Análise da Evolução nas Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil com Redes Bipartidas

Pedro Henrique Assis Silva[1], Victor Ströele[1], Regina Braga[1], José Maria David[1]

[1]Departamento de Ciências da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Caixa Postal 20.010 – 36036-900 – Juiz de Fora – MG – Brazil

pedrohenrique.assis@estudante.ufjf.br,

{victor.stroele, regina.braga, jose.david}@ufjf.br

Abstract. *Greenhouse Gas (GHG) emissions are the main driver of global climate change, impacting ecosystems, economies, and societies. In Brazil, these emissions stem from agriculture, land-use change, the energy sector, and industrial processes. Despite the extensive data from SEEG, the lack of structural analysis linking states and sectors hinders the identification of inter-regional and intersectoral patterns. This work models these interactions using bipartite networks, analyzing structural and temporal patterns from 1973 to 2022. The results indicate a transition from industrial centers to agricultural and energy regions, contributing to more efficient public policies.*

Resumo. *As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) impulsionam as mudanças climáticas globais, afetando ecossistemas, economias e sociedades. No Brasil, essas emissões decorrem da agropecuária, mudança no uso da terra, setor energético e processos industriais. Apesar dos dados extensivos do SEEG, a falta de análise estrutural entre estados e setores econômicos dificulta identificar padrões inter-regionais e intersetoriais. Este trabalho modela essas interações com redes bipartidas, analisando padrões estruturais e temporais de 1973 a 2022. Os resultados indicam a transição dos principais emissores de GEE de centros industriais para regiões agropecuárias e energéticas, contribuindo para políticas públicas mais eficientes.*

1. Introdução

As mudanças climáticas têm sido objeto de crescente preocupação no debate acadêmico e político, especialmente diante dos impactos ambientais e socioeconômicos que derivam do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. O Brasil, como um dos principais emissores globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), enfrenta desafios significativos para mitigar suas emissões e cumprir seus compromissos internacionais, como o Acordo de Paris. As principais fontes de emissão incluem a agropecuária, que responde por uma fração considerável das emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), e a mudança no uso da terra, especialmente desmatamento, que é um fator determinante para as emissões de dióxido de carbono (CO_2) no país [IEMA 2020].

Embora o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) forneça um banco de dados robusto e detalhado sobre emissões e remoções de GEE no

Brasil, ele apresenta limitações no que diz respeito à conexão explícita entre estados e setores. Um modelo estrutural, que representa essas interações pode potencializar a capacidade de identificar padrões críticos, como interdependências entre diferentes setores da economia ou a contribuição relativa de cada estado às emissões totais. Essa falta de integração dificulta a elaboração de políticas públicas eficazes e a avaliação do impacto de iniciativas de redução de emissões ao longo do tempo [SEEG 2024].

Este estudo propõe a modelagem das emissões de GEE no Brasil por meio de redes bipartidas, uma abordagem que possibilita uma análise estruturada das relações entre estados e setores econômicos, que permite a identificação de padrões críticos e *hubs* de emissão. A questão de pesquisa que norteia esse trabalho é: *Como o uso de redes bipartidas na modelagem das emissões de GEE no Brasil auxilia na análise da evolução das emissões ao longo das últimas décadas?*

Para responder a essa questão de pesquisa, foram conduzidas análises das redes bipartidas que revelaram quais estados e setores exercem maior influência no sistema de emissões, favorecendo um direcionamento mais preciso das políticas de mitigação. Além disso, a modelagem longitudinal possibilitou avaliar como essas relações evoluíram ao longo do tempo, refletindo o impacto de transformações econômicas, políticas públicas e eventos climáticos extremos. A compreensão das interações estruturais se apresentou como uma base para a implementação de medidas mais eficazes na redução das emissões de GEE e no aumento da eficiência das ações climáticas.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 detalha a modelagem e construção da rede bipartida. A Seção 4 analisa os resultados obtidos. A seção 5 discute os resultados. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e direções para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

A utilização de redes bipartidas para modelar interações complexas tem se mostrado uma abordagem eficiente para estudar fenômenos socioeconômicos, ambientais e culturais. Diversos estudos têm empregado essa técnica para analisar dinâmicas globais e locais, abordando desde fluxos de carbono até preferências culturais e musicais [Chen and Xu 2024, Silva et al. 2021, Walter 2021]. Entretanto, além do uso de redes complexas, há também abordagens que empregam modelos matemáticos e análises estatísticas para investigar a dinâmica das emissões e os impactos ambientais. Nesta seção, discutiremos alguns trabalhos que utilizam redes bipartidas em diferentes contextos, bem como estudos que aplicam outras abordagens metodológicas para compreender as emissões de carbono e seus determinantes.

O estudo de Chen and Xu 2024, investiga a adequação socioecológica entre acordos ambientais internacionais (IEAs) e fluxos de carbono incorporados ao comércio (EET) de 1995 a 2021, envolvendo 189 países. Utilizando redes complexas construídas a partir de dados do *International Environmental Agreements Database Project* e da base COMTRADE da ONU, os autores modelaram redes bipartidas conectando países a acordos e fluxos de carbono, transformando-as em redes monopartidas por projeção unipartida. Os resultados indicam uma queda na adequação socioecológica ao longo dos 27 anos analisados, sugerindo a criação de sistemas unificados de comércio de emissões para melhorar a governança dos fluxos de carbono globalizados [Chen and Xu 2024].

O estudo de Zhu et al. 2022, propõe um modelo para análise das transferências de carbono na bacia do Rio Hanjiang, na China, utilizando uma abordagem combinada de modelo de entrada-saída multirregional (MRIO) e análise de redes complexas. O modelo MRIO identifica os fluxos de carbono entre regiões e setores econômicos, enquanto a análise de redes complexas avalia as conexões entre os setores, permitindo uma compreensão mais aprofundada das rotas de transferência de carbono. Os resultados indicam que as indústrias secundárias de Henan desempenham um papel central na pegada de carbono da região. A agregação setorial apresentada pode introduzir imprecisões nos cálculos, sugerindo a necessidade de abordagens mais detalhadas para aprimorar a precisão da contabilização [Zhu et al. 2022].

O estudo de Zhu et al. 2022, investiga a transferência de emissões de carbono incorporado na indústria da construção da China, também utilizando um modelo MRIO combinado com teoria de redes complexas. A pesquisa mapeou as transferências de carbono entre 31 províncias e 28 setores industriais, identificando que os setores de construção, energia e manufatura de materiais de construção são centrais na rede de transferência de carbono. Regiões economicamente desenvolvidas atuam como hubs de carbono, recebendo grandes volumes de emissões transferidas de províncias com infraestrutura industrial consolidada e recursos naturais abundantes [Xiao et al. 2024].

Em outro contexto de aplicação, o trabalho de [Silva et al. 2021] utiliza redes bipartidas para analisar as preferências de leitura no Brasil, explorando como fatores socioeconômicos e demográficos influenciam as escolhas dos leitores. Os resultados indicam maior diversidade interna nas regiões norte e centro-oeste e menor variação cultural nas regiões sul e sudeste. A análise revela identidades culturais distintas entre as regiões, fornecendo subsídios para políticas culturais e estratégias editoriais [Silva et al. 2021].

O trabalho de Mondelli et al. 2019, utiliza redes bipartidas para modelar e analisar a relação entre países e gêneros musicais com base em dados do Spotify, buscando identificar comunidades de países que compartilham preferências musicais semelhantes. Para lidar com a grande diversidade de gêneros, foram considerados apenas os cinco gêneros mais populares em cada país, excluindo gêneros universais como ”pop”e ”latin”. Após a filtragem, foi aplicado o método de Louvain para detectar comunidades musicais regionais, identificando agrupamentos como países latino-americanos e europeus, além de uma comunidade diversificada que reflete padrões culturais e tendências de consumo musical globais [Mondelli et al. 2019].

O artigo de Walter 2021, analisa as emissões de GEE no setor energético brasileiro, abordando sua evolução histórica (2010-2019) e perspectivas futuras até 2030. Utilizando dados do SEEG e da IEA, a análise identifica que o transporte rodoviário é o principal responsável pelas emissões energéticas, seguido pela geração termoelétrica, especialmente em períodos de crise hídrica. O estudo ressalta a necessidade de estratégias que aumentem a eficiência energética e promovam a diversificação da matriz elétrica, diante dos riscos associados às mudanças climáticas e ao crescimento econômico [Walter 2021].

Em Mattei and Da Cunha 2021, os autores utilizam uma abordagem de séries temporais para investigar os determinantes das emissões líquidas de GEE no Brasil entre 1990 e 2017, considerando variáveis como população, PIB per capita, rebanho bovino e frota de veículos. A análise revelou que um aumento de 1% no rebanho bovino está

associado a um acréscimo de 4,41% nas emissões líquidas, enquanto um aumento de 1% na frota de veículos resulta na redução de 2,62% das emissões. O efeito inesperado da frota de veículos foi atribuído à modernização tecnológica e ao contexto econômico do período. O estudo conclui que políticas públicas devem focar na mitigação das emissões da agropecuária, especialmente devido à significativa contribuição do rebanho bovino para as emissões de GEE no Brasil.

Vale destacar que já existem trabalhos que visam contribuir para o gerenciamento de GEE no setor agropecuário por meio de ecossistemas integrados, como os propostos em [Santos et al. 2024, Silva et al. 2024]. Essas iniciativas fazem parte de um esforço mais amplo para desenvolver ecossistemas computacionais voltados para a gestão de emissões de carbono na agropecuária. O trabalho apresentado em [Santos et al. 2024] propõe a ontologia CarbOnto para integração sintática e semântica de dados heterogêneos, promovendo padronização e interoperabilidade na geração de inventários de GEE. Por sua vez, [Silva et al. 2024] utiliza modelos preditivos para estimar emissões na produção pecuária, proporcionando uma visão quantitativa sobre a dinâmica de fermentação entérica. Ambas as abordagens contribuem para um ecossistema modular e extensível, apoiando decisões estratégicas e políticas públicas voltadas para a mitigação das emissões.

Nossa pesquisa pretende contribuir com o estado da arte ao propor uma abordagem integrada que combina a modelagem por redes bipartidas com análises estatísticas, proporcionando uma visão mais abrangente sobre as emissões de carbono no Brasil. Além disso, buscamos avançar metodologicamente ao explorar interações entre estados brasileiros e setores econômicos em uma estrutura unificada, utilizando técnicas de redes complexas. Dessa forma, nossa contribuição se destaca ao unir diferentes metodologias para alcançar um entendimento mais profundo das dinâmicas de emissão e subsidiar políticas públicas mais eficazes de mitigação climática.

3. Modelagem da Rede Bipartida

A modelagem das emissões de GEE utilizando redes bipartidas requer um processo estruturado de tratamento dos dados e definição das relações entre os elementos do sistema. Para representar adequadamente a estrutura das emissões no Brasil, os dados do SEEG são processados e organizados em um modelo de grafos que associa estados brasileiros a setores econômicos emissores. O SEEG é uma plataforma desenvolvida pelo Observatório do Clima para monitorar e disponibilizar informações sobre emissões e remoções de GEE no Brasil [SEEG 2024].

O primeiro passo no tratamento dos dados é a extração e limpeza das informações disponíveis no SEEG. Inicialmente, são removidas inconsistências e valores ausentes, garantindo que apenas registros completos sejam considerados na modelagem. Além disso, os dados são normalizados para permitir comparabilidade entre diferentes períodos e setores. Como critério de padronização, as emissões são expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), considerando fatores de conversão do *Global Warming Potential* (GWP) do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6) [IPCC 2024]. Essa métrica permite avaliar o impacto relativo de diferentes gases de efeito estufa sob um mesmo referencial.

Após a padronização, os dados são filtrados para incluir apenas as emissões de

CO_2e (t) GWP-AR6, assegurando um nível de comparabilidade adequado entre setores e períodos históricos. Além disso, são removidas as emissões classificadas como *Bunker*, que representam combustíveis utilizados no transporte internacional (aviação e navegação), pois esses valores não são atribuídos a estados brasileiros nem contabilizados no total nacional [SEEG 2024].

Para facilitar a análise das tendências temporais das emissões, os dados foram agrupados em intervalos de dez anos, permitindo uma avaliação consolidada das mudanças estruturais na rede ao longo do tempo. Os períodos considerados foram: 1973–1982, 1983–1992, 1993–2002, 2003–2012 e 2013–2022. Para cada intervalo, foi calculada a média das emissões registradas nos anos correspondentes, reduzindo a volatilidade dos dados anuais e proporcionando uma visão mais clara da evolução dos padrões de emissão. Essa abordagem permite identificar tendências mais amplas e avaliar os impactos de políticas ambientais ao longo das décadas.

A próxima etapa envolve a segmentação dos dados por atividade geral. O SEEG categoriza as emissões em dezessete setores: Agricultura, Pecuária, Silvicultura, Agropecuária (finalidade não identificada), Cimento, Edificações, Geração de eletricidade, Metalurgia, Outras Matérias Primas e Indústrias, Produção de Combustíveis, Química, Transporte de Carga, Transporte de Passageiros, Outros (geral), Vegetação Nativa, Produção Industrial e Saneamento Básico.

Com os dados filtrados e organizados, a estrutura bipartida da rede é definida. Formalmente, a rede bipartida é definida pelo grafo da Equação 1. $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_n\}$ é o conjunto de estados, $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_m\}$ é o conjunto de setores econômicos e E é o conjunto de arestas, definidas como pares ordenados $(u_i, v_j) \in E$, sendo $u_i \in U$ e $v_j \in V$. O peso das arestas é definido pela Equação 2, sendo $w_{ij} \geq 0$.

$$G = (U, V, E), \tag{1}$$

$$A_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & \text{se o estado } u_i \text{ possui emissões associadas ao setor } v_j, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{2}$$

O peso w_{ij} atribuído a cada aresta (u_i, v_j) corresponde ao volume total de emissões de GEE associadas ao setor econômico v_j no estado u_i em um determinado ano.

4. Análise e Resultados

O processamento dos dados, e o desenvolvimento e análise da rede bipartida foram realizados utilizando bibliotecas especializadas para manipulação e visualização de redes. O processamento dos dados é realizado em *Python*, empregando pacotes como *pandas* para manipulação tabular e *networkx* para a construção da estrutura de rede. Todo o código fonte está disponível no repositório *GitHub*[1].

[1]https://github.com/PedroAssisDev/brazil-GHG-bipartite-networks

A análise da rede bipartida das emissões de GEE no Brasil permite compreender a evolução das conexões entre setores econômicos e estados ao longo do tempo. Através do modelo proposto, foi possível identificar diferenças na distribuição das emissões entre setores e regiões do país. Alguns estados apresentam maior centralidade na rede, conectando-se a múltiplos setores, enquanto outros possuem um impacto mais restrito. Da mesma forma, determinados setores econômicos possuem maior peso na estrutura das emissões, refletindo a dinâmica econômica e as transformações ocorridas ao longo das décadas.

Nos tópicos seguintes, apresentamos uma análise detalhada de cada período, destacando os setores e estados mais influentes, as mudanças estruturais e transformações econômicas na configuração das emissões de GEE no Brasil.

4.1. Rede Bipartida de 1973–1982

A análise da rede bipartida para o período de 1973 a 1982 revela uma estrutura amplamente conectada entre setores emissores e estados brasileiros (Figura 1). O grau ponderado médio dos setores foi 26,18, enquanto o grau ponderado médio dos estados foi 16,48, sugerindo que as emissões estavam distribuídas entre diferentes regiões e atividades econômicas. Foi utilizado o grau ponderado médio pois as conexões entre os nós possuem diferentes níveis de intensidade, representadas pelos pesos nas arestas.

Entre os setores com maior grau ponderado na rede, destacam-se Saneamento Básico (30,20), Transporte de Carga (29,04) e Metalurgia (28,14). Esses setores tiveram um impacto significativo nas emissões, impulsionados pela expansão da infraestrutura urbana e demanda por transporte rodoviário. Em contraste, a Produção de Combustíveis apresentou menor grau ponderado na rede, indicando uma contribuição menos expressiva em relação a outros setores industriais e de serviços dessa época.

Os estados que registraram os maiores pesos na rede foram São Paulo (20,36), Minas Gerais (18,93) e Rio de Janeiro (18,30). São Paulo teve a maior participação nas emissões, impulsionado pelo setor químico, saneamento e transporte de carga. Minas Gerais destacou-se com fortes emissões nos setores metalúrgico (1,59), cimento (1,55) e saneamento básico (1,32), refletindo a intensa atividade industrial e construção civil no estado. No Rio de Janeiro, as emissões foram lideradas por saneamento básico (1,44), metalurgia (1,25) e cimento (1,22), evidenciando a importância da infraestrutura urbana e industrial no perfil das emissões do estado. Em contrapartida, estados como Amapá (15,01) e Roraima (15,00) apresentaram os menores pesos, refletindo uma menor participação na estrutura nacional de emissões.

Os resultados dessa década apontam para um cenário dominado pelo crescimento industrial e urbano, com emissões concentradas nos setores de infraestrutura, transportes e indústria de base, principalmente nos estados economicamente mais desenvolvidos. Essa estrutura reflete o padrão de crescimento econômico do Brasil na época, marcado pela expansão da indústria e aumento da urbanização.

4.2. Rede Bipartida de 1983–1992

A rede bipartida do período de 1983 a 1992 se manteve altamente conectada assim como na década anterior. Entretanto, observa-se uma mudança nos setores com maiores impactos, sendo Pecuária (41,71), Transporte de Carga (39,33) e Metalurgia (37,32).

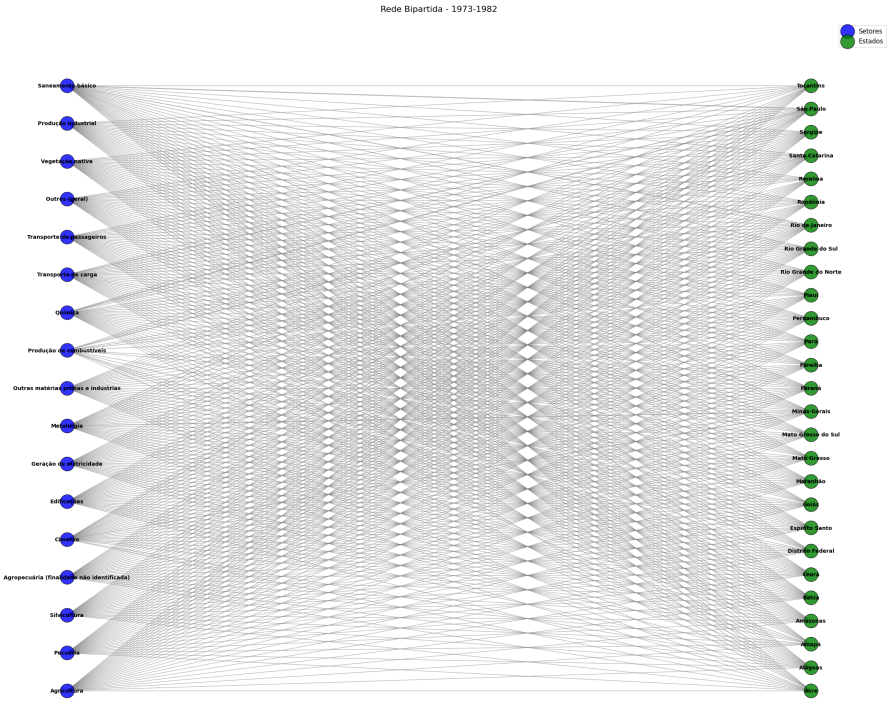

Figura 1. Rede Bipartida - 1973-1982.

O crescimento do setor de pecuária reflete a expansão da agropecuária no Brasil, impulsionada pela ampliação das áreas de pastagem e pelo crescimento da produção de carne. O transporte de carga também apresentou um aumento expressivo, indicando o impacto da ampliação da malha rodoviária e a maior dependência do modal rodoviário para o escoamento da produção nacional. Já a metalurgia manteve um peso significativo, impulsionada pelo aumento da produção siderúrgica e pela crescente demanda por insumos industriais.

Embora os setores com maiores impactos tenham mudado, os estados com maior emissão de GEE se mantiveram, porém com mais impacto de na emissão de GEE do que na década anterior, São Paulo (26.69), Minas Gerais (24,92) e Rio de Janeiro (23,76).

São Paulo continuou sendo o maior emissor, impulsionado principalmente pelos setores de transporte de carga (2,68), saneamento básico (2,13) e metalurgia (2,02). Minas Gerais manteve sua posição de destaque devido à forte presença dos setores metalúrgico (2,42), transporte de carga (1,97) e cimento (1,64), refletindo a expansão da construção civil e da indústria pesada no estado. Já no Rio de Janeiro, as emissões foram lideradas por metalurgia (2,16), saneamento básico (1,67) e transporte de carga (1,66), reforçando o impacto da infraestrutura urbana e industrial no perfil das emissões estaduais. Os estados com menor peso na rede continuaram sendo Amapá (18,73) e Roraima (18,76), refletindo sua menor participação na estrutura de emissões do país.

A análise dessa década indica um fortalecimento do setor agropecuário e industrial, com um aumento das emissões relacionadas à pecuária, transporte e infraestrutura urbana. O crescimento das emissões nos estados do Sudeste e Centro-Oeste reforça a necessidade de estratégias de mitigação regionais, considerando a predominância de dife-

rentes setores na dinâmica emissora de cada estado.

4.3. Rede Bipartida de 1993–2002

Assim como nos anos anteriores a rede bipartida continua altamente conectada no período de 1993 a 2002. Porém, é possível observar um forte aumento na emissão de GEE nos setores mais impactantes, Pecuária (77,38), Transporte de Carga (54,44) e Saneamento Básico (54,10).

A pecuária consolidou-se como a principal fonte de emissões no período, impulsionada pela expansão das áreas de pastagem e pelo crescimento das exportações de carne. O setor de transporte de carga também registrou um aumento expressivo, refletindo a maior dependência da malha rodoviária para o escoamento da produção nacional. Já o saneamento básico ganhou relevância, indicando o impacto da infraestrutura urbana e do crescimento populacional nas emissões dessa década.

No cenário da década de 1993–2002 os estados com maior peso na rede foram Mato Grosso (40,17), Pará (38,78) e São Paulo (35,23).

A principal mudança desse período foi a ascensão de Mato Grosso e Pará como os maiores emissores. Esse efeito reflete o avanço do desmatamento e da agropecuária na Amazônia e no Cerrado, impulsionados pelo crescimento da demanda global por carne e soja. Mato Grosso destacou-se pelas emissões da pecuária (9,47), agricultura (2,84) e outras atividades agropecuárias (2,07). Enquanto no Pará a pecuária (9,49) e a agropecuária de finalidade não identificada (2,02) tiveram grande impacto.

São Paulo, apesar de não ser o estado com maior emissão, manteve um peso significativo na rede, impulsionado pelos setores de agricultura (2,31), transporte de passageiros (2,28) e transporte de carga (2,26), refletindo sua posição como centro logístico e industrial do país. Os estados com menores pesos permaneceram Amapá (29,61) e Roraima (29,78), indicando uma participação mais reduzida nas emissões nacionais.

A análise desse período revela um deslocamento das emissões para estados ligados à agropecuária, enquanto setores urbanos e logísticos continuaram relevantes nos grandes centros. Esse cenário reforça a necessidade de estratégias regionais específicas para mitigação, considerando a predominância de diferentes setores econômicos nas emissões de cada estado.

4.4. Rede Bipartida de 2003–2012

No período de 2003 a 2012 a rede se manteve com alta conectividade. Os setores com maior peso na rede foram a Pecuária (116,67), Transporte de Carga (101,48) e Geração de Eletricidade (100,37).

O setor de pecuária manteve-se como o principal emissor da rede. Transporte de carga também apresentou um aumento expressivo, refletindo a ampliação da malha rodoviária e o maior consumo de combustíveis fósseis. Além disso, a geração de eletricidade consolidou-se como um dos setores mais emissores, indicando um crescimento na dependência de termelétricas movidas a carvão e óleo diesel para suprir a demanda energética.

Os estados que registraram os maiores pesos na rede foram São Paulo (64,81), Maranhão (64,76) e Minas Gerais (64,51). São Paulo manteve-se como um grande emis-

sor de GEE, impulsionado pelas emissões dos setores de transporte de passageiros (4,12), transporte de carga (4,10) e saneamento básico (3,98), reforçando sua posição como centro logístico e urbano de grande impacto ambiental. O Maranhão emergiu como um dos maiores emissores, refletindo o avanço do desmatamento e da agropecuária, com destaque para pecuária (5,16), agricultura (3,92) e vegetação nativa (3,79), evidenciando a crescente conversão de áreas naturais para a produção agropecuária. Em Minas Gerais os setores de agricultura (4,24), metalurgia (4,01) e pecuária (3,93) foram os principais emissores, refletindo a influência do agronegócio e da indústria metalúrgica na composição das emissões do estado. Os estados com menores pesos permaneceram Amapá (55,16) e Roraima (55,41), mantendo um impacto reduzido na rede de emissões.

A análise desse período destaca a expansão do setor agropecuário e de transportes como principais responsáveis pelo aumento das emissões, além do crescimento das atividades ligadas ao desmatamento em estados do Norte e Nordeste. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias específicas para reduzir as emissões em setores-chave e regiões críticas, considerando a diversificação das fontes emissoras e a transição para práticas mais sustentáveis.

4.5. Rede Bipartida de 2013–2022

A análise da rede bipartida no último período dos dados revela um crescimento contínuo nas emissões associadas aos principais setores econômicos do Brasil (Figura 2).

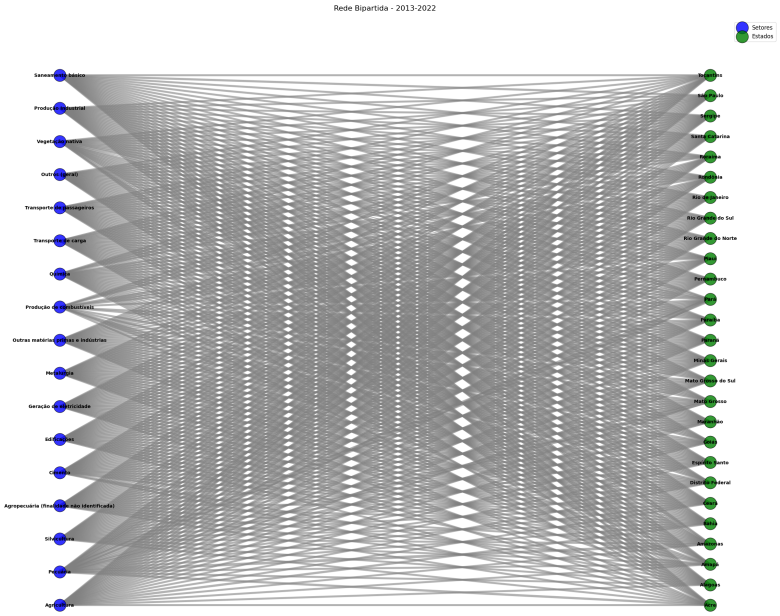

Figura 2. Rede Bipartida - 2013-2022.

Os setores com maior peso na rede foram Pecuária (130,33), Transporte de Carga (116,68) e Geração de Eletricidade (115,69).

A pecuária manteve-se como o principal setor emissor, refletindo a contínua expansão da atividade agropecuária no Brasil, impulsionada pela demanda global por carne bovina e pela conversão de áreas naturais em pastagens. O transporte de carga também

apresentou um aumento expressivo. A geração de eletricidade consolidou-se como um dos setores de maior impacto na rede, impulsionada pelo uso de termelétricas movidas a combustíveis fósseis, especialmente durante períodos de crise hídrica.

Os estados com maior peso na rede foram São Paulo (74,22), Maranhão (73,88) e Minas Gerais (73,71). São Paulo manteve-se como o maior emissor, impulsionado pelos setores de transporte de passageiros (4,75), transporte de carga (4,73) e saneamento básico (4,59). O Maranhão apresenta forte presença de pecuária (5,38), agricultura (4,57) e geração de eletricidade (4,35). Minas Gerais seguiu entre os maiores emissores, com destaques para agricultura (4,75), metalurgia (4,56) e transporte de carga (4,51), reforçando a importância da mineração, da indústria e da logística no perfil das emissões do estado. Os estados com menores pesos permaneceram Amapá (63,26) e Roraima (63,72), mantendo o padrão das décadas anteriores, com menor participação relativa nas emissões nacionais.

A análise dessa década reforça a tendência de crescimento das emissões no setor de transporte e saneamento, ao mesmo tempo em que destaca o forte impacto da agropecuária e da geração de eletricidade em estados do Norte e Nordeste. Esses resultados evidenciam a necessidade de estratégias diferenciadas para a redução das emissões, considerando as particularidades regionais e setoriais, bem como a adoção de soluções voltadas para a transição energética e o desenvolvimento sustentável das cadeias produtivas.

5. Discussão dos Resultados

A evolução das emissões de GEE no Brasil ao longo das últimas cinco décadas revela mudanças estruturais na distribuição das fontes emissoras entre estados e setores econômicos. A modelagem por redes bipartidas permitiu identificar padrões de conectividade que refletem transformações significativas no uso da terra, na economia e na matriz energética do país. As análises destacam o deslocamento das emissões de regiões industrializadas para áreas de expansão agropecuária e a crescente importância do setor energético.

A análise dos pesos médios dos estados (Figura 3) mostra que, até os anos 1990, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro lideravam as emissões, impulsionados pelo setor industrial, infraestrutura urbana e consumo energético. No entanto, a partir dos anos 2000, houve um deslocamento das emissões para estados do Norte e Centro-Oeste, como Mato Grosso e Pará, impulsionado pela intensificação do desmatamento e da agropecuária. Esse fenômeno está diretamente associado ao aumento da demanda global por commodities agrícolas, como carne e soja, e às políticas de incentivo à produção rural.

A análise dos setores emissores (Figura 4) reforça essa mudança. Até os anos 1990, setores industriais e de transporte eram os principais emissores, refletindo um modelo de desenvolvimento econômico baseado na industrialização e no crescimento urbano. A partir dos anos 2000, a pecuária tornou-se o setor de maior peso na rede, evidenciando o impacto da conversão de florestas em pastagens. Esse processo foi impulsionado pela expansão da fronteira agrícola e pela fragilidade na fiscalização ambiental, que resultou em elevadas taxas de desmatamento, especialmente na Amazônia Legal.

Nos últimos anos, a geração de eletricidade também ganhou relevância, com o aumento do uso de termoelétricas movidas a combustíveis fósseis para suprir a crescente demanda energética. A intermitência na produção hidrelétrica, agravada por períodos de

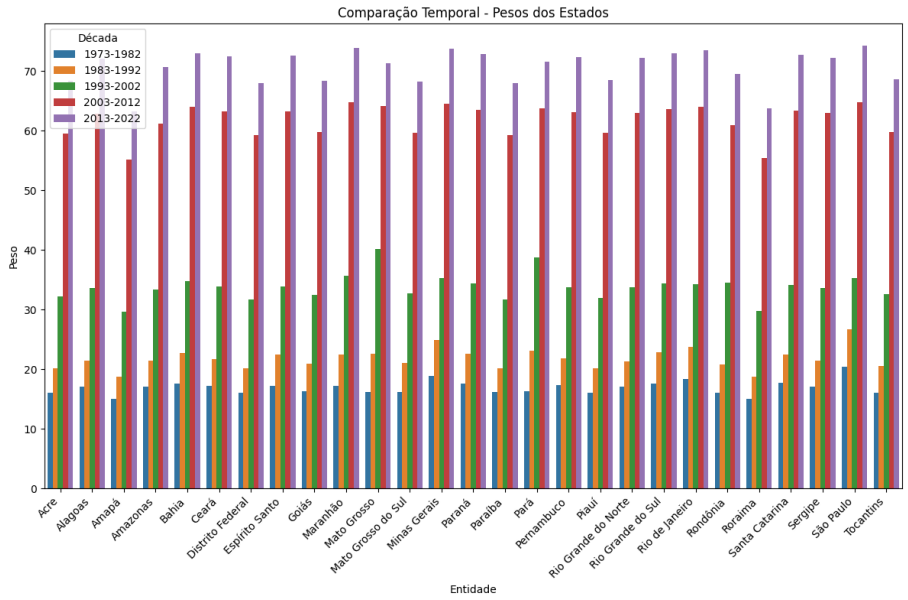

Figura 3. Comparação Temporal dos Pesos dos Estados ao longo das Décadas.

crise hídrica, levou ao acionamento de fontes mais poluentes, contribuindo para o aumento das emissões do setor.

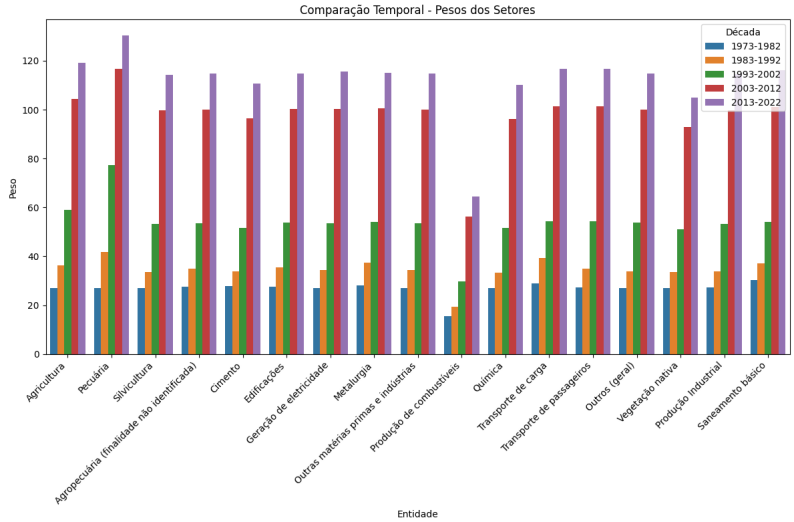

Figura 4. Comparação Temporal dos Pesos dos Setores Econômicos ao longo das Décadas.

Além do crescimento absoluto das emissões em todos os setores e estados, a análise das redes bipartidas revela mudanças na conectividade e na centralidade dos nós ao longo das décadas. O grau ponderado médio dos setores e estados manteve-se relativamente estável (26,18 e 16,48, respectivamente), indicando que o número médio de conexões entre setores e estados não variou significativamente. No entanto, os pesos das arestas cresceram, refletindo o aumento da intensidade das emissões associadas a cada conexão.

A centralidade de grau dos estados emissores, considerando o peso das arestas,

mudou ao longo do tempo: São Paulo manteve-se como um nó central até os anos 1990, mas nas décadas mais recentes, Mato Grosso e Pará passaram a ocupar essa posição, indicando uma transição do epicentro das emissões para regiões de forte impacto agropecuário.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este estudo propôs a modelagem das emissões de GEE no Brasil utilizando redes bipartidas para a identificação de padrões estruturais e temporais na relação entre estados e setores econômicos emissores. A análise revelou mudanças na dinâmica das emissões ao longo das décadas, destacando a transição do protagonismo dos centros urbanos-industriais para estados fortemente ligados à agropecuária e ao desmatamento.

Os resultados revelam uma mudança no perfil das emissões de GEE no Brasil, até os anos 1990, setores industriais e de transporte predominavam, enquanto a partir dos anos 2000 a pecuária e a geração de eletricidade assumiram papéis centrais, refletindo alterações na matriz econômica e energética. Observou-se também uma maior concentração das emissões em estados como Mato Grosso e Pará, o que destaca a importância de estratégias regionais específicas.

Ainda que os achados sejam relevantes, o estudo apresenta limitações. O uso de médias decenais pode ocultar variações importantes em períodos de tempo menores, e a análise não considera fatores externos, como políticas específicas ou eventos climáticos extremos, que também impactam os padrões de emissão.

Respondendo a questão de pesquisa deste estudo, é possível afirmar que o uso de redes bipartidas na modelagem das emissões de GEE no Brasil auxilia na análise da evolução das emissões. Essa abordagem evidencia mudanças significativas nos setores econômicos responsáveis pelos maiores impactos nas emissões. A análise através da modelagem de redes bipartidas fornece uma base sólida para políticas públicas mais eficientes e adaptadas à realidade de cada região e setor econômico, contribuindo para ações climáticas mais eficazes.

Dada a relevância do problema e as possibilidades de aprofundamento, algumas direções futuras podem ser exploradas. A análise da modularidade da rede pode auxiliar na identificação de agrupamentos regionais e setoriais de emissões, revelando conexões estruturais ainda não exploradas. A integração com modelos preditivos baseados em técnicas de aprendizado de máquina pode aprimorar a análise ao prever tendências futuras de emissões com base na evolução das interações entre estados e setores. Além disso, a validação dos resultados com dados de inventários estaduais e setoriais, além do SEEG, pode proporcionar uma visão mais granular das emissões, permitindo uma análise ainda mais detalhada das variações espaciais e setoriais.

Agradecimento

Profs. X e Y agradecem o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a bolsa de produtividade e pesquisa 313568/2023-5 (PQ-2) e 307194/2022-1 (PQ-2), respectivamente. Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

Referências

Chen, M. and Xu, Z. (2024). Assessing socio-ecological fit of international environmental agreements and trade-embodied carbon flows. *Environmental Impact Assessment Review*, 106:107534.

IEMA (2020). As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de energia e de processos industriais em 2019. `https://energiaeambiente.org.br`. Acessado em 15 de março de 2025.

IPCC (2024). *Assessment Reports (AR2, AR4, AR5, AR6)*. IPCC. Acesso em: 12 dez. 2024.

Mondelli, M. L. B., Gadelha Jr, L. M., and Ziviani, A. (2019). O que os países escutam: Analisando a rede de gêneros musicais ao redor do mundo. *iSys-Brazilian Journal of Information Systems*, 12(3):53–72.

Santos, L., Braga, R., Maria David, J. N., and Ströele, V. (2024). Carbonto: Data integration toward net zero. *IEEE Access*, 12:148783–148795.

SEEG (2024). Seeg - sistema de estimativa de emissões de gases de efeito estufa. Acesso em: 12 dez. 2024.

Silva, M., Scofield, C., Oliveira, G., Seufitelli, D., and Moro, M. (2021). Exploring brazilian cultural identity through reading preferences. In *Anais do X Brazilian Workshop on Social Network Analysis and Mining*, pages 115–126, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

Silva, P., Braga, R., David, J., Neto, V., Arbex, W., and Stroele, V. (2024). Carbonseco for livestock: A service suite to help in carbon emission decisions. In *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 2: ICEIS*, pages 89–99. INSTICC, SciTePress.

Walter, A. (2021). Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no brasil. *Revista Brasileira de Energia, Campinas*, 27(3):1–9.

Xiao, W., Fu, X., Song, W., and Wang, L. (2024). Complex network analysis of embodied carbon emission transfer in china's construction industry. *Frontiers in Environmental Science*, 12:1409539.

Zhu, K., Liu, Q., Xiong, X., Zhang, Y., Wang, M., and Liu, H. (2022). Carbon footprint and embodied carbon emission transfer network obtained using the multi–regional input–output model and social network analysis method: a case of the hanjiang river basin, china. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10:941520.