível observar e quantificar que a visão voltada à bioeconomia está se

³ Metadiscursos são relacionados a economia global, política e cultura em geral que afetam discursos sobre floresta. Arts et al. (2010), Pülzl, Kleinschmit e Arts (2014)

⁴ Um combustível obtido através da fermentação controlada e da destilação de resíduos vegetais, especialmente do bagaço da cana-de-açúcar.

espalhando. As nações vêm desenvolvendo a venda de seus produtos naturais com base em uma bioeconomia de maior valor de produção. A exemplo, podemos citar os países emergentes no sentido de potencial de biomassa⁵: Índia, Rússia, Brasil e China (PHILP, 2015).

Ante o exposto, é possível observar que a noção de bioeconomia vem ganhando importância tanto em pesquisa quanto como objeto de debates de políticas. O campo se mostra a chave para o enfrentamento dos desafios na mudança no estilo de manutenção das necessidades humanas. Apesar disso, há pouco consenso do que de fato se trata a bioeconomia e esse é um campo de pesquisa ainda pouco explorado (BUGGE; HANSEN; KLITKOU, 2016).

1.3 Evidências empíricas

1.3.1 Bioeconomia no mundo

A união de setores voltados à utilização de recursos biológicos é uma ideia presente na Europa desde o fim do século XX, ganhando força a partir do início do século XXI. Uma comissão especial europeia organizou com uma conferência sobre a bioeconomia, cujo lema era: "Transformar o conhecimento das ciências da vida em produtos novos, sustentáveis, e coeficientes e competitivos". Paralelamente, a presidência alemã apoiou a iniciativa e acolheu, em 2007, uma conferência intitulada: "A Caminho da Bioeconomia Baseada no Conhecimento", onde foi apresentado um documento que traçava os caminhos da bioeconomia na Europa para 20 anos a frente (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

A partir de um estudo que procura oferecer uma visão geral da bioeconomia europeia, McCormick e Kautto (2013) focam em termos quadro político ou agenda e como um conceito para mudar para uma economia de base biológica. O estudo aponta para a importância da bioeconomia existente para a economia e sociedade europeias, e atenta para as oportunidades para integrar melhor as atividades de diferentes setores e expandir a produção de produtos de base biológica. No entanto, apesar do potencial econômico e do pioneirismo da Europa em vários campos das biociências e tecnologias relacionadas, os EUA e alguns países da Ásia, como a China, estão investindo imensamente na bioeconomia. Com isso a Europa se mostrava atrasada em relação a esses países na implantação do mercado. Para viabilizar uma bioeconomia coerente, a comissão europeia responsável delineou algumas ações-chave: investir em pesquisa, inovação e habilidades; melhorar os mercados e a competitividade econômica da bioeconomia; e fortalecer a cooperação nos níveis internacional, nacional e regional. O estudo conclui que existe grande otimismo sobre os benefícios e oportunidades associados à crescente bioeconomia e bioenergia na Europa com riscos e compensações embutidos. A sustentabilidade é a chave para mitigar esses riscos e otimizar os ganhos com o setor na Europa e garantir a competitividade do mercado.

⁵ Fonte de energia renovável proveniente de resíduos urbanos, da madeira, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, algas, animais, processamento de alimentos e seus resíduos (GUEDES et al., 2010)

Considerando o conceito de transitoriedade de uma economia centrada em combustível fóssil para uma economia sustentável baseada em bio-insumos, [Steininger e Wojan \(2011\)](#) focam no potencial econômico de contribuição para o desenvolvimento de uma indústria de biomassa em termos de renda e emprego na Europa e Estados Unidos. O impacto econômico foi avaliado a partir das implicações do desenvolvimento da bioenergia para o valor agregado (renda) e o emprego, tanto no agregado quanto regionalmente. A direção e a magnitude do impacto são regidas por uma cadeia de efeitos micro e macroeconômicos que podem ser divididos em quatro categorias: crescimento da renda e emprego, relações intersetoriais, investimento e comparação de custos com alternativas fósseis. Em geral, a bioeconomia apresenta efeitos positivos no emprego e valor adicionado nas regiões da Europa. Em algumas regiões, no entanto, efeitos no emprego vão depender do tipo de bioenergia produzida considerando os quatro campos de comparação.

Flanders, parte norte da Bélgica, tem uma economia bastante dependente de combustíveis fósseis, ao analisar esta região, [Vandermeulen et al. \(2011\)](#) indica que tamanho do setor biológico pode ser medido a partir da quantidade de biomassa utilizada como insumo. Outra forma de mensuração é possível a partir de um olhar para a produção industrial, nesse aspecto muitas possibilidades surgem: estudar os processos de produção, determinar quão bem a conversão em base biológica é integrada na economia ou quantos produtos são produzidos numa base biológica comparando com outros produtos. A metodologia aplicada ao estudo procurou primeiramente identificar e definir o que pode ser considerado parte da economia de base biológica. Para este fim, um estudo da literatura foi produzido conjuntamente a uma revisão de estudos previamente produzidos em países vizinhos. O restante da metodologia consiste em segmentar o setor bioeconômico e entrevistar algumas empresas em cada segmento. Os dados coletados das entrevistas deram base para captar *insights* importantes para a região.

Um segundo estudo de caso, dessa vez voltado para região da Carélia do Norte na Finlândia, aplicou uma estratégia que utiliza dados coletados diretamente das empresas com investimentos na área para modelagem do impacto socioeconômico. Os impactos socioeconômicos relacionados aos investimentos empíricos coletados foram modelados com um modelo *input-output* regional modificado, essa ferramenta permite analisar os fluxos de bens e serviços e os impactos de mudanças na demanda final ([LEHTONEN; OKKONEN, 2016](#)).

Nos Estados Unidos, onde o potencial para sustentar o emprego e a população em estados fortemente dependentes da agricultura tem sido um aspecto politicamente atraente do desenvolvimento da bioenergia em nível agrícola, a determinação de efeitos reais está atrelada às relações de emigração urbano-rural, tendo em vista que muitas regiões são grandes ofertantes de capital humano, mas nem sempre apresentam o escoamento dessa força de trabalho suficientes para evitar o despovoamento. Alguns modelos, *ex ante* apresentam evidências de uma contribuição positiva da bioeconomia para o problemas do esvaziamento rural. Apesar de úteis, esses modelos podem não apresentar a robustez necessária para encontrar efeitos sobre emprego.

Com isso, testes apoiam fortemente o uso de testes estatísticos *ex post* para fomentar o debate sobre os efeitos locais do desenvolvimento da bioenergia no emprego nos EUA, ainda que com limitações (STEININGER; WOJAN, 2011).

A fim de esclarecer mais profundamente questões quantitativas da bioeconomia americana, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) produziu um relatório relacionado ao Programa *BioPreferred*⁶. Esse programa foi pensado para transformar o mercado de produtos de base biológica e criar empregos em áreas rurais a partir da do controle das compras privadas e públicas, onde os compradores devem recorrer ao programa para garantir que suas compras sejam de base biológica. Mais uma vez, o relatório examina e quantifica o efeito da indústria de produtos de base biológica dos EUA do ponto de vista da economia e do emprego. Em termos quantitativos, a indústria bioeconômica produziu para economia americana cerca de \$ 369 bilhões de dólares de valor adicionado e 4 milhões de empregos gerados em 2013, sendo 1.5 milhões de empregos somente na produção de bioprodutos diretamente. Isto é, cada emprego no setor gerou 1.64 de outros empregos em outros setores da economia (GOLDEN et al., 2015).

De fato, a economia de base biológica desempenha um papel cada vez mais importante na economia americana. Por meio de inovações em energias renováveis e o surgimento de uma nova geração de produtos de base biológica, os setores que impulsionam a economia de base biológica estão proporcionando criação de empregos e crescimento econômico. Para entender e analisar melhor as tendências no setor, Golden et al. (2018) produziu um relatório que compara os dados de 2011 e 2016.

Para efeito de comparação, o relatório supracitado apresenta dados da produção de bioprodutos. Em 1980 a produção de etanol era de apenas 175 milhões de galões, enquanto que em 2015 a produção superou os 14,7 bilhões de galões. Embora de crescimento modesto, o número de usinas de etanol em 2016 era de 199, o que gerava emprego para 270.000 americanos. O biodiesel produzido, por sua vez, apresentou um crescimento de mais de 366% entre 2010 e 2015. Em relação ao programa *BioPreferred*, houve um crescimento de mais de 60% no número de produtos certificados pelo programa entre 2014 e 2016. No geral, o número de bioprodutos no mercado americano cresceu 135% entre 2008 e 2014. Com esse crescimento do setor, o número de empregos contribuídos para a economia dos Estados Unidos pela indústria de produtos de base biológica em 2014 foi de 4,22 milhões e a contribuição de valor agregado para a economia do país foi de US\$ 393 bilhões (GOLDEN et al., 2018).

Outro país concorrente do setor bioeconômico que vem ganhando relevância no mercado é a China. Wang et al. (2018) apresentam uma visão geral da bioindústria chinesa e um apanhado de perspectivas do setor no país. A China possui vantagens no desenvolvimento da sua bioindústria

⁶ O programa *BioPreferred* cataloga um produto como um produto de base biológica se for derivado de plantas e outros materiais agrícolas, marinhos e florestais renováveis e não incluir combustíveis, alimentos ou ração animal (GOLDEN et al., 2018).

em vários campos, segundo os autores. Em 2006, o desenvolvimento dessa economia se tornou uma das maiores prioridades da economia chinesa, cujo objetivo até 2010 era de desenvolver um conjunto de produtos biotecnológicos e atingir vendas anuais expressivas, além de 10 grandes empresas voltadas para a áreas biológica. Desde 2010 a bioindústria cresceu fortemente com perspectiva de se tornar um dos pilares da economia chinesa até 2020.

Kallio et al. (2020) apresentam um panorama mais atual da bioeconomia na União Europeia e na China. Na china, a discussão está atreladaa busca pelo equilíbrio entre a desenvolvimento econômico e proteção ambiental. O objetivo de passar de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia ambientalmente mais sustentável. Além disso, o conceito de bioeconomia relaciona-se fortemente com a indústria de biotecnologia na China, de forma que em 2007, o ministério de ciência e tecnologia gerou estratégias para acelerar o desenvolvimento da indústria tecnológica. No mundo, a bioeconomia foi considerada pela primeira vez um novo modelo econômico pelo Documento da Conferência de Trabalho Econômico em 2017.

A China não possui dados estatísticos diretos disponíveis sobre o tamanho da bioeconomia. No entanto, é possível ter um vislumbre do tamanho do setor a partir de dados como a produção de valor da indústria de baixo carbono, onde é esperado um valor de 1,25 trilhões de euros até 2020. Ademais, a China é o terceiro maior produtor de biocombustível líquido. A produção de etanol é baseada principalmente em culturas alimentares como milho e trigo (KALLIO et al., 2020; KUOSMANEN et al., 2020).

Segundo Lee (2016), a colaboração e cooperação internacional é um caminho promissor desenvolver a bioeconomia. Nos países da Ásia, a biotecnologia tem um enorme potencial econômico para contribuir crescimento e transição para a bioeconomia. Os países asiáticos tem incorporado um papel importante no desenvolvimento biotecnológico, da bioindústria e biorrefinarias. Com isso busca-se uma economia verde com um futuro mais limpo. O último ponto é ainda mais preocupante tendo em vista que a Ásia compõe metade da população mundial.

Para avaliar a bioeconomia na China, Índia, Coréia, Malásia e Taiwan, Lee (2016) defende que é necessário um modelo abrangente de impacto econômico para estudar os impactos potenciais da bioeconomia e das políticas que podem incentivar o investimento, como computação geral de equilíbrio (CGE). O estudo em questão, utiliza um modelo CGE para prever o caminho de transição para uma economia até 2050. Mais especificamente utiliza-se o modelo *Global Trade Analysis Project (GTAP)*, que é um modelo CGE global. A base de dados aplicada ao modelo e é baseada nas matrizes insumo-produto de Leontief, equilibrando toda a macroeconomia. Os resultados mostram que o desenvolvimento das bioindústrias é atribuído ao crescimento econômico dos países asiáticos, sendo China, Japão e Índia os três principais países fornecedores com aumento do PIB. A Malásia é o país mais sensível ao crescimento do investimento em bioindústria segundo os dados do estudo. Ademais, o desenvolvimento da bioindústria beneficiará a economia e a transição para uma bioeconomia e adicionará 1,61 trilhão de dólares em PIB

real globalmente e adicionará 0,36 trilhão de dólares em PIB real nos seis países analisados. Em termos dos valores de saída para diferentes bioindústrias, as maiores bioeconomias estarão na Índia, China e Japão, seguidos por Coreia, Malásia e Taiwan.

A bioeconomia oferece possibilidades para economias cujas características foram moldadas pela necessidade a até abundância de recursos fósseis e minerais. Os desafios do século XXI tem levado as economias cada vez mais investirem em possibilidades mais sustentáveis. Como visto ao longo desta seção, muitos países já mostram potencialidades na transição para uma economia de base sustentável. Com a América Latina não é diferente. Ao longo da história do continente vimos uma série de ciclos econômicos muitas vezes baseados em recursos biológicos, mas atualmente com o avanço das tecnologias esses meios vem se tornando mais sustentáveis a longo prazo.

Nos últimos anos, várias iniciativas estão contribuindo para a introdução de princípios bioeconômicos baseados no conhecimento, transformando as economias de biorecursos de matérias-primas em vários países. Uma iniciativa de sucesso atribuída a Costa Rica envolve o Instituto Nacional de biodiversidade do país. A estratégia do instituto tem sido desenvolver acordos para bioprospecção, treinamento e capacitação e tem construído parcerias de sucesso que contribuíram para o desenvolvimento do bio setor no país. Na Argentina, a organização da agricultura e pecuária evoluiu a ponto de gerar *clusters* que têm promovido o desenvolvimento de capacidades técnicas e organizacionais que dependem não apenas da produtividade individual, mas também de vínculos de troca entre os diversos atores envolvidos nas atividades. Uma das mudanças significativas nas últimas décadas foi a adoção de culturas geneticamente modificadas que levaram a um impulso na produção de *commodities*. A Argentina, como o Brasil, a China ou a Índia, vem liderando pesquisas para desenvolver novas variedade de *commodities* geneticamente modificadas que sejam tolerantes à ambientes inóspitos. A bioeconomia resultante será efetivamente baseada nos resultados da pesquisa local, exemplificando assim a bioeconomia alimentada localmente (SASSON; MALPICA, 2018).

Segundo Trigo et al. (2015), as regiões da América Latina e Caribe (ALC) são particularmente bem colocadas para contribuir para bioeconomia devido ao seus recursos naturais abundantes em termos de terra, água e biodiversidade, todos os fatores de valor estratégico crescente para um mundo de base biológica. A partir de uma análise rápida dos fatores de oferta e demanda podemos inferir que em qualquer cenário futuro possível, alcançar os novos equilíbrios globais necessários, tem a região da ALC desempenhando um papel crítico. Os desafios, por sua vez, também estão atrelados às características intrínsecas da região, como fome e pobreza. Nas áreas rurais, no entanto, há uma tendência em transformar a agricultura e a produção de biomassa em componentes essenciais de qualquer estratégia de alívio da fome e da pobreza. Destarte, a bioeconomia nessa região objetiva exercer um papel crítico na contribuição para o equilíbrio global de alimentos, fibras e energia, ao mesmo tempo em que melhora a sustentabilidade ambiental. Em nível local, o setor apresenta possibilidades para um crescimento equitativo por meio de uma

melhor produção agrícola e de biomassa.

Parte do envolvimento com a temática bioeconômica, vem a elaboração de marcos de políticas para o desenvolvimento da bioeconomia, em andamento em vários países e em vários estágios de progresso na ALC. No entanto, ao contrário da União Europeia, não existe uma visão regional consensual sobre a bioeconomia, que possa servir de quadro de referência para orientar o desenvolvimento de políticas e estratégias nacionais. Com isso, um documento foi elaborado em resposta ao interesse em ter diretrizes para uma visão regional da bioeconomia na região, cuja elaboração foi ajustada no *Workshop* de Cooperação e Intercâmbio de Conhecimentos em Políticas Públicas para a Bioeconomia, realizado na sede da CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe) em Santiago, Chile. O documento possui diretrizes produzidas pela CEPAL baseadas nas contribuições de profissionais de instituições envolvidas na elaboração de marcos estratégicos para o desenvolvimento da bioeconomia na Argentina, Brasil, Costa Rica, Equador e Uruguai (RODRÍGUEZ; RODRIGUES; ECHENIQUE, 2019).

Segundo Rodríguez, Rodrigues e Echenique (2019), uma visão regional da bioeconomia na ALC poderia contemplar os seguintes fatores estruturais: a América Latina é uma região com gigantesca biodiversidade; a região possui um grande potencial de produção de biomassa; disponibilidade de grandes quantidades de biomassa residual; a bioeconomia é um espaço onde a dicotomia entre agricultura e indústria como modelos alternativos de desenvolvimento desaparece, tendo em vista que a partir desse modelo surgem novas relações entre agricultura e alimento, além de novas conexões com a indústria; a bioeconomia pode contribuir para o enfrentamento de desafios de na diversificação produtiva e mudança estrutural da dependência econômica em associados à dependência econômica dos setores produtores de *commodities* primárias (agricultura, mineração, recursos fósseis) e à instabilidade associada à volatilidade dos preços.

Dada a ideia de transitoriedade, a ALC também necessitava de uma agenda que formasse uma estrutura para a busca de uma economia sustentável a partir da bioeconomia. O documento supracitado apresenta a Agenda de Desenvolvimento 2030 para o Desenvolvimento Sustentável que traça as diretrizes para as mudanças. Em suma, o setor permite uma estratégia de crescimento baseada na dissociação das emissões, dado o papel central que tem na ação climática, em particular, como estratégia de transição para uma economia pós-fóssil e pós-recursos.

Em termos de desenvolvimento da bioeconomia global, embora a União Europeia seja uma das pioneiras no mundo em termos de aplicação da bioeconomia, no entanto, há um nicho de oportunidades em outras partes do mundo, incluindo a América e Caribe. Todavia, em relação às políticas públicas, uma das maiores diferenças entre a UE, a ALC e a CA é a estrutura e o quadro jurídico comum. Enquanto nos níveis da UE conta com uma estratégia formal de bioeconomia que agrupa muitos setores da economia, as estruturas da ALC e da CA raramente são unidas. Essa desarmonização gera um estado das políticas públicas, em termos de economia circular, biotecnologia e bioeconomia, incipiente. Outra diferença importante entre a América Latina

e na União Europeia é o nível de maturidade da governança, que pode ser entendida como o processo pelo qual as sociedades adaptam suas regras aos novos desafios. A junção desse ponto e a desarmonização, principalmente na classificação de novos bioprodutos, gera atraso na definição e execução da bioeconomia (BOTTAUSCI et al., 2022).

Existem, portanto, entraves na transição da América Latina e Central a um sistema bioeconômico. No contexto europeu, a gestão de resíduos orgânicos e a bioeconomia circular, por exemplo, são setores já consolidados, ao contrário do contexto latino. A elaboração de políticas públicas e consenso entre os países da região podem indicar um caminho promissor para garantir a transitoriedade para uma economia mais sustentável.

1.3.2 Evidências para o Brasil

Entre os países latinos, o Brasil representa o equivalente a mais de 40% da economia e é o 7º maior mercado consumidor do mundo. Em termos de recursos naturais, o país possui um litoral de 7.400 quilômetros, imensa biodiversidade, e oferece acesso privilegiado à América do Norte, Europa e Ásia. Além disso, faz fronteira com 10 países da América do Sul. O Brasil foi o 5º principal destino mundial dos fluxos de Investimento Direto Estrangeiro em 2014, recebendo mais de US\$ 62 bilhões em novos investimentos. No mercado internacional, é o maior exportador mundial de carne, café e açúcar, e o segundo maior exportador dos setores de soja e ferro. Com isso, representava o segundo maior fluxo comercial da América Latina, atingindo US\$ 454 bilhões em 2014 (CNI, 2016).

Segundo o IBGE-Pintec, em 2015, o Brasil atingiu recorde de produção agrícola com 209,5 milhões de toneladas de cereais, leguminosas e oleaginosas. Na bioeconomia, o país sediou a primeira fábrica de etanol celulósico em escala comercial do hemisfério sul (e uma das maiores do mundo), recentemente instalada no nordeste do Brasil, no estado de Alagoas. Além disso, tem capacidade para produzir 82 milhões de litros de biocombustível por ano.⁷

A fim de mensurar o impacto econômico da bioeconomia brasileira, Silva, Pereira e Martins (2018) utilizaram como base de dados uma matriz insumo-produto e o valor econômico da bioeconomia brasileira foi calculado com base no valor das vendas dos produtos originados no setor primário, que engloba a agropecuária, pesca e aquicultura e silvicultura e exploração madeireira, seguindo o conceito de McCormick e Kautto (2013). A premissa do modelo é a existência de um fluxo estável de bens e serviços e uma economia, e com isso quantificar, em uma matriz, as relações intersetoriais, intra-setoriais e intermediárias das atividades econômicas de um país ou região. Utilizando as bases de dados das matrizes insumo-produto da OCDE (2016), as

⁷ Os segmentos mais fortes do mercado brasileiro de biotecnologia são saúde humana (33% do mercado), agronegócio (31%) e biotecnologia industrial (30%), enquanto a biotecnologia ambiental representa 6% do mercado. Em nível global, o Brasil é um importante agente na agricultura e na produção de biocombustíveis, mas também almeja ser um agente global no setor de saúde. O Brasil está dando uma grande contribuição para a biotecnologia em nível internacional, principalmente graças ao progresso no sequenciamento do genoma, que é tanto médico quanto de interesse agrícola (PARISI; RONZON et al., 2016).

estimativas para as vendas atribuíveis à bioeconomia brasileira em todo o mundo totalizaram, em 2016, o valor de US\$ 326,1 bilhões. O valor das vendas atribuíveis a sua bioeconomia alcançou US\$ 285,9 bilhões, cerca de 13,8% do PIB local. O valor originado pela bioeconomia no país foi mais absorvido por: agropecuária (53%), fabricação de produtos alimentícios, bebidas e produtos do tabaco (20%) e outros setores localizados no exterior (12%).

Segundo o CNI (2020), o Brasil possui grande vantagem competitiva na produção de biocombustíveis, já desenvolvendo cadeias de valores inteiras para compostos como etanol e biodiesel. O uso de biocombustíveis e a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis como biomassa, a chamada bioenergia, exerce um papel importante na transição de um sistema econômico mais sustentável. Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), o país produz cerca de 38 bilhões de litros de biocombustíveis líquidos (etanol e biodiesel), sendo o segundo maior produtor mundial, atrás apenas dos EUA. Ademais, a porcentagem de energia gerada por biocombustíveis no setor de transporte brasileiro é de 20%, aproximadamente sete vezes maior que a média mundial. No contexto do desenvolvimento sustentável e da descarbonização da economia, o carvão vegetal oriundo de florestas plantadas também é uma importante fonte de bioenergia para a siderurgia, como tratado pela ONU no Projeto Siderurgia Sustentável.

A despeito do potencial e do uso em larga escala de biomassa, o Brasil ainda depende muito de combustíveis fósseis. Com o objetivo de mudar esse panorama no Brasil e no mundo, a 21ª Conferência das Partes (COP21) organizada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança climática (UNFCCC) estabeleceu um acordo internacional, o Acordo de Paris, como medida para limitar os efeitos do aquecimento global a um máximo de 2°C até o final do século. A meta é que cada país estabeleça objetivos individuais de mitigação de CO₂ para atingir as metas globais. A proposta brasileira prevê a redução das emissões de gases do efeito estufa em 37% e 43% até 2025 e 2030, respectivamente, em relação aos níveis de 2005.

Embora o cenário da Biotecnologia brasileira seja um setor promissor e lucrativo, o Brasil não estabeleceu uma estratégia nacional especificamente dedicada à bioeconomia conforme estabelecido pela União Europeia. No entanto, há incentivos no desenvolvimento da bioeconomia por meio de reformas legais e políticas. A lei de inovação de 2005 (ou "lei do Bem") já considerava a bioeconomia uma área estratégica. Em 2007 houve o lançamento do marco legal nacional para o desenvolvimento da biotecnologia, o Decreto Federal 6.041-2007 (Presidente do Brasil, 2007), que incluiu a criação do Comitê Nacional de Biotecnologia (CNB, Comitê Nacional de Biotecnologia). Em 2016, um novo marco legal para pesquisa e desenvolvimento (P&D) foi lançado com o objetivo de facilitar as atividades de pesquisa, tanto no setor público quanto no privado. Dentro dessa estratégia nacional, 6 setores relevantes para bioeconomia são estabelecidos como prioritários, incluindo biotecnologia e nanotecnologia, biocombustíveis, agronegócio e biodiversidade. Na mesma época mudanças nos empregos bioeconômicos foram criados pela Lei 13.123/2015, a lei da biodiversidade, e o Decreto 8.772/2016. Esse marco legal pretendia reduzir

incertezas quanto aos investimentos efetuados no país aperfeiçoando a legislação de acesso ao patrimônio genético local e estimulando o desenvolvimento de cadeias produtivas que buscam adicionar valor econômico e social à riqueza no país, de maneira sustentável (PARISI; RONZON et al., 2016; SILVA; PEREIRA; MARTINS, 2018; CNI, 2020).

Uma ação promulgada voltada para o fomento dos biocombustíveis de biocombustíveis é feita no Brasil na forma da Lei 13.576/2017 que cria a Política Nacional de Biocombustíveis, ou Programa RenovaBio. Seu objetivo final é estimular a produção de diversos tipos de biocombustíveis como etanol, biodiesel, biometano e combustível de aviação renovável. Em suma, o programa visa criar um mercado controlado de créditos de descarbonização (conhecidos como CBios), emitidos por produtores ou importadores de biocombustíveis. A inovação em tais mecanismos está no fato de que a quantidade de CBios que uma entidade pode adquirir na bolsa brasileira estará diretamente ligada à redução das emissões de GEE associadas à produção de um determinado biocombustível em relação ao seu combustível fóssil (KLEIN et al., 2019).

Em termos de regulamentação, a maioria das nações ou não concentra ou concentra-se pouco em riscos e conflitos de objetivos, é o caso do Brasil, EUA, Rússia e Argentina. Por outro lado, a China e alguns estados africanos reconhecem explicitamente a necessidade de gerenciar riscos como um desafio político crucial na formação de uma bioeconomia sustentável. Entre esses riscos estão os impactos negativos da bioeconomia sobre os recursos terrestres e hídricos, bem como sobre a segurança alimentar global. Outros efeitos negativos potencialmente associados à bioeconomia, como desigualdade e pobreza, clima ou riscos à saúde, também têm desempenhado um papel menor nas estratégias nacionais até agora (DIETZ et al., 2018).

Observa-se que a despeito das potencialidades e vantagens comparativas do Brasil em termos de sua bioeconomia, não há uma regulação consensual entre as regiões do Brasil. Apesar das ações já existentes, a execução é feita de forma desarticulada, por diferentes ministérios, inexistindo um consenso sobre o tema ou mesmo sobre o que seria a Bioeconomia (CNI, 2020). A bioeconomia brasileira demanda maior engajamento jurídico, administrativo e organizacional de forma que alcance os países já em estado de consolidação de muitos de seus sistemas e assim com a transitoriedade para uma economia mais sustentável economicamente viável mais perto da realidade.

Segundo Dietz et al. (2018), praticamente todos os países com estratégias de bioeconomia explícitas visam promover processos de transformação ao longo de pelo menos dois dos caminhos. Uma ênfase particular é frequentemente colocada no fornecimento eficiente de biomassa, tanto internamente quanto para parceiros comerciais, é o caso do Brasil. Em contraste, a maioria das nações industriais, bem como algumas economias emergentes, visam ou implementam estratégias mais diversificadas. Por exemplo, a estratégia de bioeconomia alemã concentra-se especificamente em aplicações no campo da reciclagem de fluxos de resíduos e no uso mais eficiente ou em cascata da biomassa. Por sua vez, a estratégia de bioeconomia da China baseia-se fortemente na substituição de combustíveis e materiais de base biológica.

Segundo o CNI (2013) uma política nacional de Bioeconomia possui algumas motivações, entre elas as oportunidades abertas ao Brasil por força das suas vantagens comparativas de fronteira: a) maior biodiversidade do planeta; b) os menores custos na produção de biomassa, principalmente de cana-de-açúcar; e c) a agricultura tropical avançada, calcada na aplicação da ciência e da tecnologia; em terceiro lugar, por conter muitos *tradeoffs* necessários e legítimos e, por fim, pela fragilidade da cultura de inovação nos meios empresarial e científico-acadêmico, além das incipientes parcerias com as empresas. No geral, a construção de setor consolidado de bioeconomia no Brasil, com base nas suas vantagens comparativas, será modulada pelas restrições no plano do conhecimento; pelo desafio de estabelecer um marco regulatório avançado, pró-ciência, inovação e produção; e pelas condições de entorno capazes de impulsionar uma base ainda frágil de cientistas e tecnólogos empreendedores e inovadores. Para tanto, é necessária a criação e modernização do marco regulatório, investimento em conhecimentos e fomento ao empreendedorismo e inovação.

O caráter de transitoriedade para uma bioeconomia global parte da necessidade de gerar produtos que promovam desempenho econômico duradouro e concomitantemente responsabilidade sócio-ambiental. Nessa seara, considerando um dos pontos focais dessa dinâmica, existe uma expectativa, no longo prazo, de aumento do preço de combustíveis de fonte não renovável, isto é, combustíveis fósseis (DAM et al., 2005; OLIVEIRA; ZANIN, 2015).

Segundo Oliveira e Coelho (2017), à medida as que incertezas que rodeiam o futuro dos combustíveis de bases não renováveis como o petróleo crescem, países como o Brasil vem buscando alternativas tecnicamente e economicamente viáveis em fontes de energias renováveis como etanol oriundo da cana-de-açúcar e biodiesel de fontes biológicas. A produção do etanol, por exemplo, é incentivada desde 1975 com o programa Pró-Álcool, em que o governo pretendia encorajar a produção do álcool em substituição à gasolina pura, com o objetivo de reduzir as importações de petróleo, então com um grande peso na balança comercial externa, depois da crise do petróleo em 1973. Atualmente, a política como estratégia nacional integrada para os biocombustíveis é a Renovabio, cujos instrumentos de implementação do são: as metas de descarbonização, a certificação da produção eficiente de biocombustíveis e os créditos de descarbonização (CBIOS).

Desde 2005, em meio a dificuldades, a produção e o consumo de biocombustíveis vem crescendo no país. O Brasil é um dos principais *players* no mercado do etanol junto com os EUA. Em termos quantitativos, em 2016, os EUA produziram 58% do total mundial, seguidos, enquanto o Brasil foi responsável por 27%. Em contrapartida, o Brasil importou 25% do total exportado pelos norte-americanos no mesmo ano. Nos EUA, China e Europa existe uma discussão acerca do uso alternativo de terra para produção de combustíveis e alimentos. No caso do Brasil, a produtividade da cana é bem maior, a produção ocupa apenas 2% da área agrícola do país. O etanol também correspondeu a 6,4% do total de energia consumida no Brasil em 2018. Devido às condições terrestres e climáticas vantajosas, além de boa infraestrutura e mercados, cerca de

85% da produção de etanol do país está concentrada na região centro-sul (MILANEZ; SOUZA; MANCUSO, 2017; KARP et al., 2021). Atualmente, a política como estratégia nacional integrada para os biocombustíveis é a Renovabio, cujos instrumentos de implementação são: as metas de descarbonização, a certificação da produção eficiente de biocombustíveis e os créditos de descarbonização (CBIOS).

A biomassa (bagaço da cana-de-açúcar) é destinada a cogeração de energia. A energia gerada atende à demanda das unidades produtoras e o excedente é transferido para a rede elétrica. Dessa matéria-prima surgem novas possibilidades de produção de etanol, com o então chamado Etanol de Segunda Geração (2G), cujo desenvolvimento é motivado pelo aumento da demanda global por biocombustíveis e a mitigação das emissões de carbono em até 95% através desses novos caminhos. A produção do Etanol 2G já acontece industrialmente no Brasil, mas os processos de conversão ainda estão em desenvolvimento. Espera-se que o processo possa se tornar economicamente atrativo até 2025 (KARP et al., 2021).

1.3.3 Mobilidade laboral, migração interna e escolha ocupacional no Brasil

A mobilidade laboral é um tema central nas discussões de diversas questões econômicas como desigualdade regional, escolha racional de diferencial de salários entre origem e destino. No modelo seminal de Harris e Todaro (1970), o trabalhador compara os salários esperados entre setores e regiões, ajustando sua decisão a partir da probabilidade de obter emprego formal. Adicionalmente, Lee (1966) introduz a concepção de fatores de atração e repulsão, enfatizando que a migração ocorre diante da interação entre condições de origem, destino e barreiras intermediárias. A chamada nova economia da migração do trabalho Stark e Bloom (1985) amplia esse enfoque ao considerar que a decisão de migrar não é individual, mas sim familiar, funcionando como estratégia coletiva para diversificação de riscos e maximização do bem-estar.

No Brasil, ao longo do processo de urbanização, a população rural torna-se menor e esse novo perfil urbano, metropolitano e industrial, é marcado estruturalmente pelas migrações internas que, simultaneamente, colaboraram para a constituição de uma sociedade nacionalmente integrada, mas com fortes desequilíbrios regionais e sociais. Os padrões observados nas primeiras décadas do século XX demoram a sofrer modificações, permanecendo ao longo dos anos com grandes reservatórios de força de trabalho em direção a São Paulo. A conclusão mais importante é que o novo padrão migratório que se anuncia não significa uma transição completa, pelo contrário, nele coexistem características do antigo e do novo e essa, talvez, seja a sua marca estrutural mais relevante, pois acompanha as próprias características do desenvolvimento desigual do capitalismo brasileiro (BRITO; RIGOTTI; CAMPOS, 2012).

Além das mudanças espaciais, a literatura brasileira enfatiza a relação entre migração e transformações produtivas. Brito (2009) observa que a reorganização espacial da população

responde ao avanço do progresso técnico e às formas de industrialização, em uma lógica de complementaridade entre regiões emissoras e receptoras de mão de obra. [Avelino \(2010\)](#) mostra que fatores como diferencial de renda, redes migratórias e características demográficas influenciam decisivamente os fluxos recentes, especialmente em regiões de expansão agroindustrial. Nesse sentido, a migração interna no Brasil não pode ser dissociada das oportunidades de trabalho geradas por setores em transformação, como a agroindústria e, mais recentemente, a bioeconomia.

Assim como em [Banerjee e Newman \(1993\)](#) o desenvolvimento do setor de biocombustíveis no Brasil pode ser entendido como um processo de transformação institucional em que a distribuição inicial de ativos (terra, capital humano, acesso a crédito) determina quais trabalhadores permanecem em ocupações de subsistência ou autônomas e quais conseguem transitar para ocupações assalariadas industriais. A decisão migratória dos trabalhadores rurais em direção à bioeconomia representa, portanto, não apenas uma escolha individual, mas a manifestação de trajetórias históricas de desigualdade e de organização produtiva.

Nos capítulos empíricos desta tese, essas perspectivas são exploradas por meio da comparação entre trabalhadores da lavoura e da bioeconomia, investigando em que medida os diferenciais salariais e a estrutura institucional condicionam a mobilidade setorial.

2 Bioeconomia e migração: evidências para os trabalhadores do setor de biocombustíveis no Brasil

2.1 Introdução

De acordo com [Moraes, Ringler e Cai \(2011\)](#), a produção de energia oriunda de fontes renováveis (bioenergia) representa uma oportunidade para as regiões com fragilidades econômicas. Esse cenário pode proporcionar benefícios significativos para o desenvolvimento econômico geral, a industrialização e ainda a criação de empregos voltados ao desenvolvimento sustentável, os chamados empregos verdes. Esses empregos englobam qualquer trabalho decente que contribua para manter e restaurar a qualidade do meio ambiente, seja na agricultura, indústria, serviços ou administração ([STANEF-PUICĂ et al., 2022](#)).

Em países em desenvolvimento, onde a produção de biomassa ¹ é frequentemente concentrada em áreas rurais e é comum o uso de capital humano, essa oportunidade econômica é um importante objeto de discussão e pode ser impulsionada por meio de políticas públicas específicas.

Desde o advento do Pró-Álcool em 1975, a produção de biocombustíveis tem sido impulsionada por políticas públicas e incentivos econômicos. O uso de etanol, principal biocombustível brasileiro, teve seu papel definido a longo prazo, permitindo que o setor privado investisse maciçamente no aumento da produção. Com as oscilações no mercado internacional do petróleo, mais incentivos exógenos e endógenos foram aplicados ao mercado de biocombustíveis, incluindo o desenvolvimento do motor flexível ([TÁVORA, 2011](#)).

O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) reforçou esse movimento, as tentativas de incentivo começaram ainda durante o Pró-Álcool, como forma de reduzir ainda mais o consumo de petróleo. Através do Programa Nacional de Biodiesel (PNBP), o incentivo à produção buscava favorecer o pequeno produtor e a agricultura familiar, promovendo maior inclusão social. Para favorecer o pequeno produtor, o programa estabeleceu alíquotas diferenciadas de impostos conforme a origem da matéria-prima, sendo o maior desconto para produção dos pequenos produtores do Norte e Nordeste. Grandes produtores não teriam benefícios fiscais, sendo a taxa igual ao do diesel mineral. Para se beneficiar dos incentivos fiscais no preço de venda em leilões, o produtor de biodiesel precisava possuir um Selo Social, assegurando o cumprimento dos requisitos legais ([LEITE; LEAL, 2007](#)).

¹ Fonte de energia renovável proveniente de resíduos urbanos, da madeira, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, algas, animais, processamento de alimentos e seus resíduos ([GUEDES et al., 2010](#))

Nesse contexto, o Brasil se destacou como um dos líderes na produção de biocombustíveis com o desenvolvimento de cadeias produtivas robustas para etanol e biodiesel (CNI, 2020). O uso de biocombustíveis e a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis como a biomassa, a chamada bioenergia, exercem um papel importante na transição de um sistema econômico mais sustentável. Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), o país produziu cerca de 43 bilhões de litros de biocombustíveis líquidos (etanol e biodiesel) em 2024, sendo o segundo maior produtor mundial, atrás apenas dos EUA. Ademais, a porcentagem de energia gerada por biocombustíveis no setor de transporte brasileiro é de 20%, aproximadamente sete vezes maior que a média mundial. No contexto do desenvolvimento sustentável e da descarbonização da economia, o carvão vegetal oriundo de florestas plantadas também é uma importante fonte de bioenergia para a siderurgia, como tratado pela Organização das Nações Unidas (ONU) no Projeto Siderurgia Sustentável (2016).

Em 2007, o estado de São Paulo produzia cerca de 60% de toda a cana, açúcar e bioetanol do país, seguido pelo Paraná com 8% do total. Com o advento do Pro-Álcool, o setor açucareiro do nordeste aderiu à produção de bioetanol e, em 2007, existiam 67 unidades produzindo esse combustível. No Norte, havia apenas duas usinas pequenas. A região Centro-Sul do país concentrava as maiores unidades produtoras de bioetanol do país, com 288 usinas. São Paulo, o maior produtor da região, contava com 177 usinas; destas somente cinco produziam exclusivamente açúcar. O Paraná, o segundo maior produtor, contava com 31 usinas produzindo etanol; Minas Gerais 30, incluindo uma que produzia somente açúcar; Goiás 11; Mato Grosso 19; Mato Grosso do Sul 11; Rio de Janeiro 7, Espírito Santo 6 e uma no Rio Grande do Sul (LEITE et al., 2009).

Conforme apontado por Vidal (2019), a capacidade de produção de biodiesel segue um padrão distributivo específico entre as regiões. O Centro-Oeste lidera, seguido pelo Sul, Sudeste, Nordeste e Norte. Essa organização também reflete a hierarquia de capacidade ociosa, sugerindo uma tendência de crescimento na mesma direção.

Em 2008, o setor sucroalcooleiro, principal ramo vinculado à produção de biocombustíveis, desempenhou um papel significativo na economia brasileira. Representando aproximadamente 2% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, o setor contribuiu de forma expressiva para a arrecadação de impostos, equivalendo a 6% da receita total do Imposto de Renda. Além disso, evidenciou uma alta capilaridade ao empregar um considerável contingente de trabalhadores, com o segundo maior salário médio no setor agropecuário. Entre os aspectos positivos desse cenário, destaca-se que, em 2008, os trabalhadores canavieiros desfrutavam de salários superiores aos de 70% da população economicamente ativa nos setores de agropecuária, extração vegetal e pesca. Adicionalmente, a renda familiar desses trabalhadores, situada na faixa de dois a cinco salários mínimos, superava a de 50% das famílias brasileiras.

Esses dados indicam não apenas a relevância econômica do setor sucroalcooleiro, mas também seu impacto social positivo, proporcionando salários competitivos e contribuindo para

a melhoria da condição financeira das famílias envolvidas. Esse cenário de desenvolvimento econômico pode ter importantes implicações nos padrões de migração, uma vez que a disponibilidade de empregos bem remunerados e a melhoria nas condições de vida são fortes atrativos e tendem a influenciar as decisões migratórias. A dinâmica migratória é diretamente influenciada por transformações econômicas setoriais. No caso dos biocombustíveis, esse impacto ocorre por meio da criação de empregos e do desenvolvimento regional, contribuindo para a retenção populacional..

Diversos estudos (MORAES; RINGLER; CAI, 2011; PINATE et al., 2024; KULCSÁR; BOLENDER, 2011) defendem que a produção de biocombustíveis opera indiretamente nas tendências populacionais tanto pela expansão da capacidade industrial quanto pelo fortalecimento da retenção populacional em regiões produtoras. Esse efeito decorre da criação de oportunidades econômicas e da consequente redução dos fluxos migratórios em direção a centros urbanos, promovendo um desenvolvimento territorial mais equilibrado.

Ao considerar as teorias clássicas de migração (HARRIS; TODARO, 1970; LEE, 1966; STARK; BLOOM, 1985), temos que a decisão de migrar ou permanecer depende da avaliação racional de um agente que leva em conta as características econômicas de origem e destino, bem como de dados contextuais sobre a própria situação e do grupo em que está inserido. Outra concepção refere-se à migração como um mecanismo de transferência da população de regiões agrícolas, densamente povoadas, e com uma produtividade do trabalho extremamente baixa, para os setores urbanos e industriais da economia capitalista, onde o progresso técnico intrínseco garante uma produtividade do trabalho muito mais elevada.

O migrante é, portanto, um indivíduo dotado de racionalidade econômica na decisão de migrar e, portanto, capaz de desenhar os seus caminhos pelo território de uma maneira adequada às necessidades do mercado de trabalho (PEIXOTO, 2004; BRITO, 2009).

Ao considerar as teorias de Singer (1972) sobre migrações internas, Brito (2009) destaca que o processo de migrações é historicamente determinado segundo a modalidade da industrialização. As migrações são necessárias em um contexto de industrialização, progresso técnico e aglomeração das atividades econômicas, gerando uma reorganização necessária espacialmente. Em resumo, elas são um mecanismo de redistribuição da população segundo os interesses do processo de industrialização.

Analisar as mudanças nos padrões de mobilidade é essencial para compreender como a economia e as demandas do desenvolvimento econômico se transformam diante de novas necessidades. Um exemplo relevante é o setor bioeconômico, que vem ganhando destaque ao buscar alternativas mais sustentáveis. Entender como esse setor impacta o comportamento dos agentes envolvidos e como esses agentes, por sua vez, influenciam o setor, é fundamental para orientar políticas públicas e investimentos que promovam um crescimento econômico sustentável e inclusivo.

A migração é um tema amplamente discutido na literatura econômica (AVELINO, 2010; BAENINGER, 2012; BORJAS; BRATSBERG, 1994; CHISWICK, 1999; CONSTANT; MASSEY, 2002; DUSTMANN; FADLON; WEISS, 2011; BIAVASCHI, 2016), mas sua relação com a bioeconomia ainda é pouco explorada. No entanto, embora se fale frequentemente no potencial de geração de empregos desse setor, há uma escassez significativa de evidências empíricas que comprovem relações de causa e efeito entre mobilidade e bioeconomia.

Essa lacuna na literatura evidencia a necessidade de pesquisas mais aprofundadas, capazes de elucidar de que maneira a bioeconomia influencia os fluxos migratórios. Diante disso, o objetivo central deste estudo é analisar os padrões de migração dos trabalhadores vinculados ao setor bioeconômico, com ênfase específica no segmento de produção de biocombustíveis. A escolha desse segmento justifica-se por seu papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono, bem como por seu potencial de geração de empregos e de transformação socioeconômica em regiões tradicionalmente dependentes de atividades agrícolas.

Para atingir esse objetivo, foram utilizados dados do Censo Demográfico de 2010, que permitem a identificação de trabalhadores do setor de produção de biocombustíveis por meio da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE). Adotou-se a técnica de balanceamento por entropia, que permite comparar, de forma robusta, trabalhadores do setor de biocombustíveis com aqueles de outros setores industriais e de lavouras tradicionais, visando identificar padrões de migração e possíveis deslocamentos de mão de obra. A inclusão de lavouras tradicionais como a cana-de-açúcar na análise é particularmente relevante, uma vez que possibilita investigar se há diferenças significativas entre os subsetores do ramo sucroenergético, isto é, se há diferenças entre os padrões encontrados nas usinas e no campo.

Além disso, a utilização do balanceamento por entropia permite controlar variáveis de confundimento e estabelecer comparações mais precisas entre grupos, contribuindo para a identificação de relações causais entre a expansão do setor de biocombustíveis e os padrões de mobilidade laboral. Essa abordagem metodológica é particularmente adequada para estudos que buscam compreender fenômenos complexos, como a migração induzida por mudanças estruturais na economia.

Afora essa introdução, esta pesquisa está organizada da seguinte forma: (ii) resumo conceitual dos biocombustíveis; (iii) detalhamento do modelo empírico e uma descrição dos dados e variáveis utilizadas no estudo; (iv) resultados empíricos e discussões; (v) considerações finais.

2.2 Biocombustíveis

A bioeconomia não se limita aos biocombustíveis, embora este seja um setor crucial nesse novo panorama. A maior emissão de gases do efeito estufa é decorrente da geração de energia e

dos transportes, colocando os biocombustíveis no centro da discussão sobre sustentabilidade. Além disso, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis como biomassa, a chamada bioenergia, também desempenha papel fundamental nesse contexto.

Políticas de incentivo à produção de biocombustíveis começaram na década de 1970 com o advento do Pró-álcool, seguindo com o PNPB do biodiesel. Essas ações tiveram como impulso a necessidade de maior independência externa do petróleo. O Brasil então se tornou, ao longo dos anos, um dos principais produtores de biocombustíveis no mundo, muito devido ao seu potencial na produção de cana-de-açúcar, principal matéria-prima na produção do etanol, que, por sua vez, é o principal biocombustível produzido pelo Brasil.

Após o lançamento do Pró-álcool, em 1979, foi lançado o primeiro carro movido a álcool. Em 1985, cerca de 92% dos carros vendidos no país rodavam a álcool hidratado, cuja mistura na gasolina era de 22%. A partir de 1986, houve um arrefecimento das medidas de intervenção do álcool devido à queda nos preços do petróleo. No entanto, na década de 90, aumentou o apelo ambiental, com encontros voltados para o tema, como o protocolo de Kyoto em 1997. Com isso, a reformulação dos sistemas energéticos e a pressão para redução das emissões de carbono colocaram, novamente, em foco internacional o álcool brasileiro. Apesar de ser mandatória a mistura de álcool à gasolina em 25% desde 1993, foi a partir de 2003 que houve uma mudança importante com o lançamento dos carros *flex fuel* movidos à gasolina e a qualquer mistura. Em 2008, cerca de 92% dos carros já eram biocombustíveis. Nesse contexto positivo, a indústria sucroalcooleira começa a produzir bioeletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Em 2005, surge o programa nacional para o biodiesel, o PNPB, e desde então os quantitativos de adição mandatória sofrem várias mudanças (TÁVORA, 2011; DAYRELL et al., ; CASTILLO, 2013).

A produção total de etanol, juntamente com a produção de açúcar e eletricidade gerada a partir da biomassa vegetal, compõe o setor sucroenergético, sendo este o segundo maior setor agropecuário do Brasil. O biodiesel, por sua vez, é oriundo, principalmente, do óleo de soja. A conversão do óleo de soja em biodiesel é feita por meio de um processo químico denominado transesterificação, que resulta em dois principais produtos: o próprio biodiesel e a glicerina (CNI, 2020).

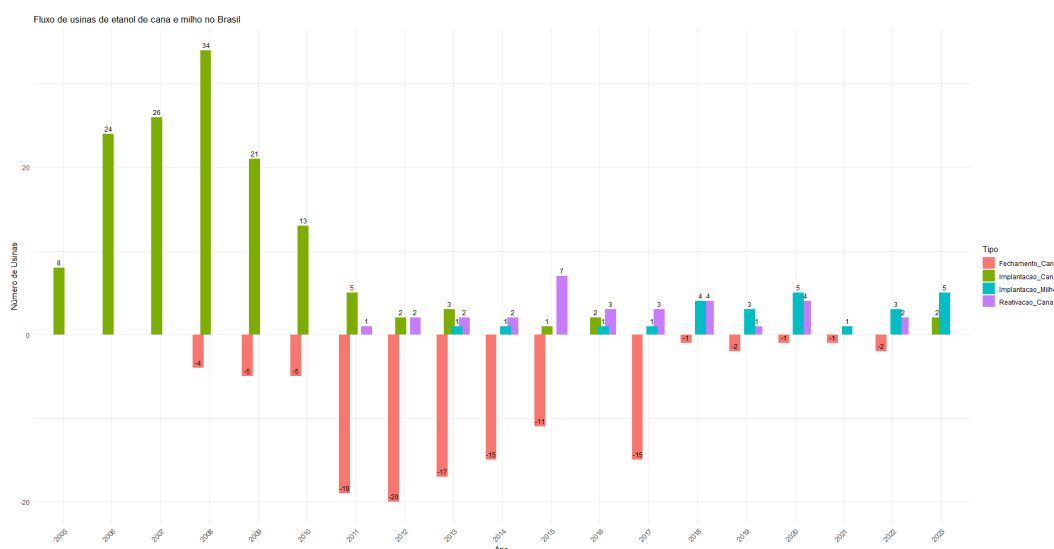
O Brasil é protagonista no assunto biocombustíveis, são mais de 35 anos de pesquisa e desenvolvimento de diversas tecnologias envolvidas na produção e no uso do etanol de cana-de-açúcar, aqui denominado biocombustível de primeira geração. Hoje, o país tem os menores custos de produção, é o maior exportador e o segundo maior produtor mundial desse biocombustível (NYKO et al., 2010).

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, houve entrada de muitas usinas de etanol entre 2005 e 2010, mas muitas usinas foram posteriormente desativadas até 2017. Apesar da reativação de algumas usinas a partir de 2011, houve uma estabilização do

fluxo de entrada e saída de usinas de etanol no país. . A entrada das usinas de etanol de milho iniciou em 2011 e adquiriu relevância a partir de 2018, em um movimento crescente desde então, tornando-se relevante para a capacidade nacional. Mais recentemente, projetos que utilizam outros cereais, como o trigo, e a soja têm se apresentado como mais uma opção para a oferta do biocombustível.

Houve também um aumento da capacidade instalada de produção de etanol no Brasil desde 2014, com um incremento de 51 mil m^3 /dia para o hidratado e 34 mil m^3 /dia para o anidro.

Figura 1 – Fluxo de usinas de etanol da cana e milho no Brasil

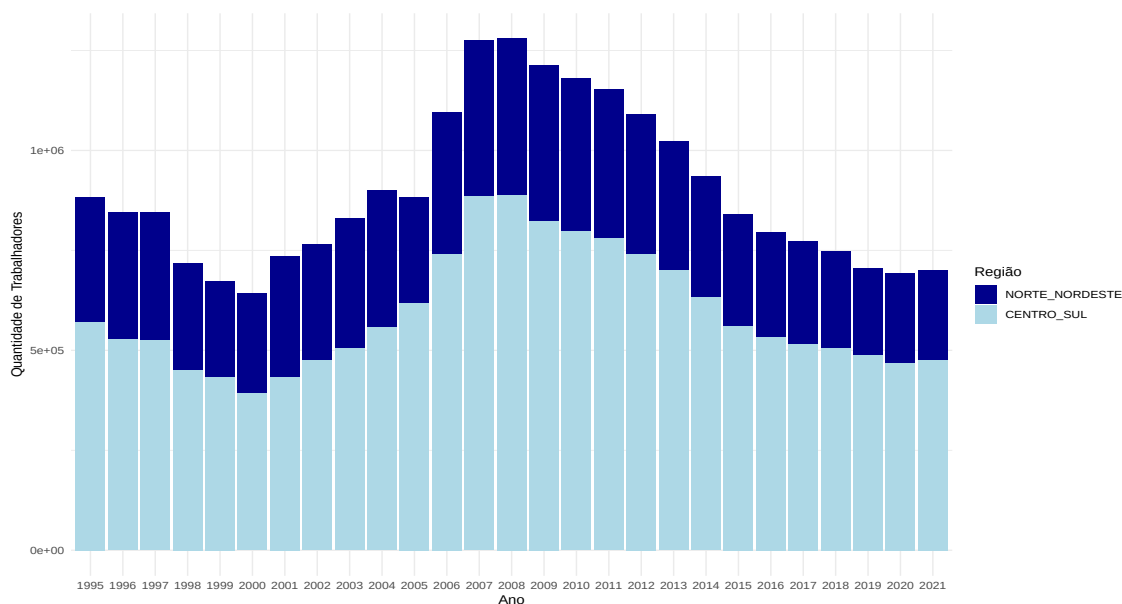


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2023)

Todo esse potencial é refletido no emprego, segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), o emprego em biocombustíveis é crescente nos Estados Unidos e no Brasil, e nos mercados asiáticos emergentes de mão de obra intensiva, onde a produção de biocombustíveis testemunhou uma grande expansão. Em 2015, Brasil possuía a maior força de trabalho, com 845.000 empregados. As perdas de empregos na indústria do etanol (devido à crescente mecanização da colheita da cana-de-açúcar) foram mais do que compensadas pelo crescimento de empregos no biodiesel, apoiado principalmente por incentivos como maiores requisitos de mistura (FERROUKHI et al., 2015).

Segundo dado da União da Indústria de cana-de-açúcar e Bioenergia (UNICA), o setor centro-sul concentra a maior quantidade de empregos do setor sucroenergético, com crescimento na primeira década dos anos 2000. As regiões norte e nordeste mostram crescimento mais tímido, mas acompanham a tendência da região dominante, conforme apresentado na figura 2.

Figura 2 – Trabalhadores do setor sucroenergético



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (Unica)

Ao longo da história, a cultura da cana-de-açúcar tem desempenhado um papel fundamental na economia brasileira. O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China e Tailândia. Essa posição privilegiada é resultado das vantagens naturais do país, como a disponibilidade de terras, um clima propício e um solo adequado, que tornam a produção de cana-de-açúcar altamente vantajosa. No contexto dos biocombustíveis, existem duas gerações distintas, cada uma delas derivada de materiais específicos. O bioetanol de primeira geração é produzido em grande escala a partir de fontes como cana-de-açúcar, beterraba açucareira e milho. Por outro lado, o bioetanol de segunda geração é obtido a partir de biomassa lignocelulósica, como resíduos agrícolas e florestais (ADITIYA et al., 2016). É importante ressaltar que o Brasil lidera a produção global de cana-de-açúcar, consolidando-se como um importante ator nesse mercado.

Em 2020 existiam 10 usinas de produção de etanol a partir de milho, localizadas principalmente nos estados do Centro-Oeste, locais com altas produções do grão. Por ter sua expansão definida sobre as terras de cultivo da soja, a produção de milho de segunda safra é caracterizada por ter um baixo impacto ambiental, sem alteração das fronteiras agrícolas, e baixos custos de produção. Para o etanol de segunda geração, existem no Brasil duas grandes usinas em operação: a Usina Costa Pinto, do grupo Raízen, e a Usina BioFlex, do grupo GranBio. Juntas, elas apresentam capacidade de produção de mais de 100 milhões de litros de etanol de segunda geração. Essas são as principais características que tornam o etanol de milho um negócio altamente atrativo no Brasil. Considerando as terras atualmente utilizadas para o cultivo de soja no país, é possível expandir a produção de milho de segunda safra em cerca de 10 milhões de hectares, o que resultaria em 57 milhões de toneladas de milho e produção de até 22 bilhões de litros de

etanol (CNI, 2020).

2.3 Metodologia

Com o objetivo de avaliar os efeitos da inserção no setor bioeconômico sobre as decisões migratórias dos trabalhadores, emprega-se o método de *Propensity Score Matching* (PSM) combinado ao balanceamento por entropia, com vistas à construção de grupos de comparação mais equilibrados quanto às covariáveis observadas.

2.3.1 Balanceamento por Entropia

A técnica de balanceamento por entropia constitui uma generalização do *Propensity Score Matching* tradicional, no qual os escores de propensão são usualmente estimados por meio de regressões logísticas ou modelos *probit*. Esses escores, contudo, podem falhar em equilibrar os momentos das covariáveis quando aplicados a pequenas amostras. Com o balanceamento por entropia, os pesos são ajustados diretamente para satisfazer restrições sobre os momentos amostrais, promovendo um equilíbrio estocástico mais preciso entre os grupos.

Suponha uma amostra binária $n = n_0 + n_1$, oriunda de uma população de tamanho $N = N_0 + N_1$, onde $n \leq N$. Os grupos n_1 e n_0 referem-se, respectivamente, às unidades tratadas e de controle. Seja X a matriz das características exógenas observadas no pré-tratamento, com x_{ij} representando a j -ésima característica do indivíduo i , de modo que $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}]$. Assumem-se dois potenciais resultados: $Y_i(1)$ e $Y_i(0)$, correspondentes aos estados de tratamento e controle. Como apenas um desses é observável para cada indivíduo, temos a realização (D_i, Y_i, X_i) .

O efeito do tratamento individual é dado por $\tau_i = Y_i(1) - Y_i(0)$. A média dos efeitos do tratamento sobre os tratados (ATT) é definida como:

$$\tau = E[Y(1) \mid D = 1] - E[Y(0) \mid D = 1] \quad (2.1)$$

Em que a primeira expectativa é diretamente observável, enquanto a segunda representa um contrafactual. A única informação disponível sobre $Y(0)$ é proveniente do grupo de controle, não submetido ao tratamento. Para aproximar essa expectativa, um grupo de controle sintético é construído por meio de reponderação, com o objetivo de representar uma imagem virtualmente equivalente ao grupo de tratamento, sem perdas amostrais.

Hainmueller (2012) propõe uma técnica de pré-processamento que permite alcançar equilíbrio covariável em estudos observacionais com tratamento binário, denominada balanceamento por entropia. Ao contrário da maioria dos métodos tradicionais, essa abordagem incorpora diretamente o balanceamento das covariáveis na função de peso aplicada às unidades amostrais.

Inicialmente, impõem-se restrições de equilíbrio, fazendo com que as distribuições das covariáveis sejam idênticas em todos os momentos especificados. Em seguida, resolve-se um problema de otimização que procura os pesos que melhor satisfaçam essas condições, minimizando a divergência (no sentido de entropia) em relação a um vetor de pesos uniformes. Essa recalibração ajusta desigualdades sistemáticas e aleatórias na composição das amostras.

A média contrafactual ponderada do grupo de controle é estimada por:

$$E[\widehat{Y(0)} \mid D = 1] = \frac{\sum_{\{i|D=0\}} Y_i w_i}{\sum_{\{i|D=0\}} w_i} \quad (2.2)$$

Os pesos w_i são obtidos pela solução do seguinte problema de minimização da entropia relativa:

$$\min_{w_i} H(w) = \sum_{\{i|D=0\}} w_i \log \left(\frac{w_i}{q_i} \right) \quad (2.3)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{\{i|D=0\}} w_i c_{ri}(X_i) = m_r \quad \text{com } r = 1, \dots, R \quad (2.4)$$

$$\sum_{\{i|D=0\}} w_i = 1 \quad (2.5)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \mid D = 0 \quad (2.6)$$

Em que $q_i = 1/n$ representa os pesos uniformes de base, e $c_{ri}(X_i) = m_r$ descreve o conjunto de R restrições impostas aos momentos das covariáveis do grupo de controle reponderado.

2.3.1.1 Propensity Score Matching (PSM)

Com o objetivo de construir artificialmente um grupo de comparação para os tratados, aplica-se o método de *Propensity Score Matching* (PSM). Esse estimador é apropriado quando a seleção ao tratamento ocorre exclusivamente com base em variáveis observáveis.

Parte-se da suposição de sobreposição, segundo a qual existem unidades de controle não tratadas com características observadas similares às unidades tratadas, para cada valor de x . Nesse contexto, [Rosenbaum e Rubin \(1983\)](#) propõe que o pareamento seja feito com base na proximidade entre os escores estimados, utilizando uma métrica de distância (por exemplo, pareamento por vizinho mais próximo dentro de caliper).

2.3.2 Modelo Empírico

Para identificar o impacto da inserção no setor bioeconômico sobre a migração dos trabalhadores, estima-se uma regressão logística ponderada, cujos pesos são derivados do balanceamento por entropia. A análise é conduzida com base em pares de comparação entre o setor bioeconômico e setores específicos, o modelo a seguir compara trabalhadores da bioeconomia e do setor de petróleo.

Os pesos de reponderação são obtidos segundo a metodologia de Hainmueller (2012), utilizando como variável de tratamento uma indicação binária de participação no setor bioeconômico ($Bioeco_i = 1$), mais especificamente de trabalhadores da produção de biocombustíveis, versus grupo de trabalhadores do setor de petróleo ($Bioeco_i = 0$). As covariáveis utilizadas para o balanceamento incluem idade, sexo, cor/raça, escolaridade, vínculo empregatício, região de residência e localização urbana ou rural. A probabilidade condicional de um trabalhador fazer parte do setor de biocombustíveis será, portanto:

$$\Pr(Bioeco_i = 1 \mid X_i) = G(X_i\beta + \mu_i) \quad (2.7)$$

Migrante_{*i*} é uma variável binária indicadora de migração permanente, definida como mudança de unidade federativa de residência com posterior permanência; $Bioeco_i$ denota a inserção no setor bioeconômico (1) ou no setor de petróleo (0); X_i representa o vetor de covariáveis de controle, incluindo idade, sexo (homem); cor/raça, escolaridade; condição de trabalho formal, informal ou empregador; região de residência e localização urbana. $G(\cdot)$ corresponde à função logística; os pesos w_i são extraídos da matriz resultante do balanceamento por entropia.

A estimação do modelo de resultado, isto é, do modelo de decisão migratória é realizada por regressão logística com família *quasi-binomial*, o que permite acomodar possíveis variações na dispersão dos dados, com erros-padrão robustos.

Após o balanceamento por entropia e a estimação do modelo logit, o efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT) é calculado como a diferença entre a média das probabilidades previstas de migração para os tratados e a média contrafactual simulada com base no grupo de controle reponderado:

$$ATT = E[Y_i(1) \mid Bioeco_i = 1] - E[Y_i(0) \mid Bioeco_i = 1] \quad (2.8)$$

$E[Y_i(1) \mid Bioeco_i = 1]$ representa a média das probabilidades previstas de migração para os indivíduos do setor bioeconômico; $E[Y_i(0) \mid Bioeco_i = 1]$ é a média contrafactual estimada com base nas observações do grupo de controle, ponderadas pelos pesos w_i obtidos via balanceamento por entropia.

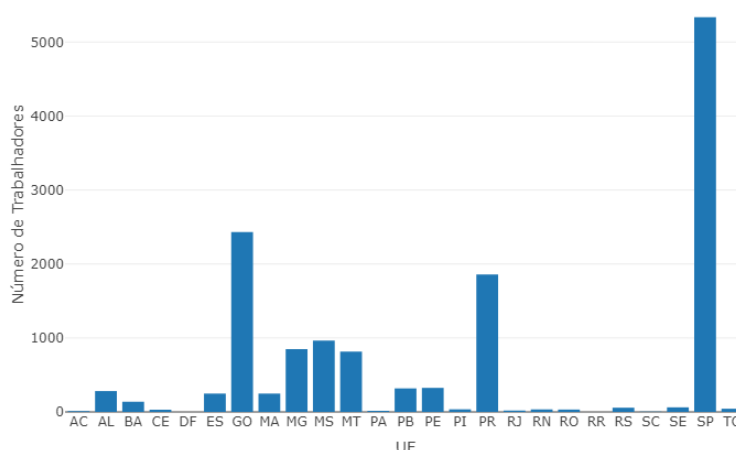
A fim de investigar heterogeneidades padrões migratórios associados à bioeconomia, este modelo será replicado para distintos grupos de controle, como os setores de lavoura (cana, soja,

algodão, café), construção civil e produtos alimentícios. Para análise de robustez, estimativas adicionais serão conduzidas utilizando pesos derivados do modelo de probabilidade inversa (IPTW) e, também, modelo sem ponderação.

2.3.3 Base de Dados e Tratamento

Com base nos dados do Censo 2010 e na classificação nacional de atividades econômicas (CNAE), que é instrumento essencial na organização dos sistemas de informação dos agentes econômicos, é possível mapear os trabalhadores envolvidos na produção de biocombustíveis. Cerca de 14 mil trabalhadores declararam fazer parte do setor no país, com o Sudeste representando a região com o maior número de trabalhadores (38,35%), seguido pelo Centro-Oeste.

Figura 3 – Trabalhadores da produção de biocombustíveis por UF



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Censo Demográfico 2010.

É possível observar no Gráfico 1 que São Paulo se sobressai em número de trabalhadores, por ser um dos centros produtivos mais importantes do país. No entanto, é possível observar também que alguns estados do Centro-Oeste, como Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul são relevantes na indústria. O estado de Goiás destaca-se como região com potencial produtivo.

Em termos de características observáveis, a Tabela 1 contém as características mais importantes de diversas lavouras com histórico de ciclos econômicos de sucesso. Além disso, compara o setor de biocombustíveis com o consolidado setor de combustíveis fósseis, destacando as diferenças entre migrantes e não migrantes.

Conforme corrobora [Távora \(2011\)](#), em 2007, o trabalhador de cana-de-açúcar recebia o segundo maior salário médio entre os trabalhadores rurais, ficando atrás somente dos trabalhadores da soja, que, em geral, tinham maior grau de educação, como é visto na Tabela 1. Em relação às indústrias de combustíveis, a indústria do petróleo ainda se mostrava sobressalente, com trabalhadores mais instruídos, salários mais altos e concentração de mão de obra no Sudeste.

O setor de biocombustíveis, por sua vez, apresenta algumas mudanças de paradigma no que diz respeito à sua mão de obra quando comparado ao setor de combustíveis fósseis. Em primeiro lugar, a região Centro-Oeste destaca-se como a segunda em concentração de trabalhadores. Em segundo lugar, apesar de o setor urbano ser prevalente — uma vez que o indivíduo declara o setor de moradia e não o de trabalho —, há uma ligeira diminuição na concentração de trabalhadores no meio urbano, indicando que o setor possui características rurais.

Utilizando dados da base da RAIS (Relação Anual de Informações Sociais) de 2006-2013, [Pinto et al. \(2016\)](#) corroboram que a maior parte dos trabalhadores da indústria de biocombustíveis são homens com baixa instrução e idade entre 18 e 39 anos.

Os migrantes mostram-se mais experientes se considerarmos a idade como uma *proxy* para avaliação. Como já foi comprovado em modelos empíricos, migrantes tendem a ter salários mais altos, o que se revela na Tabela 1 em todos os setores. No entanto, também constituem um grupo menos escolarizado nas faixas mais baixas de instrução, enquanto apresentam ligeira vantagem no grupo de pós-graduação.

Há uma grande concentração de migrantes trabalhando com cacau no Norte. No Centro-Oeste, em todas as lavouras, há um maior número de trabalhadores de outros municípios, evidenciando a forte atração do setor para o trabalho na lavoura na região, sobretudo nos setores de combustíveis, tanto fósseis quanto bioeconômicos

Os setores de combustíveis também oferecem maior benefício quanto à formalidade no trabalho, embora seja parte da idiossincrasia das lavouras um trabalho mais informal. É importante salientar que para a produção de não combustíveis, migrantes são mais propensos a obter maior índice de trabalho formal, bem como sua habitação na área urbana. A concentração em áreas urbanas de migrantes pode ser explicada pela tendência migratória urbano-rural, em que os indivíduos deixam municípios menores e predominantemente rurais por municípios com maiores opções no mercado formal.

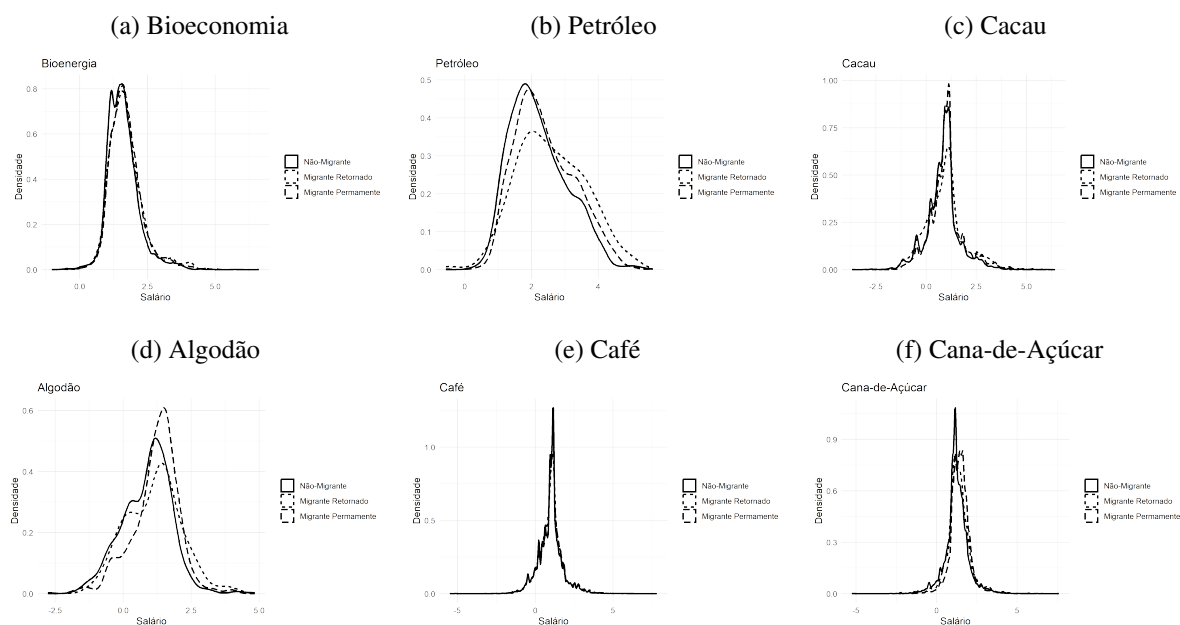
Tabela 1 – Médias das características observáveis dos diferentes tipos de atividade e cultivos de lavouras segundo a condição de migração

Variável	Cana-de-açúcar		Soja		Café		Combustível fóssil		Biocombustíveis	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Não branco (%)	63.47	64.11	16.55	27.25	49.35	57.72	50.04	45.93	54.52	58.69
Homem (%)	90.22	87.91	81.49	79.94	73.25	69.72	85.37	88.82	88.46	88.65
Idade	34	36	42	45	36	40	34	37	32	35
Horas trabalhadas	44	46	45	45	42	42	43	44	45	46
Salário-hora	4.91	5.46	8.76	11.09	3.92	4.16	14.06	16.98	6.10	7.16
Sem instrução (%)	70.31	72.21	62.70	67.05	75.47	81.04	15.85	19.86	43.02	52.48
Ensino Fundamental (%)	15.51	15.20	18.88	15.89	14.71	11.86	15.36	14.34	21.34	19.05
Ensino Médio (%)	13.13	11.66	16.16	14.21	9.09	6.40	51.27	46.00	31.40	24.49
Ensino superior (%)	0.88	0.78	2.07	2.65	0.51	0.53	16.02	17.10	4.04	3.59
Pós-graduação (%)	0.01	0.05	0.07	0.09	0.01	0.01	1.15	1.86	0.08	0.12
Sudeste (%)	38.60	57.46	2.89	4.31	86.68	75.93	46.34	49.86	48.64	43.29
Norte (%)	0.30	0.48	0.79	2.68	0.67	6.84	1.06	1.24	0.42	0.99
Nordeste (%)	45.00	17.22	3.98	2.97	7.62	6.19	33.44	23.93	15.83	6.61
Sul (%)	11.50	13.87	86.04	65.17	4.88	10.38	17.09	20.75	13.85	13.30
Centro-oeste (%)	4.58	10.95	6.26	24.83	0.14	0.64	2.05	4.20	21.24	35.78
Emprego formal (%)	73.57	88.11	15.01	30.07	21.27	24.27	95.15	94.75	95.89	96.92
Empregador (%)	0.58	0.49	1.29	3.26	0.75	0.92	0.57	0.68	0.26	0.23
Setor urbano (%)	53.85	78.47	24.81	35.74	38.68	43.45	94.49	97.65	84.90	90.18
N	17,334	16,742	9,777	7,621	51,146	32,788	1,217	1,450	5,645	8,042

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Censo Demográfico de 2010

Nota: (1) Não migrantes, (2) Migrantes permanentes

Figura 4 – Densidade real do salário-hora para migrantes, não migrantes e retornados



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Censo Demográfico de 2010.

A amostra selecionada para a análise empírica é composta de trabalhadores com idade entre 18 e 70 anos que estavam empregados no momento do recenseamento. Foram excluídos da análise os indivíduos que não declaram cor e que não responderam ao questionário referente à migração, além dos funcionários públicos, militares e indivíduos sem remuneração, essa exclusão foi feita de modo que a análise esteja voltada para decisões de migração e mercado de trabalho.

Define-se como migrante o trabalhador que declarou residir em um estado diferente do seu local de nascimento. Já o não migrante é aquele que permanece no estado onde nasceu. O migrante de retorno, por sua vez, é aquele que, na data do recenseamento, morava em seu estado de naturalidade, mas havia residido anteriormente em outro estado. Por fim, considera-se migrante não retornado aquele que, na data da entrevista, declarou viver fora de seu estado de origem.

2.4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os principais resultados referentes aos determinantes da decisão de migrar considerando diferentes grupos de controle, além de uma análise considerando migrantes retornados.

2.4.1 Determinantes da decisão de migrar

2.4.1.1 Bioeconomia e Petróleo

Após o balanceamento, a amostra de controles e tratados sofreu uma redução significativa, garantindo maior comparabilidade entre os trabalhadores dos setores analisados. A comparação entre os setores de biocombustíveis e petróleo é especialmente relevante para avaliar os efeitos da transição econômica sobre os fluxos migratórios dos trabalhadores. Essa transição, que visa a sustentabilidade, impacta diretamente padrões de mobilidade e estrutura ocupacional.

A Tabela 2 mostra os resultados da tabela de momentos, em que é avaliada a distribuição da média, variância e assimetria das covariadas dos grupos de controle e tratamento antes e depois do balanceamento por entropia. Nessa etapa, entende-se por grupo de tratamento aquele indivíduo inserido no setor bioeconômico, enquanto o grupo de controle é formado pelos indivíduos que trabalham no setor de petróleo. Antes do balanceamento há uma discrepância significativa entre os parâmetros dos dois grupos em diversas covariadas. Um exemplo disso é a covariada que indica a região de residência: no caso do Nordeste, a média para o grupo de controle (0,2664) é consideravelmente maior do que para o grupo de tratamento (0,0666), evidenciando um desbalanceamento inicial. Além disso, a variância e a assimetria revelam heterogeneidades nas distribuições entre os grupos, especialmente em variáveis como Centro-Oeste e Pós-graduação.

Após o balanceamento a média das covariadas se aproxima, indicando que o balanceamento foi eficaz em criar grupos comparáveis. Com exemplo da idade, a média é ajustada de 36 para 34 nos controles, alinhando-se aos tratados. Ajustes mais significativos ocorreram para escolaridade, emprego e região.

Os resultados da Tabela 3 apresentam três abordagens distintas: (1) um modelo de balanceamento por entropia, (2) modelo de ponderamento GLM, (3) uma estimação sem ponderamento e (4) *Inverse Probability of Treatment Weighting* (IPTW).

O modelo 1, com balanceamento por entropia, ajusta os pesos de forma que as covariáveis observáveis sejam balanceadas entre os grupos, reduzindo o viés de seleção. A variável dependente do modelo é binária, indicando se um indivíduo é migrante permanente em um estado ou não. A variável de maior interesse examina se a inserção no setor bioeconômico, especificamente na produção de biocombustíveis, influencia as decisões de mobilidade dos indivíduos, considerando também características socioeconômicas e geográficas.

Segundo os resultados da Tabela 3, o coeficiente estimado para o trabalho na bioeconomia é positivo e estatisticamente significativo. Isso implica que, mantendo as demais variáveis constantes, a razão de chances de migrar é maior para trabalhadores do setor de biocombustíveis em comparação aos do setor de petróleo. Embora a conversão direta em probabilidade dependa das características individuais, esse efeito é substancial e sugere maior propensão à migração entre os trabalhadores da bioeconomia.

Tabela 2 – Balanceamento por Entropia Covariadas do modelo de migração - Bioeconomia e Petróleo

Covariada	Controles						Tratados					
	Antes do Balanceamento			Depois do balanceamento			Antes do balanceamento			Depois do balanceamento		
	Média	Variância	Assimetria	Média	Variância	Assimetria	Média	Variância	Assimetria	Média	Variância	Assimetria
Idade	36,3396	120,2086	0,5214	34,0244	111,6545	0,6507	34,0245	111,6744	0,6499	34,0245	111,6546	0,6502
Não branco	0,4535	0,2481	0,1867	0,5707	0,2450	-0,2859	0,5707	0,2450	-0,2856	0,5707	0,2450	-0,2857
Homem	0,8861	0,1010	-2,4277	0,8879	0,0996	-2,4607	0,8878	0,0996	-2,4575	0,8878	0,0996	-2,4586
Sem instrução	0,1851	0,1510	1,6188	0,5119	0,2499	-0,0476	0,5119	0,2499	-0,0475	0,5119	0,2499	-0,0475
Fundamental	0,1554	0,1314	1,8991	0,1963	0,1578	1,5307	0,1963	0,1578	1,5287	0,1963	0,1578	1,5294
Médio	0,4812	0,2499	0,0752	0,2496	0,1873	1,1581	0,2496	0,1874	1,1566	0,2496	0,1873	1,1571
Superior	0,1614	0,1355	1,8381	0,0392	0,0376	4,7562	0,0392	0,0376	4,7505	0,0392	0,0376	4,7526
Pós-graduação	0,0089	0,0088	10,4359	0,0011	0,0011	30,7047	0,0011	0,0011	30,6132	0,0011	0,0011	30,6268
Emprego formal	0,9545	0,0435	-4,3529	0,9725	0,0267	-5,7877	0,9725	0,0267	-5,7813	0,9725	0,0267	-5,7839
Autônomo	0,0198	0,0194	6,8833	0,0048	0,0048	14,3556	0,0048	0,0048	14,3503	0,0048	0,0048	14,3567
Empregador	0,0040	0,0039	15,7722	0,0021	0,0021	21,6431	0,0021	0,0021	21,6122	0,0021	0,0021	21,6218
Urbano	0,9802	0,0194	-6,8833	0,9029	0,0877	-2,7243	0,9029	0,0877	-2,7208	0,9029	0,0877	-2,7220
Norte	0,0139	0,0137	8,3037	0,0073	0,0072	11,6160	0,0073	0,0072	11,6015	0,0073	0,0072	11,6066
Nordeste	0,2624	0,1937	1,0787	0,0666	0,0622	3,4794	0,0666	0,0622	3,4750	0,0666	0,0622	3,4765
Centro-oeste	0,0347	0,0335	5,0810	0,3430	0,2254	0,6620	0,3430	0,2254	0,6612	0,3430	0,2254	0,6615
Sudeste	0,4604	0,2487	0,1587	0,4474	0,2472	0,2119	0,4474	0,2473	0,2116	0,4474	0,2472	0,2117
Sul	0,2287	0,1766	1,2899	0,1357	0,1173	2,1294	0,1357	0,1173	2,1267	0,1357	0,1173	2,1276

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Censo Demográfico de 2010
Após o balanceamento, a amostra de tratados ficou em 5.664 observações e 133 controles.

Os efeitos marginais estimados a partir do modelo logístico com ponderações indicam que trabalhar no setor de biocombustíveis aumenta em média 10 pontos percentuais a probabilidade de o indivíduo ser migrante, em relação ao setor de petróleo, mantendo constantes as demais variáveis. Além disso, características como ser homem, viver em áreas urbanas e ter pós-graduação também elevam significativamente essa probabilidade. Por outro lado, residir nas regiões Nordeste, Sul ou sudeste reduz as chances de migração, refletindo possíveis diferenças estruturais no mercado de trabalho regional. A idade exerce um efeito negativo, indicando menor mobilidade conforme o trabalhador envelhece.

Os resultados da análise indicam que a inserção no setor de biocombustíveis exerce um impacto estatisticamente significativo sobre a probabilidade de migração permanente dos trabalhadores. A estimativa do Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT) revela um aumento de 9,2 pontos percentuais na chance de o indivíduo tornar-se migrante permanente quando inserido no setor bioeconômico, em comparação aos trabalhadores do setor petrolífero. O erro padrão associado ao ATT é de 0,038, resultando em uma estatística t de 2,44, o que confirma a significância do efeito ao nível de 5%. Esse resultado sugere que a estrutura ocupacional e as dinâmicas do setor de biocombustíveis contribuem de forma mais expressiva para a fixação territorial dos trabalhadores, possivelmente em razão da maior estabilidade contratual ou da vinculação geográfica às cadeias produtivas regionais. A análise reforça a hipótese de que a bioeconomia pode não apenas atrair, mas também reter força de trabalho em contextos locais, desempenhando um papel estratégico na reconfiguração dos fluxos migratórios internos.

Embora ainda limitada, a literatura sobre migração e empregos verdes converge no entendimento de que a transição para uma economia verde acarretará mudanças significativas nos padrões de demanda, nos processos produtivos e na reconfiguração dos mercados de trabalho. A transição verde, que interage com outras megatendências que afetam o funcionamento e estrutura da economia, como digitalização, envelhecimento populacional e globalização, exigirá uma força de trabalho adaptável com habilidades adequadas para atender à demanda atual e futura por mão de obra e habilidades (OECD, 2023; SULICH; RUTKOWSKA et al., 2020; HOOPER; HUANG, 2024; DORDMOND et al., 2021).

Tabela 3 – Efeitos Marginais Médios (AME) – Modelo Logístico

Variável	AME	Erro Padrão	z	p-valor	IC 95% Inf.	IC 95% Sup.
Setor bioeconômico	0.1000	0.0484	2.06	0.0390	0.0006	0.1904
Empregado informal	-0.0426	0.0409	-1.04	0.2974	-0.1208	0.0395
Empregador	-0.0120	0.1349	-0.09	0.9293	-0.2759	0.2531
Homem	0.0600	0.0233	2.57	0.0101	0.0116	0.1031
Idade	-0.0084	0.0009	-9.74	0.0000	-0.0097	-0.0063
Nível médio	-0.0556	0.0181	-3.07	0.0021	-0.0889	-0.0179
Nível superior	0.0346	0.0338	1.02	0.3065	-0.0330	0.0996
Pós-graduação	0.4569	0.1579	2.89	0.0038	0.1417	0.7607
Sem instrução	0.0868	0.0217	4.01	0.0001	0.0413	0.1262
Não branco	0.0984	0.0150	6.56	0.0000	0.0646	0.1234
Região Nordeste	-0.2862	0.0252	-11.36	0.0000	-0.3302	-0.2314
Região Norte	-0.1019	0.0710	-1.44	0.1512	-0.2395	0.0388
Região Sudeste	-0.1424	0.0210	-6.77	0.0000	-0.1813	-0.0988
Região Sul	-0.3128	0.0220	-14.19	0.0000	-0.3500	-0.2636
Área urbana	0.0902	0.0230	3.92	0.0001	0.0411	0.1314

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Censo 2010.

Essas mudanças no mercado de trabalho são particularmente relevantes para o setor bioeconômico, cuja expansão pode alterar padrões migratórios e de alocação de mão de obra. A maior mobilidade no setor bioeconômico, em comparação ao setor de combustíveis fósseis, sugere que a introdução de atividades voltadas à sustentabilidade e a novas dinâmicas no mercado de trabalho pode modificar os padrões de comportamento dos indivíduos, impactando o fluxo econômico.

A maior probabilidade de migração entre trabalhadores do setor bioeconômico pode estar relacionada à sua maior flexibilidade de entrada, como apontam [Sulich, Rutkowska et al. \(2020\)](#), que destacam os empregos verdes como porta de entrada para jovens e trabalhadores em regiões vulneráveis. Ainda segundo o autor, a ênfase crescente na construção da economia verde tem ampliado as possibilidades de inclusão social e econômica, oferecendo excelentes oportunidades de emprego para os jovens que procuram o primeiro emprego.

[Dordmond et al. \(2021\)](#) construíram um índice de empregos verdes para os estados brasileiros, e os resultados indicam que São Paulo não é apenas a capital econômica do Brasil, mas também sua capital verde, uma vez que nenhum outro estado se aproxima de seu índice de empregos verdes. No entanto, os estados com os menores índices iniciais de empregos verdes apresentaram um crescimento promissor, enquanto aqueles com os maiores índices iniciais permaneceram praticamente no mesmo nível entre 2003 e 2013. Esse padrão pode ser um indicativo de convergência regional.

[Ansanelli, Moraes e Pigliarmini \(2025\)](#) reitera que, no Brasil, os empregos verdes representam entre 3% e 6% do total de empregos formais. No entanto, esses empregos estão concentrados em regiões mais industrializadas, especialmente nos setores primários. Nas áreas mais desenvolvidas, como São Paulo, a distribuição desses empregos ocorre predominantemente

em centros urbanos com maior grau de industrialização.

Os quatro modelos apresentados na Tabela 3 representam diferentes abordagens estatísticas de ponderação utilizadas para estimar o impacto da inserção no setor bioeconômico, especificamente na produção de biocombustíveis, sobre a probabilidade de migração interna. O método de balanceamento por entropia é amplamente reconhecido por sua eficácia na redução do viés de seleção, resultando em estimativas mais precisas e robustas (HAINMUELLER, 2012). No entanto, esse método pode levar a uma perda substancial de observações, especialmente no grupo de controle, devido à necessidade de garantir um balanceamento ótimo entre as covariáveis.

No modelo de pareamento baseado em regressão logística generalizada (GLM), os pesos são estimados por meio de uma estratégia de ponderação derivada da regressão logística, frequentemente utilizada para mitigar problemas de endogeneidade em estudos de inferência causal (IMBENS; RUBIN, 2015). O coeficiente associado ao setor bioeconômico permanece positivo, reforçando a robustez da associação entre bioeconomia e migração interna. A ligeira redução na magnitude do coeficiente, em comparação ao modelo com entropia, sugere que diferenças na estimação dos pesos podem impactar a inferência do efeito causal.

O modelo sem ponderamento resulta em um coeficiente não significativo, indicando que a inclusão de pesos é essencial para aproximar as distribuições das covariáveis entre grupos tratados e de controle. Isso reforça a importância do uso de técnicas de ponderação para obter estimativas mais precisas da relação entre bioeconomia e migração interna. Essa abordagem está conforme achados prévios na literatura, como os de (WAGER; ATHEY, 2018), que enfatiza a relevância dos métodos de *matching* em contextos onde há baixa sobreposição entre os grupos de tratamento e controle, evitando que as estimativas do efeito do tratamento dependam excessivamente de extrapolações.

Por fim, no modelo (4), aplica-se uma estratégia de ponderação alternativa baseada em Horvitz e Thompson (1952), que utiliza uma ponderação pelo inverso da probabilidade de receber o tratamento. Essa abordagem emprega escores de propensão para gerar pesos que ajustam a amostra, reduzindo o viés de seleção. Os resultados desse modelo também corroboram aqueles obtidos nos modelos (1) e (2), apresentando coeficiente estatisticamente significativo e positivo.

Tabela 4 – Estimativas das equações de decisão migratória - Biocombustíveis e Petróleo

Covariadas	Variável dependente:			
	Migrante			IPTW (4)
	Entropia (1)	Ponderamento GLM (2)	Sem ponderamento (3)	
Trabalho na bioeconomia	0.533*** (0.086)	0.524*** (0.058)	-0.172* (0.097)	0.446** (0.203)
Idade	-0.045*** (0.003)	-0.038*** (0.003)	-0.045*** (0.003)	-0.036*** (0.010)
Não branco	0.524*** (0.061)	0.283*** (0.063)	0.570*** (0.061)	0.297 (0.202)
Homem	0.320*** (0.097)	0.273** (0.107)	0.452*** (0.099)	0.332 (0.222)
Nível Médio	-0.325*** (0.088)	-0.337*** (0.089)	-0.292*** (0.088)	-0.319 (0.205)
Nível superior	0.186 (0.164)	-0.081 (0.173)	0.195 (0.146)	0.006 (0.257)
Pós-Graduação	2.338** (0.973)	1.325 (0.975)	1.516*** (0.576)	1.902** (0.918)
Sem-instrução	0.452*** (0.077)	0.153** (0.074)	0.515*** (0.080)	0.131 (0.296)
Empregado-Informal	-0.234 (0.220)	-0.242 (0.220)	-0.247 (0.218)	-0.267 (0.409)
Empregador	-0.064 (0.759)	0.163 (0.789)	0.084 (0.692)	-0.084 (0.831)
Nordeste	-1.554*** (0.144)	-1.185*** (0.152)	-1.490*** (0.124)	-0.957*** (0.262)
Norte	-0.467 (0.315)	-0.108 (0.291)	-0.402 (0.292)	0.056 (0.499)
Sudeste	-0.667*** (0.062)	-0.418*** (0.062)	-0.761*** (0.066)	-0.443* (0.264)
Sul	-1.779*** (0.117)	-1.422*** (0.118)	-1.767*** (0.112)	-1.367*** (0.284)
Urbano	0.481*** (0.106)	1.293*** (0.120)	0.380*** (0.109)	1.302*** (0.274)
Intercepto	-0.353* (0.195)	-1.131*** (0.203)	0.317 (0.211)	-1.207** (0.488)
N	6,588	6,588	6,588	6,588

Note:

* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do censo 2010. Nota 1: Erros-padrão entre parênteses.

2.4.1.2 Bioeconomia e lavouras

Comparativo semelhante ao apresentado na Tabela 3 foi aplicado às três principais lavouras do país: cana-de-açúcar, soja e café. A amostra analisada inclui 58,691 trabalhadores alocados no setor primário e 5,644 empregos verdes. O coeficiente associado ao trabalho no setor

bioeconômico é estatisticamente significativo nos três modelos, indicando um padrão consistente. Os resultados indicam que, em comparação à cana-de-açúcar, os trabalhadores da bioeconomia apresentam menor propensão à migração. No entanto, ao se comparar com os trabalhadores das lavouras de soja e café, o padrão se inverte: os empregados do setor bioeconômico são mais propensos à migração interestadual, o que pode refletir diferentes dinâmicas regionais e estruturais entre os subsetores.

O setor sucroalcooleiro interliga campo e indústria abrangendo toda a cadeia produtiva da cana-de-açúcar, desde o cultivo até a transformação da matéria-prima em açúcar e etanol. No entanto, há evidências de diferenças significativas entre o trabalho no campo e na indústria. Segundo os resultados da tabela 4, a mobilidade dos trabalhadores do campo é maior em comparação ao setor de biocombustíveis. Esse resultado pode ser atribuído à menor estabilidade no emprego agrícola, à sazonalidade das lavouras, às condições de trabalho mais precárias e à falta de incentivos econômicos que garantam permanência. Além disso, segundo [Silva et al. \(2021\)](#), as pressões pelo aumento da produtividade no setor canavieiro ao menor custo possível levam o trabalhador a despender grandes esforços para assegurar uma produção elevada, desencadeando um ritmo de trabalho intenso e extenuante, o que caracteriza a superexploração existente nas lavouras de cana-de-açúcar.

Outra evidência de uma exploração da força de trabalho no campo é evidenciada pelo declínio no número de trabalhadores ao mesmo tempo em que se tem aumento na produtividade entre 2013 e 2015. Em termos de movimentação e rotatividade, verifica-se que a ampliação de um contingente de trabalhadores, que são desligados de seus postos de trabalho, está criando um contingente de trabalhadores que ficam sujeitos aos efeitos de sazonalidade do cultivo da cana-de-açúcar. Essa dinâmica contribui para a precarização e insegurança do trabalho, e pode contribuir para uma maior mobilidade interna dos trabalhadores ([XAVIER; COUTO; TRINDADE, 2017](#)).

A soja, por sua vez, teve grande contribuição para o PBPB, uma vez que sua ampla distribuição pelo território nacional favoreceu a regionalização do fornecimento de matéria-prima, ou seja, grande parte das empresas produtoras de biodiesel se encontra próxima a campos produtores de grãos, reduzindo custos logísticos e fortalecendo a integração entre os setores agrícola e industrial. No entanto, a produção de biodiesel continua fortemente concentrada nas regiões sul e centro-oeste, o que pode explicar o padrão identificado na Tabela 4. O coeficiente positivo associado à bioeconomia sugere que, ao contrário dos trabalhadores do cultivo da cana-de-açúcar, os trabalhadores da produção de soja são menos propensos à migração, comparados aos trabalhadores das usinas de biocombustíveis. Portanto, a concentração regional das usinas também interfere nos padrões de mobilidade. Uma vez que os trabalhadores se deslocam para essas regiões, o retorno às suas origens pode ser dificultado por questões econômicas, como a falta de oportunidades em suas localidades de origem.

Outro resultado importante a ser observado diz respeito à menor propensão de migrar nas regiões, comparando com o centro-oeste. Já existem evidências na literatura de um deslocamento da expansão agrícola do sul do país em direção às áreas do centro-oeste desde a década de 1980. As mesorregiões do Centro-Oeste exibiram os valores de tendência positiva mais elevados para suas participações na área agrícola brasileira em lavouras temporárias; mais especificamente, o norte mato-grossense (MT), o nordeste mato-grossense (MT), o sudoeste de Mato Grosso do Sul (MS) e o sul goiano (GO) ([FREITAS, 2022](#)).

Tabela 5 – Estimativas das equações de decisão migratória - Biocombustíveis e lavouras

Covariadas	<i>Variável dependente:</i>		
	Migrante		
	Cana-de-açúcar (1)	Soja (2)	Café (3)
Trabalho na bioeconomia	−0.193*** (0.039)	0.461*** (0.047)	0.152*** (0.040)
Idade	−0.061*** (0.002)	−0.047*** (0.003)	−0.062*** (0.002)
Não branco	0.636*** (0.038)	0.015 (0.049)	−0.095** (0.037)
Homem	0.367*** (0.062)	0.277*** (0.077)	−0.157*** (0.051)
Nível Médio	−0.383*** (0.055)	0.165** (0.073)	−1.088*** (0.052)
Nível superior	0.280*** (0.100)	1.211*** (0.122)	0.364*** (0.092)
Pós-Graduação	2.266*** (0.607)	3.179*** (0.781)	5.123*** (0.904)
Sem-instrução	0.739*** (0.050)	0.817*** (0.066)	0.272*** (0.045)
Empregado-Formal	0.260 (0.366)	−0.524 (0.373)	−0.045 (0.292)
Empregado-Informal	−0.355 (0.397)	−0.464 (0.408)	−0.576* (0.326)
Empregador	−0.079 (0.659)	−1.106 (0.764)	0.316 (0.576)
Nordeste	−2.067*** (0.107)	−1.250*** (0.099)	−3.022*** (0.095)
Norte	−0.616*** (0.213)	−0.456* (0.244)	−2.528*** (0.238)
Sudeste	−0.222*** (0.039)	−1.061*** (0.050)	−1.904*** (0.039)
Sul	−1.923*** (0.078)	−2.446*** (0.111)	−3.381*** (0.086)
Urbano	0.729*** (0.073)	0.160* (0.083)	0.435*** (0.065)
Intercepto	−0.024 (0.386)	0.813** (0.404)	2.480*** (0.309)
N	17,382	10,406	26,903

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do censo 2010. Nota 1: Erros-padrão entre parênteses.

2.4.1.3 Bioeconomia, alimentos e construção

Verificando outras relações e heterogeneidade acerca da migração dos trabalhadores da bioeconomia e de outros setores. A Tabela 6 mostra resultados da estimação com balanceamento por entropia com dois setores importantes para economia do país. O setor de construção, que inclui, segundo nomenclatura da CNAE, construção e incorporação de edifícios, obras de infraestrutura e serviços especializados para construção. Da indústria de transformação, o setor de fabricação de produtos alimentícios, aqui chamado apenas de alimentos ².

Os coeficientes que indicam a relação entre pertencer ao setor de biocombustíveis, isto é, estar em um emprego verde, são positivos e estatisticamente significativos. Mais uma vez, os resultados indicam uma maior propensão à migração entre os trabalhadores do setor bio em relação a outros setores, dessa vez os setores de construção e produção de alimentos. Esse resultado sugere a maior mobilidade geográfica do setor bio em comparação a um possível enraizamento mais acentuado nos setores de alimentos e construção. Esse enraizamento pode estar associado a um caráter urbano e industrial das atividades.

Em síntese, os resultados reforçam o padrão observado nas seções anteriores, de que o setor bioeconômico não apenas atrai, como também mobiliza geograficamente sua força de trabalho de forma mais intensa que setores comparadores. Esses achados indicam a relevância de políticas públicas voltadas à interiorização da infraestrutura social e econômica em regiões produtoras de biocombustíveis, de forma a mitigar os custos sociais da migração laboral.

² Abate e fabricação de produtos de carne e pescado, fabricação de conservas de frutas, legumes e outros vegetais fabricação de óleos vegetais e gorduras vegetais e animais laticínios, moagem, fabricação de produtos amiláceos e de alimentos para animais, fabricação e refino do açúcar, torrefação e moagem de café, fabricação de outros produtos alimentícios e fabricação de produtos alimentícios não especificados

Tabela 6 – Estimativas das equações de decisão migratória - Comparando setores

	Variável dependente:	
	Alimentos	Construção
Trabalho no setor bioeconômico	0.135*** (0.032)	0.138*** (0.031)
Idade	-0.052*** (0.001)	-0.043*** (0.001)
Não branco	0.462*** (0.020)	0.149*** (0.011)
Homem	0.364*** (0.032)	0.441*** (0.019)
Urbano	0.571*** (0.037)	0.435*** (0.020)
Empregado-Formal	0.378** (0.184)	0.629*** (0.090)
Empregado-Informal	-0.242 (0.201)	-0.062 (0.099)
Empregador	-0.129 (0.345)	0.201 (0.168)
Nível Fundamental	-0.480*** (0.025)	-0.178*** (0.014)
Nível Médio	-0.758*** (0.024)	-0.408*** (0.014)
Nível superior	-0.190*** (0.049)	-0.291*** (0.031)
Pós-Graduação	0.606** (0.270)	0.668*** (0.152)
Nordeste	-2.141*** (0.061)	-2.092*** (0.031)
Norte	-0.551*** (0.104)	-0.419*** (0.057)
Sudeste	-0.423*** (0.020)	-0.852*** (0.011)
Sul	-1.675*** (0.039)	-1.766*** (0.021)
Intercepto	0.175 (0.193)	-0.058 (0.096)
N	63,374	191,830
Log Likelihood	-33,270.870	-103,059.600
Akaike Inf. Crit.	66,575.740	206,153.300

Note: * p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do censo 2010. Nota 1: Erros-padrão entre parênteses.

2.4.1.4 Migração de retorno

Se os agentes escolhem de forma racional seu local de residência, considerando ganho e qualidade de vida, então qualquer resultado posterior deverá ser fruto da decisão inicial de migrar. Existem teorias que colocam a decisão de retorno como fruto de uma estratégia errada do indivíduo, enquanto outras teorias defendem que a ação de retornar é previamente calculada e que a migração pode ser temporária ou permanente (CONSTANT; MASSEY, 2002; DUSTMANN; FADLON; WEISS, 2011; BIAVASCHI, 2016).

A Tabela 5 mostra os resultados das estimativas de migração de retorno comparando, mais uma vez, os setores de biocombustíveis e petróleo. Indivíduos inseridos no setor bioeconômico têm maior propensão a ser migrantes permanentes, comparados aos migrantes do setor de petróleo. Esse resultado sugere que, além de atrair mão de obra migrante, a bioeconomia também retém esses trabalhadores no estado de destino, possivelmente por oferecer vínculos mais duradouros ou oportunidades mais estáveis de ocupação, mesmo com menor exigência de qualificação.

Souza e Terra (2020) corroboram o resultado ao inferir que a indústria petrolífera depende de mão de obra exógena, ou seja, de mão de obra migrante e pendular, ressaltando-se que há pendulares residentes em outros estados brasileiros e em outros países. Estes movimentos só são possíveis tendo em vista as especificidades dos regimes de contratação no segmento *upstream* da indústria petrolífera, não menosprezando o papel da modernização e redução dos preços relativos do transporte, que reduzem os custos desses movimentos para o trabalhador e/ou para a própria empresa.

A exemplo do fenômeno de migração transitória está o município de Macaé no Rio de Janeiro. A cidade já foi muito atraente por suas oportunidades de trabalho no setor do petróleo. No entanto, por ser um setor altamente seletivo no que se refere à exigência de qualificação profissional, os migrantes que não conseguem alocação no setor e deparam-se com dificuldades em sustentar a residência em uma cidade onde o custo de vida é altíssimo, e muitos migrantes, como consequência, retornam aos municípios de origem. Outro fator que contribui para existência de uma elevada transitoriedade é a prática de contratos temporários, em que os funcionários não possuem vínculo com a Petrobras, e sim com as empresas que prestam serviços a ela. Ao término de um contrato os funcionários alocados em Macaé são remanejados para outras unidades da empresa prestadora do serviço, e os contratados temporariamente têm seus contratos vencidos. Para estes, o retorno aos municípios de origem é bastante comum (PAGANOTO, 2012).

Os controles do modelo revelam que trabalhadores não brancos, homens, mais velhos e casados são mais propensos à permanência, em linha com a literatura associada à estabilidade e fixação territorial. Por outro lado, trabalhadores altamente qualificados, pós-graduados, tendem a voltar à origem, sugerindo uma busca por retornos maiores da migração planejada. Além disso, trabalhadores formais, informais e empregadores têm menor chance de permanência em relação a autônomos, sinalizando que vínculos formais podem não garantir estabilidade suficiente para manter a migração como definitiva.

É importante ressaltar que, embora a variável ocupacional se refira ao setor atual de trabalho, o modelo não permite determinar com exatidão se o vínculo com a bioeconomia é causa da permanência ou consequência posterior à decisão migratória. Portanto, interpretações causais devem ser feitas com cautela, sendo desejável o uso de dados longitudinais em pesquisas futuras.

Tabela 7 – Estimativas das equações de decisão migratória - Migrantes retornados e permanentes

	<i>Variável dependente:</i>	
	Migrante permanente = 1 (Entropia)	(PSM)
Trabalho no setor bioeconômico	0.817*** (0.098)	0.838*** (0.046)
Não branco	0.686*** (0.061)	0.607*** (0.048)
Homem	0.432*** (0.099)	0.587*** (0.086)
Idade	-0.050*** (0.003)	-0.045*** (0.003)
Urbano	0.532*** (0.102)	1.232*** (0.091)
Nível Fundamental	-0.447*** (0.078)	-0.085 (0.060)
Nível Médio	-0.778*** (0.076)	-0.447*** (0.060)
Nível superior	-0.750*** (0.190)	-0.730*** (0.164)
Pós-Graduação	1.697 (1.149)	0.700 (0.873)
Chefe	-0.052 (0.065)	0.014 (0.052)
Chefe casado	-0.279*** (0.067)	-0.133** (0.054)
Empregado-Formal	-0.900* (0.500)	-0.796* (0.438)
Empregado Informal	-1.230** (0.546)	-1.038** (0.475)
Empregador	-0.127 (1.429)	-0.454 (1.287)
Intercepto	0.267 (0.540)	-1.038** (0.464)
N	6,254	6,254
Log Likelihood	-3,524.151	-5,818.552
Akaike Inf. Crit.	7,078.302	11,667.100

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do censo 2010. Nota 1: Erros-padrão entre parênteses.

2.5 Conclusão

Existem estudos relacionando os efeitos da migração sobre o desenvolvimento de uma economia sustentável. Os processos de migração têm impactos positivos e negativos no desenvolvimento da bioeconomia. Por um lado, os migrantes podem contribuir para o desenvolvimento da bioeconomia levando novos conhecimentos e habilidades, e estando prontos para trabalhar em

uma indústria que seja atrativa para investimentos. Por outro lado, a migração pode levar a problemas sociais e econômicos que podem afetar negativamente o desenvolvimento da bioeconomia (BUDIAKOVA, 2024; PINATE et al., 2024) .

No entanto, há uma escassez de estudos que indiquem uma relação de causalidade entre o crescimento da bioeconomia e seus efeitos sobre o mercado de trabalho, para além da criação líquida de empregos. Segundo Bowen e Kuralbayeva (2015), pouca atenção tem sido dada às consequências trabalhistas das políticas de incentivo à produção de biocombustíveis e uso de terras de baixo carbono, apesar das evidências de que essas atividades sejam mais intensivas em trabalho do que os setores tradicionais baseados em combustíveis fósseis.

Os resultados apresentados neste ensaio revelam relações significativas acerca da mobilidade entre setores produtivos. Os trabalhadores da bioeconomia destacam-se na maioria das estimativas, indicando que o crescimento do setor, impulsionado por políticas públicas e investimentos, afeta diretamente as decisões migratórias e a dinâmica do mercado de trabalho. Comparado aos setores consolidados do petróleo, construção civil e alimentos, o setor de biocombustíveis mostra tendência a maiores movimentos migratórios internos. No campo há maior movimentação de trabalhadores, possivelmente movidos pela estrutura precária e condições de trabalho pouco satisfatória.

Em síntese, o crescimento no emprego promovido pela introdução de empregos verdes na economia é fruto de uma atividade mais intensiva em trabalho do que a indústria de combustíveis fósseis. Conforme os resultados apresentados, além de atrair, o setor tem a capacidade de reter mão-de-obra, indicando sua relevância tanto como vetor de transição energética quanto de transformação no padrão de mobilidade laboral no Brasil.

3 Migração Setorial - uma análise entre segmentos da agroindústria sucroenergética

3.1 Introdução

O termo bioeconomia consolidou-se como método e estrutura para reflexão sobre a transição verde, isto é, uma economia de baixo carbono. A bioeconomia dos recursos consiste em suporte à reconciliação entre economia e natureza de forma endógena, promovendo gradualmente a substituição dos produtos fósseis por produtos com origem biológica. Além de um papel ambiental, a bioeconomia também inclui em seu escopo o potencial de dinamizar o crescimento econômico e gerar empregos, inclusive por meio da criação de mercados para uso não alimentício da agricultura, como a bioenergia. (VARGAS; PINTO; LIMA, 2023; MCCORMICK; KAUTTO, 2013).

Em busca de maior segurança no fornecimento de energia após as crises do petróleo na década de 1970 têm sido adotadas energias alternativas mais limpas. Nesse contexto, a bioenergia se destaca como produto da bioeconomia, particularmente por meio de biocombustíveis para transporte e biorrefinarias. Os empregos gerados nesse segmento bioeconômico se referem àqueles associados a objetivos e políticas ambientais. Outras definições de empregos verdes ou *green jobs* aventam-se em indústrias cujos produtos são considerados benéficos ao meio ambiente e de fontes renováveis, como a biomassa para geração de energia (SIMAS; PACCA, 2013; BOWEN; KURALBAYEVA, 2015).

Considerando a coletividade, o aumento do potencial de crescimento em energia renovável gera impactos no emprego e na expansão da ocupação. Esse impacto é atribuído à maior intensidade em trabalho na produção de bioenergia comparada à produção de energia tradicional. Outra consequência do aumento da atividade verde é a criação de ocupações relacionadas à produção de bio produtos, isto é, produtos derivados de fontes renováveis (DIERDORFF et al., 2011).

Para além da garantia de segurança no suprimento energético, a contribuição da bioenergia fundamenta-se na mitigação das emissões de gases do efeito estufa associadas à produção de energia. Para tanto, é promovido o uso de biocombustíveis como alternativa mais sustentável. O Brasil detém grande vantagem competitiva na produção de biocombustíveis, em especial com relação ao etanol produzido a partir de cana-de-açúcar e o biodiesel derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, tendo desenvolvido cadeias de valor inteiras para compostos como etanol e biodiesel. Em 2018, o País gerou mais de 33 bilhões de litros de etanol, usado como combustível único nos veículos *flexfuel* e em mistura com a gasolina; e mais de 5,3 bilhões de litros de biodiesel (VIDAL, 2019).

A produção de etanol, juntamente com a de açúcar e eletricidade a partir da biomassa vegetal, integra o setor sucroenergético brasileiro. O crescimento e a consolidação desse setor, especialmente nas últimas décadas, têm sido impulsionados tanto pela demanda da indústria automobilística quanto pela adoção de políticas públicas específicas. Um marco importante nesse processo foi o lançamento do Programa Brasileiro de Álcool (Pro Álcool), em 1975, concebido

em resposta à crise do petróleo. Com a estabilização dos preços internacionais no final da década de 1980, a produção de etanol entrou em um período de estagnação. No entanto, a introdução dos veículos *flexfuel*, em 2003, renovou o interesse pelo biocombustível e reverteu a tendência de retração.

No campo dos biocombustíveis, o biodiesel também desempenha um papel de destaque, tendo como principal insumo o óleo de soja. A cadeia de produção do biodiesel foi efetivamente estruturada a partir de 2004, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Entre os seus objetivos centrais, esteve a promoção da inclusão social de pequenos agricultores, por meio da geração de emprego e renda no meio rural. Além do impacto social, o biodiesel representa uma oportunidade estratégica de agregação de valor a commodities agrícolas com menor poder de barganha. Commodities agrícolas, tais como a soja têm seu preço determinado pelo mercado, o que resulta em pequeno poder de negociação e torna a margem de lucro muito baixa para os produtores. Ao ampliar o processamento interno do grão, o biodiesel não apenas dinamiza a economia agrícola, mas também contribui para o fortalecimento das exportações de produtos de maior valor agregado (CNI, 2020).

No contexto dos biocombustíveis, é provável que um aumento na renda e no emprego seja significativo quando a produção de bioenergia utiliza fatores primários de produção como trabalho. Quando o crescimento da demanda de uma matéria-prima para produção de bioenergia exigir uma quantidade significativa de mão de obra, poderá haver um grande aumento no emprego nas regiões que produzem essa matéria-prima (STEININGER; WOJAN, 2011).

Nesse sentido, diversos estudos evidenciam a relevância da bioeconomia, especialmente do setor sucroenergético, na geração de emprego e renda. Conforme apontado por Bacchi e Caldarelli (2015), Moraes, Oliveira e Diaz-Chavez (2015), Moraes, Bacchi e Caldarelli (2016), a expansão do setor sucroenergético produziu efeitos sobre o mercado de trabalho em razão da instalação de unidades de processamento da matéria-prima, como usinas e destilarias de cana-de-açúcar. Além disso, houve um aumento no número de empregos associados à produção de açúcar e etanol ao longo dos anos; em contrapartida, houve uma redução no emprego na agricultura, provavelmente ligada ao aumento da mecanização das atividades.

Segundo Bacchi e Caldarelli (2015), a expansão do setor contribuiu para o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) per capita municipal, reforçando os benefícios econômicos associados à bioeconomia. Ademais, os resultados obtidos pelos autores revelam que a indústria da cana-de-açúcar favoreceu não apenas os municípios que sediam unidades produtivas, mas também seus municípios vizinhos, em razão de efeitos espaciais e temporais positivos sobre o desenvolvimento econômico regional.

Segundo a Organização Internacional do Trabalho (OIT (2018)), a transição para uma economia mais verde eliminará cerca de 180 mil empregos no Brasil, mas, ao mesmo tempo, criará aproximadamente 620 mil novas ocupações. Uma das chaves para o desenvolvimento social nesse cenário é a qualificação da força de trabalho. Com políticas públicas voltadas à formação e capacitação, os trabalhadores passam a ter a possibilidade de serem realocados na indústria sucroalcooleira ou de migrarem para outros.

Apesar dos efeitos positivos geralmente associados ao setor sucroenergético, ainda se conhece pouco sobre o impacto específico da migração de trabalhadores entre segmentos da cadeia produtiva, como entre a lavoura de cana-de-açúcar e a indústria de biocombustíveis. Este estudo busca preencher essa lacuna ao estimar efeitos contrafactuais sobre os salários decorrentes da migração setorial, bem como o impacto direto da inserção no setor de biocombustíveis. Especificamente, propõe-se estimar os salários que trabalhadores atualmente na lavoura de

cana-de-açúcar poderiam receber caso estivessem empregados na produção de biocombustíveis, considerando tanto transições de curto prazo quanto inserções diretas. Adicionalmente, o estudo investiga quais subgrupos, definidos por escolaridade, região, sexo, raça e faixa etária se beneficiariam mais com a migração entre setores.

A análise empírica concentra-se no estado de São Paulo, dada sua centralidade na bioeconomia brasileira. A cana-de-açúcar, além de ser a principal matéria-prima utilizada na produção de etanol, é uma das culturas agrícolas mais expressivas do país. Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2024), São Paulo foi responsável por 38,7% da produção nacional de etanol em 2023, totalizando 13,67 milhões de metros cúbicos, mais que o dobro do registrado pelo segundo maior produtor, Goiás (5,45 milhões de metros cúbicos). Esse protagonismo reflete a robusta infraestrutura agroindustrial do estado, que, segundo dados do IBGE (2019), também lidera a produção nacional de cana-de-açúcar, respondendo por 51,2% do total produzido no país.

Para capturar os efeitos da transição e inserção setorial sobre os salários, serão aplicados modelos de inferência causal baseados em métodos tradicionais, como o *Propensity Score Matching* com balanceamento por entropia, e abordagens de aprendizado de máquina voltadas à inferência causal. Os dados utilizados provêm da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), que permite a observação detalhada do mercado de trabalho formal brasileiro.

Este ensaio está estruturado da seguinte forma: após esta introdução, seguem-se as seções de descrição da base de dados e do tratamento das variáveis, a metodologia empírica, os resultados e, por fim, as conclusões. Ressalta-se que uma revisão de literatura minuciosa sobre bioeconomia e biocombustíveis encontra-se no Capítulo 1 deste estudo, sendo este ensaio dedicado à investigação empírica específica sobre os efeitos da migração setorial no mercado de trabalho do setor sucroenergético.

3.2 Fundamentos teóricos da migração setorial e efeitos salariais

A literatura acerca da migração intersetorial fornece distintas abordagens metodológicas aplicadas ao estudo da migração da força de trabalho entre diferentes setores de atividade econômicas. Ela acentua-se com foco nos aspectos econômicos, estruturais e institucionais da dinâmica intersetorial migratória. Há uma evidente comunicação entre os estudos vigentes acerca desta temática.

A heterogeneidade dos efeitos da migração intersetorial também é observada nos estudos que vinculam desigualdade de renda, industrialização e realocação da força de trabalho. Anbarci e Ulubaşoğlu (2011) revisitam a hipótese de Kuznets, destacando que a migração rural-urbana, ao longo do processo de industrialização tardia, pode inicialmente ampliar a desigualdade de renda, mas tende a reduzi-la em estágios mais avançados, conforme ocorre a convergência de retornos entre setores. O resultado, no entanto, depende da estrutura institucional dos mercados de trabalho, do grau de absorção do setor de destino e das características dos trabalhadores migrantes.

No setor agroindustrial, especialmente em cadeias de valor como a do etanol, as diferenças entre os segmentos agrícola e industrial não se restringem ao nível salarial. Há variações relevantes na estrutura contratual, na exigência de qualificação, na presença de sindicatos e nos regimes de proteção social. Tais fatores institucionais operam como mecanismos que moldam a

decisão migratória e mediam seus efeitos econômicos. O trabalhador que migra da lavoura para o setor de etanol pode enfrentar barreiras de entrada caso não detenha o capital humano exigido, o que explica a persistência de retornos assimétricos (PARK, 2019).

Hu (2012) propõe um modelo teórico-empírico que relaciona a migração do trabalho agrícola à inflação nos países em desenvolvimento. A hipótese central é que o viés pró-setor não agrícola nos investimentos provoca desequilíbrios na migração, afetando preços relativos e pressionando o Índice de Preços ao Consumidor (CPI). Utilizando dados da China entre 2001 e 2010, o autor demonstra que variações no preço relativo dos alimentos, resultantes da migração laboral, explicam de forma robusta os choques inflacionários, especialmente em contextos de alta sensibilidade da demanda alimentar.

Önel e Goodwin (2014) introduzem a abordagem de opções reais à análise da migração da força de trabalho agrícola nos Estados Unidos. Estes autores argumentam que, diante da irreversibilidade e da incerteza associadas à migração, trabalhadores podem postergar sua decisão, mesmo diante de diferenciais salariais positivos. Com dados de 1948 a 2009, os autores estimam modelos de regressão com limiar (threshold models), concluindo que o comportamento migratório só se altera após o superamento de um limiar crítico nos diferenciais de remuneração. Isso reforça a existência de não-linearidades nos ajustes intersetoriais da força de trabalho.

Swathilekshmi (2017) investiga a migração de trabalhadores agrícolas do estado de Tamil Nadu para o setor pesqueiro mecanizado no litoral de Karnataka, Índia. O estudo, com base em entrevistas estruturadas, revela que secas, falhas de safra e baixos salários agrícolas atuam como fatores de expulsão, enquanto a maior remuneração relativa e a absorção do setor pesqueiro funcionam como atrativos. Utilizando análise discriminante e o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, Swathilekshmi identifica que idade, escolaridade e renda anual influenciam positivamente os níveis de aspiração dos migrantes.

Ramsey, Sonoda e Ko (2021) retomam o debate sobre a validade empírica de modelos não-lineares na análise da migração intersetorial agregada. Com base em dados dos Estados Unidos e Japão, os autores testam especificações lineares e não-lineares da equação de migração, concluindo que os modelos com limiares geram elasticidades irrealistas. Assim, os autores demonstram que os modelos lineares são suficientes para capturar os principais determinantes da migração agregada, reafirmando a importância do “gatilho marshalliano”, ou seja, o diferencial líquido de retorno como principal motivador da decisão migratória.

Stepanek (2021) aplica um modelo de equilíbrio geral computável com gerações sobrepostas (OLG-CGE) para avaliar os impactos macroeconômicos da migração internacional e do envelhecimento populacional na República Tcheca. O modelo incorpora dados demográficos, ocupacionais e setoriais de 350 grupos populacionais. Os resultados indicam que o envelhecimento levará à redução do crescimento do PIB e à perda de competitividade, enquanto fluxos migratórios positivos poderiam mitigar parcialmente tais efeitos. Stepanek destaca que aumentos de 15 a 34 por cento na imigração seriam necessários para compensar as perdas demográficas projetadas.

Pham (2023) examina como as mudanças climáticas afetam a realocação setorial do trabalho no Vietnã entre 1992 e 2018. A autora utiliza um modelo teórico com fricções de mercado e custos de transição, combinado com estimativas empíricas baseadas em dados subnacionais. Os resultados mostram que o aumento de temperaturas extremas reduz a produtividade agrícola e incentiva a migração para setores não agrícolas, sobretudo entre jovens. No entanto, essa dinâmica depende do grau de integração comercial das regiões e da informalidade dos setores de destino.

Em conjunto, os estudos analisados apontam para três grandes vertentes metodológicas: modelos teóricos com simulações (Hu, Anbarci e Ulubaşoğlu, Stepanek, Pham); abordagens econométricas com dados de painel ou séries temporais (Önel e Goodwin; Ramsey, Sonoda e Ko; Pham); e estudos de campo com análises estatísticas aplicadas (Swathilekshmi). O debate sobre linearidade versus não-linearidade nos modelos de migração é central, com destaque para os efeitos de fricções de mercado, incerteza e custos de transição. A literatura recente enfatiza a importância de variáveis contextuais, como clima, demografia e infraestrutura, como mediadoras dos fluxos intersetoriais de trabalho em economias emergentes e em desenvolvimento.

3.3 Base de dados e tratamento

3.3.1 Base Rais identificada

Para estudar migrações setoriais é necessário identificar com precisão o setor em que o trabalhador está inserido, bem como informações adicionais sobre emprego e variáveis socioeconômicas. A Relação Anual de Informações Sociais (Rais) fornece informações abrangentes dos trabalhadores formais. O tratamento aplicado aos dados dos estabelecimentos e aos vínculos empregatícios permite sua desagregação no âmbito do município, de subatividades econômicas e de ocupações, podendo ser desagregada por gênero, faixa etária, grau de instrução, rendimento médio e faixas de rendimentos em salários mínimos (NEGRI et al., 2001).

A Rais identificada permite localizar o trabalhador ao longo do tempo por meio do Cadastro de Pessoa Física (CPF), possibilitando verificar a trajetória individual em termos de variação salarial e mobilidade setorial. Considerando dados identificados de trabalhadores ao longo dos anos de 2011 a 2019, é possível rastrear os vínculos formais de trabalhadores do setor de biocombustíveis, mais especificamente na produção de etanol, e da cana-de-açúcar, formando então o setor sucroenergético.

Tabela 8 – Distribuição de trabalhadores nos setores de Cana e Etanol (2011–2019)

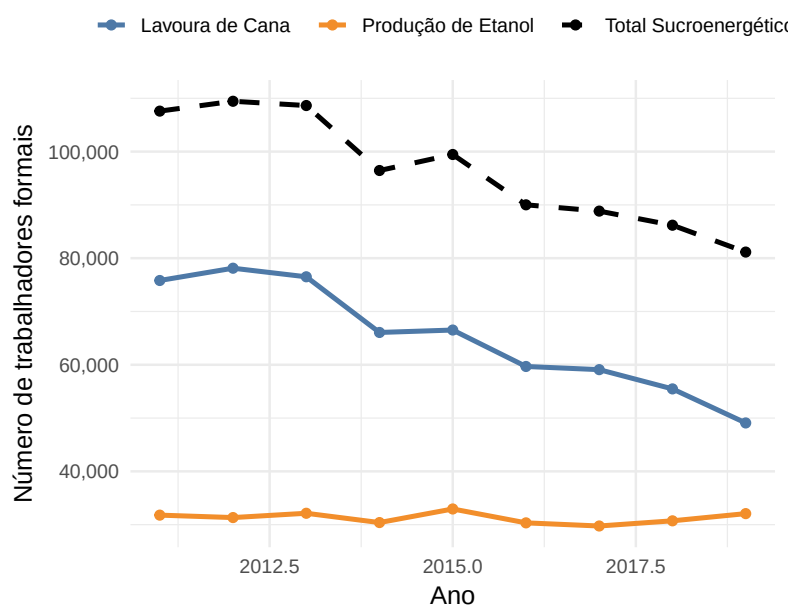
Ano	Etanol	Total	% Razão Etanol-Cana
2011	75.815	107.599	29,5%
2012	78.120	109.449	28,6%
2013	76.510	108.645	29,6%
2014	66.063	96.454	31,5%
2015	66.518	99.459	33,1%
2016	59.680	90.014	33,7%
2017	59.086	88.833	33,5%
2018	55.471	86.187	35,6%
2019	49.082	81.150	39,5%

Elaboração própria com base nos dados da Rais (2011-2019)

A Tabela 7 e a Figura 5 mostram um crescimento dos vínculos formais na participação relativa do Etanol no setor sucroenergético no estado de São Paulo, onde está concentrado o maior número de trabalhadores do setor bioeconômico (TÁVORA, 2011). Houve uma redução significativa do número de trabalhadores na lavoura de cana, acompanhada de uma manutenção relativamente estável da força de trabalho na indústria, podendo sinalizar mudanças estruturais internas nesse mercado. No agregado, o número total de trabalhadores formais no setor sucro-

energético apresentou queda contínua, atribuída majoritariamente à redução da ocupação na atividade agrícola.

Figura 5 – Evolução do emprego formal nos setores de lavoura de cana e produção de etanol (2011–2019)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Rais (2011–2019)

Conforme Tabela 8, trabalhadores do setor de Etanol apresentam maior escolaridade média e maiores salários em relação aos trabalhadores da lavoura da cana-de-açúcar. Trabalhadores da indústria são relativamente mais jovens do que os inseridos no campo, e contam com uma participação maior das mulheres na força de trabalho, bem como de trabalhadores não brancos. A remuneração média dos trabalhadores do etanol também é superior, resultado corroborado pela maior escolaridade.

Tabela 9 – Perfil médio dos trabalhadores formais nos setores de etanol e lavoura de cana (2011–2019)

Indicador	Etanol	Cana
Idade média (anos)	37,1	39,6
Remuneração média (R\$)	3.428	2.827
Sexo (%)		
Homens	91,5	89,0
Raça/Cor (%)		
Branços	63,1	71,5
Não brancos	36,8	28,5
Escolaridade (%)		
Analfabeto	0,5	1,1
Fundamental incompleto	15,8	29,3
Fundamental completo	14,9	16,1
Médio completo	14,2	17,4
Superior completo	45,5	31,1
Pós-graduação	9,1	5,1

Fonte: Elaboração própria com base nos dados identificados da Rais 2011-2019.

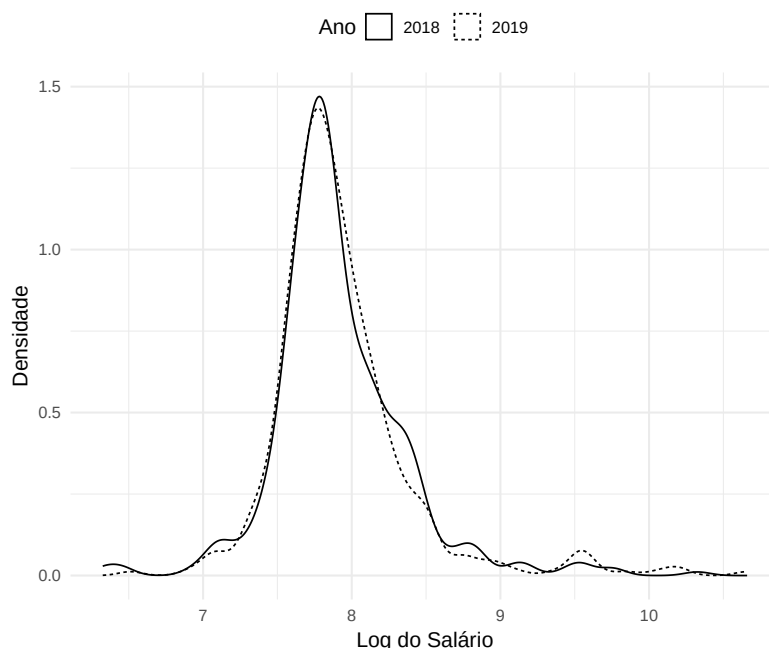
Para identificar as mudanças setoriais e os salários observados nos dois períodos define-se migrante setorial aquele que no período T_0 estava inserido em setor z e no período T_1 estava inserido em outro setor w . Consideramos duas possibilidades: migração etanol-cana e vice-versa, com atenção para mudança de campo para indústria, isto é, cana-etanol. A Figura 6 mostra as mudanças na distribuição dos salários reais nos anos de 2018 e 2019 para trabalhadores que transitaram do setor de cana para o etanol.

A amostra é composta por trabalhadores com vínculo ativo em 31 de dezembro de 2018 e 2019. Foram selecionados indivíduos entre 18 e 70 anos com renda média nominal não nula. Foram identificados 42.111 trabalhadores da cana que não mudaram de setor de 2018 a 2019, 416 indivíduos que migraram da cana para o etanol e 25.368 trabalhadores que permaneceram na produção de etanol.

A Figura 6 apresenta a distribuição logarítmica dos salários dos trabalhadores que migraram de lavoura para a produção de etanol em 2019. A calda direita da distribuição mostra oscilações entre as distribuições dos dois anos, com algumas diferenças positivas e negativas em vários pontos. Nota-se um leve deslocamento da curva referente a 2019 em direção à direita em comparação a 2018, indicando um aumento do salário médio após a transição setorial.

Como o processo de migração não é aleatório, a simples comparação entre salários observados em diferentes setores está sujeita a viés de seleção. Para uma comparação mais robusta é necessário contruir um cenário contrafactual estimando o que teria ocorrido com os trabalhadores que permanecem no setor agrícola caso tivessem migrado para produção de etanol. A análise contrafactual contribui para isolar o efeito da mudança setorial sobre os salários, aumentando a confiabilidade sobre os retornos econômicos da mobilidade setorial.

Figura 6 – Distribuição Logarítmica dos Salários dos Migrantes Cana → Etanol (2018–2019)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Rais (2018–2019)

3.4 Metodologia

Questões sobre o efeito causal de uma exposição A sobre um resultado Y em uma população específica podem ser expressas em termos de contrastes contrafatuais. Um contrafactual é uma afirmação hipotética que descreve o que teria acontecido na população-alvo sob níveis de exposição diferentes daqueles realmente observados. Em termos econômicos, a exposição pode ser a uma política, intervenção ou inserção em determinada conjuntura. Nesse contexto, dois tratamentos são objetivos deste ensaio, são eles: pertencer a um setor específico (bioeconômico) e transicionar entre dois segmentos de uma mesma indústria.

3.4.1 Métodos Tradicionais

3.4.1.1 Propensity Score Matching (PSM)

Define-se "tratamento" a inserção de trabalhador no setor bioeconômico de produção de biocombustíveis ou a transição, de curto ou longo prazo, entre segmentos agroindústria sucroenergética - como lavoura de cana-de-açúcar para a produção de etanol. Definimos $Y_i(1)$ como o resultado potencial do indivíduo sob tratamento e $Y_i(0)$ sem tratamento. Como o indivíduo só pode ser observado em uma das condições, não podemos observar $Y_i(1)$ e $Y_i(0)$ simultaneamente, o que caracteriza um problema clássico de inferência causal com dados observacionais, marcado pela ausência de um contrafactual diretamente observável.

A estratégia do *Propense score matching* (PSM), proposta por Rosenbaum e Rubin (1983), consiste em estimar a probabilidade condicional de receber o tratamento, sujeito a um conjunto de variáveis observáveis X_i , de forma que o escore de propensão seja $p(X_i) = \Pr(D_i = 1 | X_i)$, em que $D \in \{1, 0\}$ define o tratamento. A partir dessa estrutura e do pressuposto de ignorabilidade condicional $((Y_i(0), Y_i(1)) \perp D_i | X_i)$ e $0 < p(X_i) < 1$ o método PSM permite estimar o efeito

médio do tratamento sobre os tratados (ATT) por meio da comparação entre indivíduos tratados e controles com escores de propensão semelhantes.

3.4.1.2 Balanceamento por entropia

O balanceamento por entropia, proposto por Hainmueller (2012), é uma técnica de reponderação amostral que generaliza o método de escores de propensão (PSM) ao ajustar os pesos diretamente com base em restrições sobre os momentos amostrais das covariáveis. Essa abordagem promove um equilíbrio estatístico mais preciso entre os grupos de tratamento e controle, reduzindo o viés de seleção em estudos observacionais.

Ao contrário da maioria dos métodos tradicionais, que estimam escores de propensão via modelos logísticos ou *probit*, essa abordagem incorpora o equilíbrio covariável diretamente na função de peso aplicada às unidades amostrais. Inicialmente, impõem-se restrições de equilíbrio, fazendo com que as distribuições das covariáveis sejam idênticas em todos os momentos especificados (como média, variância ou quantis). Em seguida, resolve-se um problema de otimização que procura os pesos que melhor satisfaçam essas condições, minimizando a divergência (no sentido de entropia) em relação a um vetor de pesos uniformes. Essa recalibração ajusta desigualdades sistemáticas e aleatórias na composição das amostras.

Suponha uma amostra binária $n = n_0 + n_1$, oriunda de uma população de tamanho $N = N_0 + N_1$, onde $n \leq N$. Os grupos n_1 e n_0 referem-se, respectivamente, às unidades tratadas e de controle. Seja X a matriz das características exógenas observadas no pré-tratamento, com x_{ij} representando a j -ésima característica do indivíduo i , de modo que $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}]$. Assumem-se dois potenciais resultados: $Y_i(1)$ e $Y_i(0)$, correspondentes aos estados de tratamento e controle. Como apenas um desses é observável para cada indivíduo, temos a realização (D_i, Y_i, X_i) .

O efeito do tratamento individual é dado por $\tau_i = Y_i(1) - Y_i(0)$. A média dos efeitos do tratamento sobre os tratados (ATT) é definida como:

$$\tau = E[Y(1) | D = 1] - E[Y(0) | D = 1] \quad (3.1)$$

Em que a primeira expectativa é diretamente observável, enquanto a segunda representa um contrafactual. A única informação disponível sobre $Y(0)$ é proveniente do grupo de controle, não submetido ao tratamento. Para aproximar essa expectativa, um grupo de controle sintético é construído por meio de reponderação, visando representar uma imagem virtualmente equivalente ao grupo de tratamento, sem perdas amostrais.

A média contrafactual ponderada do grupo de controle é estimada por:

$$E[\widehat{Y(0)} | D = 1] = \frac{\sum_{\{i|D=0\}} Y_i w_i}{\sum_{\{i|D=0\}} w_i} \quad (3.2)$$

Os pesos w_i são obtidos pela solução do seguinte problema de minimização da entropia relativa:

$$\min_{w_i} H(w) = \sum_{\{i|D=0\}} w_i \log \left(\frac{w_i}{q_i} \right) \quad (3.3)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{\{i|D=0\}} w_i c_{ri}(X_i) = m_r \quad \text{com } r = 1, \dots, R \quad (3.4)$$

$$\sum_{\{i|D=0\}} w_i = 1 \quad (3.5)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \mid D = 0 \quad (3.6)$$

Em que $q_i = 1/n$ representa os pesos uniformes de base, e $c_{ri}(X_i) = m_r$ descreve o conjunto de R restrições impostas aos momentos das covariáveis do grupo de controle reponderado.

3.4.2 Métodos Baseados em Aprendizado de Máquina

As estimativas dos efeitos causais são, em última análise, baseadas em comparações de diferentes unidades com diferentes níveis de tratamento. Quando o objetivo é analisar o efeito de um tratamento binário, e é possível assumir que todos os fatores de confusão sejam observados, [Rosenbaum e Rubin \(1983\)](#) mostram que, sob essa premissa, a diferença média entre tratados e não tratados, com os mesmos valores de confundidores, fornece uma interpretação de causalidade.

Modelos de aprendizagem de máquina (*Machine Learning*) supervisionados buscam espaço entre os métodos tradicionais focando em problemas de predição: a partir de uma base de dados e um resultado de interesse Y_i e preditores X_i , o objetivo é estimar um modelo em um subconjunto desses dados, dados os valores de X_i . Esse subconjunto é chamado de amostra de treinamento e é usado para prever resultados nos dados restantes, chamados de amostra de teste ([ATHEY; IMBENS, 2017](#)).

3.4.2.1 Double Machine Learning (DML)

Dentre os métodos modernos de inferência causal, com *machine learning* (ML), destaca-se o *Double Machine Learning* - DML, proposto por [Chernozhukov et al. \(2018\)](#). O efeito médio do tratamento é estimado mesmo quando há efeitos de heterogeneidade, combinando a flexibilidade de algoritmos de ML para estimar componentes de confusão com uma etapa final de estimação baseada em equações de escore ortogonalizadas, o que garante viés reduzido e inferência estatisticamente válida.

Considera-se especificamente a estimativa dos efeitos médios do tratamento quando os efeitos do tratamento são totalmente heterogêneos em um modelo estrutural parcialmente linear com tratamento binário $D \in 0, 1$, com vetores de dados observados dados por (Y, D, X) , temos que:

$$\begin{aligned} Y &= g_0(D, X) + U, & E_P[U \mid X, D] &= 0 \\ D &= m_0(X) + V, & E_P[V \mid X] &= 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$g_0(D, X)$ representa a função condicional de resultado e $m_0(X) = E[D \mid X]$ corresponde ao escore de propensão, ambas as equações são modeladas por ML sob as condições supracitadas de regularidade. g_0 e m_0 são funções integráveis ao quadrado, dando suporte à X . O parâmetro de interesse do efeito médio do tratamento para o tratado (ATTE) é dado por:

$$\theta_0 = E_P [g_0(1, X) - g_0(0, X)] \quad (3.8)$$

As covariáveis X afetam a variável de política Y e a probabilidade de tratamento D por meio do escore de propensão $m_0(X)$ e a variável de resultado por meio da função $g_0(D, X)$. O DML busca eliminar o viés por meio de procedimentos ortogonais e de *cross-fitting*, proporcionando consistência assintótica mesmo sob especificação incorreta parcial das funções auxiliares.

3.4.2.2 Causal Forest (CF)

Florestas aleatórias (Breiman (2001)) têm excelente desempenho em problemas de previsão, só recentemente suas propriedades estatísticas estão sendo compreendidas. Wager e Athey (2018) demonstram que as previsões de florestas causais (*Causal Forest*) são assintoticamente normais e centradas no verdadeiro efeito médio condicional do tratamento para cada indivíduo.

Como já discutido, não é possível observar simultaneamente os dois resultados potenciais $Y_i(0)$ e $Y_i(1)$ para o mesmo indivíduo, impossibilitando a estimação direta de $\tau(x) = E[Y_i(1) - Y_i(0) \mid X_i = x]$ a partir dos dados observados (X_i, Y_i, D_i) . Para prosseguir com uma estimativa possível assume-se o pressuposto de ignorabilidade em que o tratamento é independente do resultado potencial: $\{Y_i^{(0)}, Y_i^{(1)}\} \perp D_i \mid X_i$.

O método *causal forest* propõe usar a suposição de ignorabilidade para alcançar consistência sem precisar estimar explicitamente a propensão de receber o tratamento ($E[D_i \mid X_i = x]$). Assumindo um modelo parcialmente linear $E[Y \mid D, X] = m(X) + D\tau(x)$, podemos estimar $\tau(x)$ indivíduos na vizinhança de x , denotando $i : X_i \in N(x)$ (VOGT et al., 2025):

$$\hat{\tau}(x) = \frac{\sum_{\{i: X_i \in N(x)\}} (D_i - \hat{p}(X_i))(Y_i - \hat{m}(X_i))}{\sum_{\{i: X_i \in N(x)\}} (D_i - \hat{p}(X_i))^2} \quad (3.9)$$

- $D_i \in \{0, 1\}$ é a variável indicadora de tratamento;
- $\hat{p}(X_i)$ é a estimativa da função de escore de propensão, $P(D_i = 1 \mid X_i)$;
- $\hat{m}(X_i)$ é a estimativa da expectativa condicional do desfecho, $E[Y_i \mid X_i]$;
- $N(x)$ representa o subconjunto de vizinhos da observação x , definido pelas árvores honestas da floresta ¹.

A equação mostra que $\hat{\tau}(x)$ é uma regressão local dos resíduos do desfecho ($Y_i - \hat{m}(X_i)$) sobre os resíduos do tratamento ($D_i - \hat{p}(X_i)$), ponderada pelas amostras mais semelhantes a x em termos de covariáveis. Essa estrutura fornece estimativas localmente consistentes e robustas a erros de especificação parcial, como demonstrado em Chernozhukov et al. (2018).

¹ As estimativas do Causal Forest baseiam-se em *florestas honestas*, conforme definido por Wager e Athey (2018). Nessas florestas, o conjunto de dados utilizado para definir as divisões nas árvores (splitting) é distinto daquele usado para estimar os efeitos de tratamento nas folhas. Essa separação assegura que as estimativas individuais $\hat{\tau}(X_i)$ não sofram de viés de superajuste (*overfitting*), permitindo validade inferencial assintótica e o cálculo de erros padrão robustos.

Uma das principais vantagens do *Causal Forest* está na possibilidade de estimar efeitos heterogêneos de tratamento $\hat{\tau}(X_i)$ para cada unidade da amostra. A partir dessas estimativas individuais, é possível calcular efeito médio do tratamento sobre os indivíduos que efetivamente receberam o tratamento (ATT).

Formalmente, o ATT é definido como:

$$\widehat{ATT} = \frac{1}{\sum_i D_i} \sum_{i: D_i=1} \hat{\tau}(X_i) \quad (3.10)$$

Neste caso, apenas as unidades com $D_i = 1$ são utilizadas no cálculo da média dos efeitos estimados. Esse estimador mantém validade assintótica sob condições mínimas, sendo robusto a problemas de especificação parcial dos modelos de propensão e resultado, desde que ao menos um deles esteja corretamente especificado, propriedade conhecida como dupla robustez (ATHEY; WAGER, 2019).

3.4.2.3 Targeted Maximum Likelihood Estimation (TMLE)

A estimativa de máxima verossimilhança direcionada (Targeted Maximum Likelihood Estimation) é um método semiparamétrico de dupla robustez que melhora as chances de especificação correta do modelo, permitindo uma estimativa flexível usando métodos de aprendizado de máquina.

TMLE é um procedimento em duas etapas, em um primeiro momento o objetivo é a média condicional do resultado, $Q(D, X) = E[Y|D, X]$. Se a estimativa de Q for consistente, o modelo permanece consistente, caso contrário, o TMLE segue uma etapa de "direcionamento" que ajusta essas estimativas para minimizar o viés na inferência do parâmetro-alvo. Essa abordagem garante maior eficiência estatística e validade assintótica, mesmo quando apenas uma das partes do modelo (de resultado ou de tratamento) estiver corretamente especificada.

Na segunda etapa do procedimento, realiza-se um processo de atualização (ou *targeting step*), que utiliza o escore de propensão para ajustar o modelo de resultado, incorporando a informação de como a variável de exposição se distribui condicionalmente às covariáveis. Esse ajuste é feito com base na minimização da divergência de Kullback-Leibler, resultando numa estimativa direcionada para o parâmetro de interesse. O modelo atualizado é então utilizado para gerar estimativas mais robustas do efeito médio do tratamento, seja na população como um todo (ATE), nos tratados (ATT) ou nos controles (ATC).

Essa estrutura garante que o estimador final seja eficiente e consistente sob hipóteses relativamente fracas, sendo particularmente vantajosa em contextos com alta dimensionalidade ou grande complexidade funcional entre as variáveis.

3.4.3 Síntese Comparativa dos Métodos

As técnicas de inferência causal com aprendizado de máquina, como o *Double Machine Learning*, o *Causal Forest* e o TMLE, não seguem aquela divisão rígida em “treino” e “teste” típica de modelos preditivos. Nesses casos, o interesse principal é saber qual é o efeito de uma ação ou mudança sobre um resultado, não prever o valor do resultado em novos dados. Por isso, esses métodos embaralham a própria amostra de formas específicas para diminuir o viés sem abrir mão de observações:

No *Double Machine Learning*, os dados são repartidos em alguns blocos, e em cada rodada uma parte é usada para estimar os modelos auxiliares (como o escore de propensão), enquanto o restante aproveita essas estimativas para calcular o efeito de interesse. Essa alternância garante que todas as pessoas da amostra contribuam para o resultado final (CHERNOZHUKOV et al., 2018).

O *Causal Forest* constrói “florestas honestas”: cada árvore separa internamente os dados em dois grupos, um para decidir a estrutura das divisões e outro para calcular o efeito nas folhas. Essa estratégia reduz o risco de superajuste, mantendo a base completa em uso (WAGER; ATHEY, 2018; ATHEY; WAGER, 2019).

O TMLE, por sua vez, pode usar técnicas de validação cruzada para escolher e combinar modelos, mas o objetivo é aprimorar a precisão do estimador causal. Na segunda etapa, o método ajusta o modelo de resultado usando o escore de propensão para corrigir possíveis vieses (PANG et al., 2016).

Em suma, em vez de reservar uma parte da amostra apenas para teste, esses métodos trabalham com a base inteira, adotando divisões internas inteligentes para produzir estimativas causais mais confiáveis e transparentes.

A Tabela 9 contém uma síntese das características de cada modelo utilizado em inferência causal.

Tabela 10 – Comparativo entre métodos de inferência causal

Critério	PSM com Entropia	Double Machine Learning (DML)	Causal Forest (CF)	TMLE
Tipo de abordagem	Reponderação / Matching	Estimador ortogonalizado com ML	Florestas aleatórias honestas	Verossimilhança semiparamétrica com ML
Estimador principal	ATT (tratados)	ATE ou ATT	$\hat{\tau}(x)$, ATT via média sobre $D_i = 1$	ATE, ATT, ATC
Uso de ML	Não (pré-processamento)	Sim (nas etapas auxiliares)	Sim (construção das árvores)	Sim (via SuperLearner)
Robustez	Sensível à escolha das covariáveis e momentos	Duplamente robusto	Parcialmente robusto à erros de especificação (semi paramétrico)	Duplamente robusto, eficiente assintoticamente
Capacidade de capturar heterogeneidade	Não	Parcial (com interações)	Sim (efeito individual $\hat{\tau}(X_i)$)	Sim (via modelos flexíveis)
Inferência	Estimativas pontuais com pesos fixos	Inferência assintótica (erro padrão e IC)	Inferência via variância dentro da floresta	Inferência válida assintoticamente
Vantagens	Interpretação simplificada	Controla viés de regularização, flexível	Estima efeitos individuais, detecta heterogeneidade	Alta precisão e robustez, usa informações do mecanismo de tratamento
Limitações	Não capta heterogeneidade	Depende de boa modelagem das etapas auxiliares	Complexidade computacional, exige amostra grande	Mais complexo, requer SuperLearner

Fonte: Elaboração própria

O uso de métodos de machine learning (ML) causal mostra-se particularmente adequado em contextos nos quais a forma funcional da relação entre variáveis explicativas e o desfecho é desconhecida ou complexa. Ao contrário dos métodos tradicionais que exigem forte imposição paramétrica e especificações rígidas de modelo, abordagens baseadas em ML oferecem maior flexibilidade para capturar padrões não lineares e interações complexas entre covariáveis, reduzindo o risco de erro de especificação. Além disso, em situações em que há orientação teórica limitada sobre quais covariáveis devem ser incluídas nos modelos de seleção e de resultado, os algoritmos de ML provêm estratégias sistemáticas de seleção de variáveis e regularização, evitando escolhas ad hoc frequentemente observadas nas abordagens clássicas. Tais métodos também apresentam maior robustez frente à heterogeneidade individual, permitindo a estimação de efeitos de tratamento específicos por subgrupo e o mapeamento de variações nos efeitos causais não observáveis com técnicas convencionais (ATHEY; IMBENS, 2017; MALLIK et al., 2025)

3.4.4 Estratégia empírica

Neste estudo serão aplicados modelos de aprendizagem de máquina e modelos de métodos paramétricos e semi-paramétricos clássicos, como Propensity Score Matching (PSM) e Balanceamento por entropia, como estratégias de validação dos resultados obtidos via métodos de *machine learning* causal.

A análise empírica é conduzida com base nos dados da Rais restrita aos anos de 2018 e 2019, no sentido de transição, e 2019, no sentido de impacto direto do setor. Nesse contexto, a variável de tratamento consiste em duas abordagens: efeito da transição setorial como trajetória (2018 e 2019) e impacto setorial direto (2019):

- Trajetória: $D = 1$ se em $T = 2018$ o indivíduo encontra-se no setor de lavoura de cana-de-açúcar e em $T = 2019$ o mesmo indivíduo está inserido na produção de etanol, isto é, $D = 1$ é dado pela migração e $D = 0$ corresponde à permanência na lavoura.²
- Impacto setorial: $D = 1$ quando, em 2019, o trabalhador está inserido no setor de produção de etanol e $D = 0$ caso a ocupação seja identificada como lavoura de cana-de-açúcar.

A escolha do intervalo 2018–2019 busca garantir que as estimativas salariais não sejam influenciadas por choques externos, como os provocados pela pandemia de COVID-19.

A população de análise é composta por trabalhadores com vínculo formal ativo, idade entre 18 e 70 anos e sem inconsistências nos registros salariais. As covariadas disponíveis na base da Rais utilizadas nas análises são: salário médio nominal, idade, gênero (homem), raça (não branco) e escolaridade (*dummies* para diferentes níveis: baixa, fundamental, médio, superior, mestrado, doutorado) e Interações relevantes (homem $\times$ nível de escolaridade, homem $\times$ raça).

Em síntese, o parâmetro de interesse é o efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT), definido conforme as duas estratégias:

$$ATT_{\text{trajetória}} = E[Y_i(1) | D_i^T = 1] - E[Y_i(0) | D_i^T = 1] \quad (3.11)$$

$$ATT_{\text{impacto}} = E[Y_i(1) | D_i^S = 1] - E[Y_i(0) | D_i^S = 1] \quad (3.12)$$

² Com base na classificação de ocupação CNAE 2.0. Etanol 19314 e Cana 1130.

3.5 Resultados

Após a definição dos grupos de interesse (trabalhadores que permaneceram no setor de lavoura e aqueles que migraram para a produção de etanol), a amostra final é composta por 65.451 e 400 observações, respectivamente. A análise empírica inclui a aplicação de modelos tradicionais de inferência causal, como o PSM com balanceamento por entropia, a fim de construir uma linha de base para comparação posterior com os modelos de *machine learning*, capazes de capturar efeitos de heterogeneidade do tratamento.

A Tabela 10 sintetiza os resultados do efeito médio do tratamento para diferentes métodos e abordagens (curto e longo prazo e efeito direto). Inicialmente, observa-se que, no curto prazo, os Atts não são estatisticamente significativos em todos os modelos, com ou sem interações. O PSM apresenta ATT = 0,0208 ($p = 0,194$), enquanto o Causal Forest e o DML estimam efeitos ainda menores (0,0083 e 0,0098, respectivamente). O TMLE apresenta um efeito praticamente nulo, o que reforça a conclusão de que, no curto prazo, a migração entre setores não gerou ganhos salariais significativos para o trabalhador médio.

A análise de subgrupos revela efeitos heterogêneos relevantes. Trabalhadores com ensino superior e pós-graduação apresentam efeitos médios maiores, sugerindo que a transição setorial recompensa mais intensamente aqueles com maior capital humano. No entanto, o tamanho amostral de alguns subgrupos (como mestrado, com apenas 13 observações) exige cautela na interpretação.

Ainda na Tabela 10, o efeito médio do tratamento para o impacto direto de estar inserido no setor de biocombustíveis (comparado à lavoura) é estatisticamente significativo no modelo tradicional PSM e entropia e no modelo mais robusto a heterogeneidades, *Causal Forest*. Os resultados indicam um ganho salarial significativo e substancial de cerca de 9%, mesmo controlando por diferenças observáveis entre os grupos de tratamento e controle. Nesse contexto, decisão de se inserir no setor de etanol está associada a retornos salariais positivos.

Tabela 11 – Resumo dos Efeitos Médios do Tratamento (ATT) Estimados por Diferentes Métodos

Abordagem	Método	Interações	Efeito médio	Erro Padrão
Transição (2018–2019)	PSM com entropia	Não	0.0208	0.0160
	Causal Forest	Não	0.0083	0.0150
	Causal Forest	Sim	0.0039	0.0153
	DML	Não	0.0098	0.0147
	TMLE	Não	0,000000186	-
Impacto direto (2019)	PSM com entropia	Não	0.0946	0.0033
	Causal Forest	Não	0.0913	0.0031
Longo prazo (2015–2019)	PSM com entropia	Não	0.0017	0.0080
	Causal Forest	Não	-0.0004	0.0073

Fonte: Elaboração própria com base na Rais 2015-2019.

No horizonte de longo prazo (2015–2019), os efeitos estimados para a transição setorial permanecem estatisticamente insignificantes. Enquanto o PSM com entropia aponta efeitos positivos, embora muito pequenos, o Causal Forest sugere efeitos ligeiramente negativos. Esses resultados sugerem que, na média, a mudança de setor não se traduziu em ganhos salariais sustentados. As estimativas variam conforme o método aplicado, com abordagens tradicionais, mesmo que muito pequenas, o efeito é positivo, enquanto modelos mais robustos mostram resultados negativos no longo prazo para transição setorial. As estimativas heterogêneas, porém,

revelam padrões relevantes. Grupos com ensino médio e superior apresentam efeitos positivos mais elevados do que aqueles com menor escolaridade. A variável “homem” também se associa a maior efeito médio, sugerindo que parte da heterogeneidade nos ganhos pode estar ligada a desigualdades estruturais no acesso a melhores postos dentro do setor industrial.

A produção agrícola de cana-de-açúcar sofreu um declínio no número de trabalhadores e um aumento na produção no nível de qualificação devido à mecanização e ao crescimento tecnológico no setor. Essa mudança gera pressões entre os indivíduos para se realocar em novos setores, como o etanol. Em São Paulo, o número de empregados envolvidos em trabalho manual pesado era de cerca de 136 mil em 2007/2008; mais recentemente, em 2021, esse valor foi reduzido a pouco mais de 38 mil trabalhadores, enquanto o índice de mecanização chega a 90%. No entanto, o nível de qualificação dos empregos na cana e álcool tem crescido; cerca de 80% dos trabalhadores agrícolas do setor têm contratos formais, enquanto a proporção da agricultura brasileira é de 17% (FERRAZ et al., 2021; KARP et al., 2021).

Azanha et al. (2013) reforça que, em relação ao perfil educacional, o setor agrícola na maioria dos países é o que ainda emprega trabalhadores com baixa escolaridade, no Brasil emprega até mesmo trabalhadores analfabetos. Assim, embora a escolaridade média dos trabalhadores em plantações de cana-de-açúcar tenha crescido 52% entre 2002 e 2007, ela permanece em níveis substancialmente baixos. A disparidade entre os níveis educacionais de trabalhadores na cana e no etanol explica parte relevante da disparidade salarial. Isso tem implicações importantes, pois se acredita que uma política de redução da heterogeneidade educacional entre os trabalhadores do setor agrícola e industrial proporciona aumento na produtividade do trabalho e, consequentemente, nos salários, o que contribui para reduzir a desigualdade de renda entre esses setores.

Segundo Elizondo e Boyd (2017), do ponto de vista setorial, há perdedores e ganhadores na promoção do etanol, mas não é muito claro quem são eles. Os setores agrícolas se beneficiam modestamente, pois os recursos são desviados para eles, mas isso é amplamente contrabalançado por reduções em outros setores (como bens domésticos, serviços e pecuária). Nesse contexto, setores específicos, como agricultura e indústria, se beneficiam de políticas de promoção do etanol, mas os subsídios necessários podem afetar negativamente tanto a receita do governo quanto a produtividade de outros setores.

Tabela 12 – Efeitos heterogêneos estimados pelo Causal Forest segundo subgrupos

Período	Subgrupo	Efeito Médio	N
Transição (2018–2019)	Superior = 0	0,00392	37.584
	Superior = 1	0,05360	18
	Médio = 0	0,00787	24.304
	Médio = 1	0,00361	15.117
	Fundamental = 0	0,00513	32.843
	Fundamental = 1	0,01180	6.578
	Mestrado = 0	0,00623	39.408
	Mestrado = 1	0,01320	13
Longo prazo (2015–2019)	Fundamental = 0	0,01070	24.584
	Fundamental = 1	0,01180	5.620
	Médio = 0	0,00751	19.995
	Médio = 1	0,01750	10.209
	Superior = 0	0,01020	29.070
	Superior = 1	0,02840	1.134
	Homem = 0	-0,00116	2.630
	Homem = 1	0,01200	27.574

Fonte: Elaboração própria com base na Rais 2015-2019.

Os efeitos heterogêneos encontrados, particularmente os maiores retornos entre trabalhadores com ensino superior e mestrado, apontam para um risco de aprofundamento das desigualdades caso a mobilidade setorial ocorra sem políticas de qualificação associadas. A concentração dos benefícios da bioeconomia em perfis já mais escolarizados indica que os trabalhadores com menor escolaridade podem enfrentar barreiras de entrada em segmentos industriais de maior remuneração. Assim, programas de formação técnica, educação continuada e requalificação profissional tornam-se essenciais para garantir que os frutos da transição verde sejam distribuídos de forma equitativa.

É provável que mais empregos sejam criados do que destruídos, no entanto, novos postos podem requerer habilidades diferentes, ou crescer em espaços diferentes. Tais incompatibilidades de competências ou espaciais podem gerar desemprego em algumas ocupações e regiões, enquanto deixam vagas de emprego não preenchidas em outras. Transições verdes não gerenciadas podem levar à queda da renda e a maior desigualdade e privação dando origem ao "descontentamento verde" em regiões negligenciadas. Consequentemente, é fundamental examinar as implicações trabalhistas da política ambiental nos níveis ocupacional e regional. Ocupações com menores salários tendem a ser os mais prejudicados, caso não haja apoio para a aquisição de novas habilidades. Sem políticas de qualificação, a transição para setores mais produtivos pode ampliar a desigualdade. O cenário projetado indica necessidade de treinamento digital para quem atua na agricultura e em manutenção, além de políticas específicas para esses grupos e para o setor de serviços (BERRYMAN et al., 2025).

3.5.1 Considerações Finais

Avanços recentes em inferência causal permitiram a incorporação de técnicas de aprendizagem de máquina ao conjunto de métodos utilizados para estimar efeitos de tratamento. Neste estudo, foram aplicados diferentes modelos de *machine learning* causal — *Double Machine Learning* (DML), *Causal Forest* (CF) e *Targeted Maximum Likelihood Estimation* (TMLE) — com o objetivo de estimar os efeitos salariais da mobilidade setorial entre os segmentos da agroindústria sucroenergética, com foco na bioeconomia de biocombustíveis.

Esses métodos oferecem vantagens significativas em relação às abordagens tradicionais, como maior robustez à má especificação do modelo e maior sensibilidade à identificação de efeitos heterogêneos. Em especial, o *Causal Forest* permite a divisão da amostra em subgrupos homogêneos (folhas), o que contribui para uma melhor detecção de variações nos efeitos individuais, aumentando a eficiência na inferência de heterogeneidades.

Os resultados indicam que, no curto prazo, a transição entre o cultivo de cana-de-açúcar e a produção de etanol não está associada a ganhos salariais estatisticamente significativos. No entanto, as estimativas heterogêneas apontam maiores retornos para indivíduos com níveis mais altos de escolaridade (ensino superior e mestrado), sugerindo que os benefícios da mobilidade setorial dependem, em grande medida, do capital humano do trabalhador.

Por outro lado, ao se considerar o impacto direto da inserção no setor de etanol, os resultados revelam um ganho salarial robusto e estatisticamente significativo de aproximadamente 9%, mesmo após o controle por diferenças observáveis entre grupos. Esse achado reforça a hipótese de que a alocação no setor de biocombustíveis está positivamente associada à remuneração, evidenciando o potencial da bioeconomia como um vetor de valorização do trabalho formal.

Referências

ADITIYA, H. et al. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 66, p. 631–653, 2016.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2024: Dados de desempenho da indústria de petróleo, gás natural e biocombustíveis e do sistema de abastecimento nacionais no período 2014–2023. *ANP - Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*, v. 1, n. 1, p. 1–X, 2024.

ANDERSSON, I.; GRUNDEL, I. Regional policy mobilities: Shaping and reshaping bioeconomy policies in värmeland and västerbotten, sweden. *Geoforum*, Elsevier, v. 121, p. 142–151, 2021.

ANDERSSON, R. The bioeconomy and the birth of a “new anthropology”. *Cultural Anthropology*, v. 37, n. 1, p. 37–44, 2022.

ANSANELLI, S. L. de M.; MORAES, C. S. B. de; PIGLIALARMI, D. C. J. Empregos verdes: evidências empíricas e abordagens metodológicas. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, v. 23, n. 2, p. e9037–e9037, 2025.

ARTS, B. et al. Discourses, actors and instruments in international forest governance. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS (IUFRO). *Embracing complexity: Meeting the challenges of international forest governance. A global assessment report. Prepared by the Global Forest Expert Panel on the International Forest Regime*. [S.l.], 2010. p. 57–74.

ATHEY, S.; IMBENS, G. W. The state of applied econometrics: Causality and policy evaluation. *Journal of Economic perspectives*, American Economic Association 2014 Broadway, Suite 305, Nashville, TN 37203-2418, v. 31, n. 2, p. 3–32, 2017.

ATHEY, S.; WAGER, S. Estimating treatment effects with causal forests: An application. *Observational studies*, v. 5, n. 2, p. 37–51, 2019.

AVELINO, R. R. Self-selection and the impact of migration on earnings. *Brazilian Review of Econometrics*, v. 30, n. 1, p. 69–89, 2010.

AZANHA, M. et al. Social externalities of ethanol production in brazil. 2013.

BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no estado de são paulo, entre 2005 e 2009. *Nova economia*, SciELO Brasil, v. 25, n. 1, p. 209–224, 2015.

BAENINGER, R. Rotatividade migratória: um novo olhar para as migrações internas no brasil. *REMHU: Revista Interdisciplinar da Mobilidade Humana*, SciELO Brasil, v. 20, p. 77–100, 2012.

BANERJEE, A. V.; NEWMAN, A. F. Occupational choice and the process of development. *Journal of political economy*, The University of Chicago Press, v. 101, n. 2, p. 274–298, 1993.

- BERRYMAN, A. K. et al. Skill and spatial mismatches for sustainable development in brazil. *arXiv preprint arXiv:2503.05310*, 2025.
- BIAVASCHI, C. Recovering the counterfactual wage distribution with selective return migration. *Labour Economics*, Elsevier, v. 38, p. 59–80, 2016.
- BORJAS, G. J.; BRATSBERG, B. *Who leaves? The outmigration of the foreign-born*. [S.l.]: National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA, 1994.
- BOTTAUSCI, S. et al. Organic waste management and circular bioeconomy: A literature review comparison between latin america and the european union. *Sustainability*, MDPI, v. 14, n. 3, p. 1661, 2022.
- BOWEN, A.; KURALBAYEVA, K. Looking for green jobs: the impact of green growth on employment. *Grantham Research Institute Working Policy Report. London: London School of Economics and Political Science*, p. 1–28, 2015.
- BREIMAN, L. Random forests. *Machine learning*, Springer, v. 45, p. 5–32, 2001.
- BRITO, F. As migrações internas no brasil: um ensaio sobre os desafios teóricos recentes. *Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar*, v. 20, 2009.
- BRITO, F. A. de; RIGOTTI, J. I.; CAMPOS, J. *A mobilidade interestadual da população no Brasil no início do século XXI: mudança no padrão migratório?* [S.l.], 2012.
- BUDIAKOVA, O. Developing bioeconomy in the context of migration processes. In: AZERBAIJAN COOPERATION UNIVERSITY. *9th International Modern Sciences Congress "Azerbaijan Cooperation University"*. [S.l.], 2024.
- BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? a review of the literature. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 7, p. 691, 2016.
- CASTILLO, R. A expansão do setor sucroenergético no brasil. *BERNARDES, JA; SILVA, CA; ARRUZZO, RC (Org.). Espaço e energia: mudanças no paradigma sucroenergético. Rio de Janeiro: Lamparina*, p. 75–84, 2013.
- CHERNOZHUKOV, V. et al. *Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters*. [S.l.]: Oxford University Press Oxford, UK, 2018.
- CHISWICK, B. R. Are immigrants favorably self-selected? *American economic review*, American Economic Association, v. 89, n. 2, p. 181–185, 1999.
- CNI, N. C. o. I. B. C. Bioeconomia: uma agenda para brasil. 2013.
- CNI, N. C. o. I. B. C. Facts and figures: Brazil at a glance. 2016.
- CNI, N. C. o. I. B. C. Bioeconomia e indústria brasileira. 2020.
- CONSTANT, A.; MASSEY, D. S. Return migration by german guestworkers: Neoclassical versus new economic theories. *International migration*, Wiley Online Library, v. 40, n. 4, p. 5–38, 2002.
- DAM, J. E. V. et al. Securing renewable resource supplies for changing market demands in a bio-based economy. *Industrial crops and products*, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 129–144, 2005.

- DAYRELL, G. et al. Uso dos biocombustíveis no brasil.
- DIERDORFF, E. C. et al. Greening of the world of work: Revisiting occupational consequences. *National Center for O* NET Development*, 2011.
- DIETZ, T. et al. Governance of the bioeconomy: A global comparative study of national bioeconomy strategies. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 9, p. 3190, 2018.
- DORDMOND, G. et al. The complexity of green job creation: An analysis of green job development in brazil. *Environment, Development and Sustainability*, Springer, v. 23, p. 723–746, 2021.
- DUSTMANN, C.; FADLON, I.; WEISS, Y. Return migration, human capital accumulation and the brain drain. *Journal of Development Economics*, Elsevier, v. 95, n. 1, p. 58–67, 2011.
- ELIZONDO, A.; BOYD, R. Economic impact of ethanol promotion in mexico: A general equilibrium analysis. *Energy Policy*, Elsevier, v. 101, p. 293–301, 2017.
- EUROPEAN COMMISSION, D.-G. f. R. a. I. *Innovating for sustainable growth : a bioeconomy for Europe*. [S.l.]: Publications Office, 2012.
- FERRAZ, D. et al. Mechanization in sugarcane production and other agricultural activities: an econometric analysis of employment and income. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, v. 28, n. 4, p. e5768, 2021.
- FERROUKHI, R. et al. Renewable energy and jobs: annual review 2015. *Int. Renew. Energy Agency*, 2015.
- FREITAS, R. E. Expansão de área agrícola no brasil segundo as lavouras temporárias. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022.
- GOLDEN, J. S. et al. *Indicators of the US biobased economy*. [S.l.]: United States Department of Agriculture Washington, DC, USA, 2018.
- GOLDEN, J. S. et al. An economic impact analysis of the us biobased products industry: A report to the congress of the united states of america. *Industrial Biotechnology*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 11, n. 4, p. 201–209, 2015.
- GRANGEIA, C.; SANTOS, L.; LAZARO, L. L. B. The brazilian biofuel policy (renovabio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. *Energy Conversion and Management: X*, Elsevier, v. 13, p. 100156, 2022.
- GUEDES, C. L. B. et al. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 33, p. 781–786, 2010.
- HAINMUELLER, J. Entropy balancing for causal effects: A multivariate reweighting method to produce balanced samples in observational studies. *Political analysis*, Cambridge University Press, v. 20, n. 1, p. 25–46, 2012.
- HARRIS, J. R.; TODARO, M. P. Migration, unemployment and development: a two-sector analysis. *The American economic review*, JSTOR, v. 60, n. 1, p. 126–142, 1970.

- HOOVER, K.; HUANG, L. The role of immigrant workers in the green transition. < bound method Organization. get_name_with_acronym of< Organization ... , 2024.
- HORVITZ, D. G.; THOMPSON, D. J. A generalization of sampling without replacement from a finite universe. *Journal of the American statistical Association*, Taylor & Francis, v. 47, n. 260, p. 663–685, 1952.
- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola: Estatística da produção agrícola. *IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*, v. 1, n. 1, p. 1–20, 2019.
- IMBENS, G. W.; RUBIN, D. B. *Causal inference in statistics, social, and biomedical sciences*. [S.l.]: Cambridge university press, 2015.
- KALLIO, M. et al. China-europe forest bioeconomy: Assessment and outlook. European Forest Institute, 2020.
- KAMM, B.; GRUBER, P.; KAMM, M. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions, 3rd reprint*. [S.l.]: Wiley-VCH, Weinheim,, 2008.
- KARP, S. G. et al. Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Wiley Online Library, v. 15, n. 3, p. 899–912, 2021.
- KLEIN, B. C. et al. Low carbon biofuels and the new brazilian national biofuel policy (renovabio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 115, p. 109365, 2019.
- KULCSÁR, L. J.; BOLENDER, B. C. If you build it, will they come? biofuel plants and demographic trends in the midwest. *Population and Environment*, Springer, v. 32, p. 318–331, 2011.
- KUOSMANEN, T. et al. How big is the bioeconomy. *Reflections from an economic perspective*, p. 49, 2020.
- LEE, D.-H. Bio-based economies in asia: Economic analysis of development of bio-based industry in china, india, japan, korea, malaysia and taiwan. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier, v. 41, n. 7, p. 4333–4346, 2016.
- LEE, E. S. A theory of migration. *Demography*, Springer, v. 3, p. 47–57, 1966.
- LEHTONEN, O.; OKKONEN, L. Socio-economic impacts of a local bioenergy-based development strategy—the case of pielinen karelia, finland. *Renewable energy*, Elsevier, v. 85, p. 610–619, 2016.
- LEITE, R. C. d. C.; LEAL, M. R. L. O biocombustível no brasil. *Novos estudos CEBRAP*, SciELO Brasil, p. 15–21, 2007.
- LEITE, R. C. d. C. et al. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. [S.l.]: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.
- MADUREIRA, J. M.; GUERRA, S. M. G. Programa nacional de produção e uso do biodiesel: divergências sobre os resultados sociais da política de biocombustíveis. *Revista de Políticas Públicas*, Universidade Federal do Maranhão, v. 18, n. 2, p. 659–670, 2014.

- MALLIK, S. K. et al. Econometric advances in causal inference: The machine learning revolution. *GSC Advanced Research and Reviews*, 2025.
- MCCORMICK, K.; KAUTTO, N. The bioeconomy in europe: An overview. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 6, p. 2589–2608, 2013.
- MILANEZ, A. Y.; SOUZA, J. A. P. d.; MANCUSO, R. V. Panoramas setoriais 2030: sucroenergético. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017.
- MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C. R.; DIAZ-CHAVEZ, R. A. Socio-economic impacts of brazilian sugarcane industry. *Environmental Development*, Elsevier, v. 16, p. 31–43, 2015.
- MORAES, M. A. F. D. de; BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in brazil (2000–2008): effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, v. 91, p. 116–125, 2016.
- MORAES, M. M.; RINGLER, C.; CAI, X. Policies and instruments affecting water use for bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Wiley Online Library, v. 5, n. 4, p. 431–444, 2011.
- MORRISON, B.; GOLDEN, J. S. An empirical analysis of the industrial bioeconomy: Implications for renewable resources and the environment. *BioResources*, v. 10, n. 3, p. 4411–4440, 2015.
- NALI, E. C.; RIBEIRO, L. B. N. M.; HORA, A. B. d. Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no brasil: oportunidade ou necessidade? Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016.
- NEGRI, J. A. D. et al. Mercado formal de trabalho: Comparação entre os microdados da rais e da pnad. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2001.
- NYKO, D. et al. A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.
- OECD. *What role for migration and migrants in the green transition of OECD countries?* [S.l.], 2023.
- OECD, O. f. E. C. a. D. The bioeconomy to 2030: Designing a policy agenda. 2009.
- OIT. *World employment and social outlook 2018: Greening with jobs*. [S.l.]: International Labour Organisation (ILO), 2018.
- OLIVEIRA, F. C. D.; COELHO, S. T. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in brazil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 75, p. 168–179, 2017.
- OLIVEIRA, K. C. de; ZANIN, V. A bioeconomia e os biocombustíveis no cenário brasileiro. *Revista iPecege*, v. 1, n. 2, p. 23–43, 2015.
- PAGANOTO, F. Eles não param de chegar? a emergência de novos padrões de mobilidade espacial da população em macaé/rj. *Espaço Aberto*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 71–84, 2012.

- PANG, M. et al. Targeted maximum likelihood estimation for pharmacoepidemiologic research. *Epidemiology*, LWW, v. 27, n. 4, p. 570–577, 2016.
- PARISI, C.; RONZON, T. et al. A global view of bio-based industries: benchmarking and monitoring their economic importance and future developments. *Publications Office of the European Union, DOI*, v. 10, p. 153649, 2016.
- PARK, C. *Essays on Inter-sectoral Labour Mobility and the Wage Gap*. Tese (Doutorado) — Durham University, 2019.
- PEIXOTO, J. As teorias explicativas das migrações: teorias micro e macro-sociológicas. ISEG-SOCIUS, 2004.
- PHILP, J. Balancing the bioeconomy: supporting biofuels and bio-based materials in public policy. *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry, v. 8, n. 11, p. 3063–3068, 2015.
- PINATE, A. et al. ‘get back to where you once belonged’? effects of skilled internal migration on italian regional green growth. *Papers in Regional Science*, Elsevier, v. 103, n. 4, p. 100036, 2024.
- PINTO, R. F. A. et al. Aglomerados industriais goianos: reflexões sobre as potencialidades para o emprego industrial e o desenvolvimento regional. *Revista de Empreendedorismo, Negócios e Inovação*, v. 1, n. 1, p. 52–65, 2016.
- PÜLZL, H.; KLEINSCHMIT, D.; ARTS, B. Bioeconomy—an emerging meta-discourse affecting forest discourses? *Scandinavian Journal of Forest Research*, Taylor & Francis, v. 29, n. 4, p. 386–393, 2014.
- RODRIGUES, A. Policy, regulation, development and future of biodiesel industry in brazil. *Cleaner Engineering and Technology*, Elsevier, v. 4, p. 100197, 2021.
- RODRÍGUEZ, A. G.; RODRIGUES, M. d. S.; ECHENIQUE, O. S. Towards a sustainable bioeconomy in latin america and the caribbean: Elements for a regional vision. ECLAC, 2019.
- ROSENBAUM, P. R.; RUBIN, D. B. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, Oxford University Press, v. 70, n. 1, p. 41–55, 1983.
- SASSON, A.; MALPICA, C. Bioeconomy in latin america. *New Biotechnology*, Elsevier, v. 40, p. 40–45, 2018.
- SILVA, C. P. d. et al. Condições de trabalho no cultivo da cana-de-açúcar no brasil e repercussões sobre a saúde dos canavieiros. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, SciELO Brasil, v. 46, p. e22, 2021.
- SILVA, M. F. d. O.; PEREIRA, F. d. S.; MARTINS, J. V. B. A bioeconomia brasileira em números. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018.
- SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 27, p. 99–116, 2013.
- SINGER, P. I. *Migrações internas: considerações teóricas sobre o seu estudo*. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e . . . , 1972.

SOUZA, J.; TERRA, D. Migrações, pendularidades e mercado de trabalho no segmento upstream da indústria do petróleo na bacia de campos. *EURE (Santiago)*, SciELO Chile, v. 46, n. 137, p. 157–180, 2020.

STANEF-PUICĂ, M.-R. et al. Green jobs—a literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI, v. 19, n. 13, p. 7998, 2022.

STARK, O.; BLOOM, D. E. The new economics of labor migration. *The american Economic review*, JSTOR, v. 75, n. 2, p. 173–178, 1985.

STEININGER, K.; WOJAN, T. Economic impact of bioenergy development some evidence from europe and the us incidence économique du développement des bioénergies quelques constats en europe et aux états-unis wirtschaftliche auswirkungen der entwicklung im bereich bioenergie belege aus europa und den usa. *Eurochoices*, Wiley Online Library, v. 10, n. 3, p. 31–37, 2011.

SULICH, A.; RUTKOWSKA, M. et al. Green jobs, definitional issues, and the employment of young people: An analysis of three european union countries. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 262, p. 110314, 2020.

TÁVORA, F. L. História e economia dos biocombustíveis no brasil. *Brasília, DF: Senado Federal*, 2011.

TRIGO, E. J. et al. Towards bioeconomy development in latin america and the caribbean. In: *Towards a Latin America and Caribbean knowledge based bio-economy in partnership with Europe*. [S.l.]: Pontificia Universidad Javeriana, 2015. p. 15–41.

VANDERMEULEN, V. et al. How to measure the size of a bio-based economy: Evidence from flanders. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 4368–4375, 2011.

VARGAS, D.; PINTO, T.; LIMA, C. The green transition: The bioeconomy and conversion of green into value. 2023.

VIDAL, M. d. F. Produção e uso de biocombustíveis no brasil. Banco do Nordeste do Brasil, 2019.

VOGT, E. V. et al. Application of causal forests to randomised controlled trial data to identify heterogeneous treatment effects: a case study. *BMC Medical Research Methodology*, Springer, v. 25, n. 1, p. 50, 2025.

WAGER, S.; ATHEY, S. Estimation and inference of heterogeneous treatment effects using random forests. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 113, n. 523, p. 1228–1242, 2018.

WANG, R. et al. Bioindustry in china: an overview and perspective. *New biotechnology*, Elsevier, v. 40, p. 46–51, 2018.

XAVIER, C. A. C.; COUTO, M. d. L. P.; TRINDADE, J. R. As relações de trabalho no setor sucroalcooleiro nordestino no século xxi: modernização e permanência da superexploração do trabalho. *Revista Ciências do Trabalho*, n. 9, 2017.