

DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO E EMISSÕES DE CO₂ NOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS *SOCIOECONOMIC DEVELOPMENT AND CO₂ EMISSIONS IN BRAZILIAN MUNICIPALITIES*

Jaqueline Silva Magalhães

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados (PPGAgronegócios/UFGD)
jaqueline.s.magalhaes@hotmail.com

Paulo Henrique Hoeckel

Professor do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados (PPGAgronegócios/UFGD) e do Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento da Universidade Federal de Santa Maria (PPGE&D/UFSM)
ph.hoeckel@gmail.com

Grupo de Trabalho (GT): GT04. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo: O presente estudo buscou analisar a relação entre as emissões de dióxido de carbono (CO₂) nos municípios brasileiros e o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) e o Produto Interno Bruto (PIB) no ano de 2018, utilizando a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) para identificar a formação de *clusters* espaciais. Pode-se verificar relações de dependência espacial positiva e negativa para os municípios brasileiros, indicando que as emissões de CO₂ estão associadas de forma significativa aos níveis de renda e de desenvolvimento econômico dos municípios. Como principal evidência, pode-se destacar que o desenvolvimento econômico municipal desempenha um papel importante na mitigação das emissões de CO₂ e que estar rodeado de municípios próximos com um elevado desenvolvimento pode melhorar o desempenho ambiental de um município.

Palavras-chave: Emissões de CO₂. Desenvolvimento Regional. Dados Espaciais.

Abstract: The present study sought to analyze the relationship between carbon dioxide (CO₂) emissions in Brazilian municipalities and the Firjan Municipal Development Index (IFDM) and the Gross Domestic Product (GDP) in 2018, using Exploratory Spatial Data Analysis (AEDE) to identify the formation of spatial clusters. Positive and negative spatial dependence relationships can be verified for Brazilian municipalities, indicating that CO₂ emissions are significantly associated with the municipalities' income levels and economic development. As the primary evidence, it can be highlighted that municipal economic development plays a vital role in mitigating CO₂ emissions and that being surrounded by nearby municipalities with high development can improve the environmental performance of a municipality.

Keywords: CO₂ Emissions. Regional Development. Spatial Data.

1. Introdução

A economia mundial tem atravessado um período de alto desenvolvimento tecnológico nas últimas décadas que impulsionou o crescimento econômico, acarretando benefícios no nível de renda, ciência e tecnologia de diversas nações. No entanto, os impactos ambientais, como a alteração da estrutura climática do planeta, também foram intensificados, ocasionando ainda

mais preocupação em relação ao aquecimento global e o bem-estar das pessoas (Salmi; Canova; Padgurschi, 2023).

O Brasil ocupa a sétima posição entre os dez países mais poluidores no mundo, conforme Climate Watch (2023), referente ao ano 2020, sendo os países detentores das primeiras posições: China (1º), Estados Unidos (2º), Índia (3º), Rússia (4º), Indonésia (5º), Japão (6º), Irã (8º), República Democrática do Congo (9º) e Alemanha (10º).

No que se refere aos períodos de crescimento em relação ao nível de poluição, Stern (2004) relata que nos primeiros períodos do crescimento econômico há um aumento na poluição intensamente, ocorrendo assim a degradação ambiental, contudo este crescimento alcança um determinado nível, que seria a de “país desenvolvido”, ocorrendo o inverso desse comportamento através de avanços tecnológicos que busquem atenuar os danos ambientais e sejam sustentáveis.

No que refere às emissões de gases de efeito estufa no Brasil, o total de emissões brutas atingiu 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂e) em 2020, sendo que no ano anterior foi de 1,97 bilhão de toneladas (SEEG, 2021), um aumento de aproximadamente 9,6%. Em relação às categorias, em 2022, Mudança de Uso da Terra e Floresta ficou em 1º lugar com 1.119.668.385 GtCO₂e, seguido de Agropecuária com 617.204.37 GtCO₂e e Energia 412.486.071 GtCO₂e (SEEG, 2022).

Nesse sentido, entender esses efeitos ao nível regional mais desagregado possível se torna fundamental para que políticas públicas focalizadas possam contribuir para alterar a estrutura comportamental vigente, buscando reduzir as externalidades negativas que contribuem para o aquecimento global, como a redução das emissões de CO₂, aliando o desenvolvimento socioeconômico a melhores níveis ambientais nos municípios do Brasil, reduzindo assim a punção sobre o desgaste ambiental. Para avaliar o crescimento econômico é necessário utilizar um indicador como o Produto Interno Bruto (PIB), utilizado na forma per capita. Quanto ao desenvolvimento o indicador utilizado neste estudo é o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM).

Portanto, o objetivo da presente pesquisa é analisar espacialmente a possível existência de relação entre crescimento e desenvolvimento econômico com os níveis de emissões de CO₂ dos municípios brasileiros, buscando identificar possíveis formações de *clusters*, tendo a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) como ferramenta de avaliação. Para tanto, serão utilizados os dados de emissão de CO₂ publicados pelo Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito (SEEG), conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) atribuídos por setor e municípios.

2. Revisão De Literatura

2.1 Emissão de dióxido de carbono, cooperação internacional e legislação brasileira

A cooperação internacional na busca de soluções para as mudanças climáticas teve início com a Primeira Conferência Mundial do Clima, organizada pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, na sigla em inglês) em 1979 e em 1988 houve a convocação dos governadores e sociedade através da Assembleia Geral das Nações Unidas (UNGA, na sigla em inglês), por meio da Resolução 43/53 (*Protection of Global Climate Change for Present and Future Generations of Mankind*), tendo como objetivo a luta para impedir essas mudanças (Prolo et al., 2021).

Com a criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a WMO, para rever as evidências científicas e realizar orientações para nas políticas climáticas internacionais e domésticas, sendo que em seus relatórios são observados as avaliações científicas em mudanças climáticas de nível internacional e são realizados através do envolvimento de vários cientistas

e governos dos 196 países membros da ONU, assim o IPCC se refere a uma revisão científica das pesquisas relacionadas mundialmente (Prolo *et al.*, 2021).

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a partir da década de 90, houve os anos mais quentes ao decorrer dos últimos 1.000 anos, observando ainda que há uma tendência nos 100 anos seguintes, uma elevação na temperatura global entre 1,8° a 4,0°C e no que refere ao nível do mar, um aumento de entre 0,18 m e 0,59 m (INPE, 2022).

O desenvolvimento sustentável é um objetivo global para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Umar *et al.*, 2020). Por ser signatário do Acordo de Paris (COP 15), o Brasil produziu sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) que é regulada pela Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), Lei 12.187 de dezembro de 2009 (Brasil, 2009).

Diante da comunicação ao Secretariado da UNFCCC, sobre a NDC, atualizada no contexto do Pacto do Clima de Glasgow, durante a 26ª Conferência das Partes, o Brasil confirmou a meta na redução de suas emissões de gases de efeito estufa de 37% em 2025, em relação a 2005 (UNFCCC, 2023).

Em termos de legislação nacional, o Brasil possui o Renovabio, que é a Política Nacional de Biocombustíveis, criada pela Lei nº 13.576/2017. Conforme prevê o Ministério de Minas e Energia (2023), esta política de Estado tem o encargo estratégico dos biocombustíveis (etanol, biodiesel, biometano, bioquerosene, segunda geração, entre outros) na matriz energética brasileira, referindo-se à segurança energética, previsibilidade do mercado e a mitigação de emissões que contribuem para o efeito estufa no setor de combustíveis.

Em 2015 foram instituídos os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) que integram o Protocolo Internacional da ONU, sendo que essas ODS compõem a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (Nações Unidas, 2015; MME; EPE, 2021). Mais recentemente na COP 27, o Brasil se destacou por deter uma das matrizes elétricas mais limpas, possuindo 85% de fontes renováveis, sendo que a média do restante do planeta é de 28% (Brasil, 2022).

A adoção de tecnologias para expandir a eficiência energética são necessárias para a menor utilização do consumo de combustível fóssil, visando atender os objetivos de desenvolvimento sustentável, seja o relacionado à energia limpa e acessível (ODS 7)¹ e ação contra a mudança global do clima (ODS 13)² (Dai *et al.*, 2023).

2.2 Emissões de dióxido de carbono, questões ambientais, Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) e Produto Interno Bruto (PIB)

O desenvolvimento socioeconômico é conceituado como um processo não mensurável, entretanto, existem indicadores socioeconômicos que auxiliam como mecanismo para estimar esse processo, sendo os mais conhecidos o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) (Schlindwein; Cardoso; Shikida, 2014).

No cenário brasileiro, o IFDM, que surgiu em 2008, é um indicador que monitora o desenvolvimento dos 5.565 municípios brasileiros a partir de 2000, servindo desta maneira como um indicador para mensurar a qualidade de vida, que abrange o período anual dos municípios e é composto de três áreas do desenvolvimento humano, sendo estes: emprego e renda; educação; e saúde. (Pereira; Moreira, 2016; Postali; Nishijima, 2011).

Stern (2004) sugere que no início do crescimento econômico é intensa a poluição e degradação ambiental, até o ponto de país desenvolvido ser atingido, pois existem recursos necessários para regredir esta degradação. Adedoyin *et al.* (2021) ao analisarem a política

¹ Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos.

² Objetivo 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.

econômica no nexo energia crescimento-emissões para 32 países da África Subsaariana evidenciam que o PIB real e a geração de energia não renovável elevam as emissões de CO₂.

Por fim, diante do problema de pesquisa apresentado e da literatura estudada, verifica-se que existem ainda evidências necessárias em relação ao entendimento do crescimento e desenvolvimento econômico, associado à emissão de CO₂ em níveis regionais, mais especificamente municípios.

3. Metodologia

3.1 Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE)

A AEDE permite, portanto, detectar as dependências espaciais, isto é, reconhecer as localidades que sofrem ação de localidades vizinhas, sendo dessa maneira a autocorrelação validada quando para os valores do atributo de uma determinada região há dependência desse atributo nas regiões adjacentes, formando assim *clusters* espaciais (Almeida, 2012; Pellenz; Puchale, 2018; Hoeckel; Casagrande; Santos, 2019; Batistella *et al.*, 2019). Assim, torna-se possível analisar o crescimento e desenvolvimento regional e sua associação espacial com questões ambientais, como a emissão de CO₂.

A noção de matriz de pesos espaciais é apoiada na vizinhança e assim, podendo ser determinada conforme a imediação, espaço geográfico e socioeconômico, assim como o arranjo disso (Almeida, 2012). Para implementar a AEDE, assim como para aplicar as técnicas de econometria espacial, é preciso, primeiramente, definir uma matriz de pesos espaciais (W)³. Essa matriz é a forma de se expressar um determinado arranjo espacial das interações resultantes do fenômeno a ser estudado⁴.

Portanto, a escolha da matriz de pesos espaciais é muito importante em uma AEDE, uma vez que os resultados da análise são sensíveis a tal seleção. A matriz de peso espacial W , a ser utilizada na presente pesquisa está baseada na ideia dos k vizinhos mais próximos, e é calculada via utilização da métrica baseada no grande círculo entre os centros das regiões. A matriz de pesos espaciais é expressa como:

$$w_{ij}(k) = 0 \text{ se } i = j$$

$$w_{ij}(k) = 1 \text{ se } d_{ij} \leq D_i(k) \text{ e } w_{ij}(k) = \frac{w_{ij}(k)}{\sum_j^i w_{ij}(k)} \text{ para } k = 1, 2, \dots, n(1)$$

$$w_{ij}(k) = 0 \text{ se } d_{ij} > D_i(k)$$

Em que d_{ij} é a distância, medida pelo grande círculo, entre os centros das regiões i e j . $D_i(k)$ denota um valor crítico que define o valor de corte para cada região, ou seja, a distância máxima para considerar regiões vizinhas à região i . Ou seja, distâncias acima deste ponto não serão tomadas como vizinhas da região em questão (Almeida, 2012).

O índice de Moran (I de Moran) mede a autocorrelação espacial, que pode ser definida como a coincidência de similaridade de valores com a similaridade de localização (Anselin, 2001; Le Gallo; Ertur, 2003; Almeida, 2012). Portanto, a dependência espacial retrata uma situação em que os valores observados em uma região dependem dos valores observados nas regiões vizinhas.

³ A matriz de pesos espaciais é uma matriz quadrada ($n \times n$) que contém os pesos espaciais de cada unidade sobre outra. Assim, o elemento w_{ij} indica o peso espacial que a unidade j exerce sobre a unidade i . Quando a matriz W é construída, independente do critério utilizado, ela é tratada como um fator exógeno (Hoeckel; Casagrande; Santos, 2019).

⁴ Por exemplo, é razoável supor que, no estudo de vários fenômenos, regiões vizinhas tenham uma interação mais forte entre si do que com regiões que não são contíguas. De modo similar, regiões distantes entre si tendem a ter uma interação menor. Nesse caso, em que a distância entre as regiões importa na definição da força da interação, seria possível construir uma matriz W baseada na distância inversa entre as regiões a fim de capturar tal arranjo espacial da interação (Almeida; Perobelli; Ferreira, 2008).

Essa estatística fornece a indicação formal do grau de associação linear entre os vetores de valores observados de uma variável de interesse no tempo t (e_t) e a média ponderada dos valores da vizinhança, ou as defasagens espaciais (We_t). Valores de I maiores (ou menores) do que o valor esperado $E(I) = \frac{-1}{(n-1)}$ significam que há autocorrelação positiva (ou negativa). Caso os valores de I forem próximos de zero, eles indicam a ausência de um padrão espacial dos dados. Ou seja, a inexistência de autocorrelação espacial (Anselin, 1988).

Conforme Anselin (1999), o teste de I de Moran Global (univariado) trata-se de um teste referente a autocorrelação espacial entre vizinhos mais adjacentes, assumindo a seguinte forma:

$$I = \left(\frac{n}{S_0} \right) \left(\frac{e'_t W e_t}{e'_t e_t} \right) \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Em que e_t é o vetor de n observações para o ano t na forma de desvio em relação à média. Mais uma vez, W é a matriz de pesos espaciais, sendo que os elementos w_{ii} na diagonal são iguais a zero, enquanto os elementos w_{ij} indicam a forma como a região i está espacialmente conectada com a região j . O termo S_0 é um escalar igual à soma de todos os elementos de W .

Assim, a autocorrelação espacial positiva (negativa) indica que microrregiões (municípios) que apresentam elevado (baixo) nível de emissões de CO₂ são vizinhas de outras microrregiões (municípios) que também apresentam elevado (baixo) nível de emissões de CO₂, como utilizado por Zhao *et al.* (2014) para mensurar a intensidade de emissões de CO₂ para a China. O mesmo é válido para o nível do IFDM.

Os padrões globais detectam a autocorrelação espacial para todo o espaço analisado. O problema do I de Moran Global é que ele pode esconder padrões locais ou ser influenciado por eles. Para superar esses problemas estatísticos se torna imprescindível verificar a formação de *clusters* e/ou agrupamentos (Anselin; Florax, 1995; Almeida, 2012). Para tanto, utiliza-se, uma decomposição em categorias do indicador I de Moran, definido como I de Moran Local (*Local Indicators of Spatial Association - LISA*), dado por:

$$I_i = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_j w_{ij} (y_j - \bar{y})}{\frac{\sum_i w_{ij} (y_i - \bar{y})^2}{n}} = e_i \sum_j w_{ij} e_j / \sum_i e_i^2 \quad (3)$$

Em que e_i e e_j são variáveis padronizadas e o somatório sobre j é tal que somente os valores dos vizinhos $j \in J_i$ são incluídos. O conjunto J_i abrange os vizinhos da observação i . Conforme Almeida (2012), o indicador LISA provê uma indicação do grau de agrupamento dos valores similares em torno de uma observação, identificando *clusters* espaciais, estatisticamente significantes. Tais *clusters* são divididos em quatro tipos de associação espacial, sendo: Alto-Alto (AA), Baixo-Baixo (BB), Alto-Baixo (AB) e Baixo-Alto (BA)⁵.

Para a mensuração da correlação espacial entre diferentes atributos, como no caso do estudo proposto, entre emissões e IFDM, calcula-se o I de Moran bivariado. Em termos formais, conforme Almeida (2012) é possível calcular a estatística I de Moran para duas variáveis diferentes, por exemplo, y e x , formalmente tem-se:

$$I^{yx} = \frac{\sum_i \sum_j (x_i - \bar{x}) w_{ij} (y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Assim, caso se verifique a ocorrência de dependência espacial do fenômeno em análise através da AEDE, a formação de *clusters* bivariados podem ser identificados, fornecendo a estrutura espacial da distribuição dos dados. Dong e Liang (2014) avaliaram a agregação espacial da emissão de poluentes entre regiões individuais, para a China, utilizando o LISA.

⁵ Os agrupamentos AA e BB indicam a ocorrência de autocorrelação espacial positiva, enquanto que os agrupamentos AB e BA denotam a presença de autocorrelação espacial negativa.

3.2 Dados

A base de dados foi constituída por 5.467 municípios brasileiros, tendo por base a disponibilidade de informações e os dados georreferenciados (*Shapefile*)⁶ do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As variáveis, suas unidades e respectivas fontes podem ser observadas na Tabela 1, apresentada abaixo. Os dados utilizados são referentes ao ano de 2018, diante da indisponibilidade de se trabalhar com indicadores mais atuais ligados ao desenvolvimento econômico.

Tabela 1. Descrição da fonte dos dados e variáveis utilizadas

Variáveis	Sigla	Unidades	Fonte
Emissão global	ETGlobal	Toneladas	SEEG;
Emissões do setor de transporte	ETtrans	Toneladas	SEEG e IBGE;
Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal	IFDM	Índice de 0 a 1	FIRJAN;
Produto Interno Bruto	PIB	Reais	IBGE;
População	P	Unidades	IBGE;
Emissão global per capita	ETGlobalpc	ETGlobal /P	SEEG e IBGE;
Emissões setor de transporte per capita	ETtranspc	ETrans/P	SEEG e IBGE;
Produto Interno Bruto per capita	PIBpc	Reais/P	IBGE.

Fonte: Elaboração própria.

Desta maneira, as ferramentas da AEDE serão usadas para apresentar a distribuição e associação espacial das variáveis de emissão de CO₂ (em nível global e setor de transportes), PIBpc e o índice FIRJAN entre os municípios brasileiros. Os mapas foram produzidos no software GeoDa 1.0.

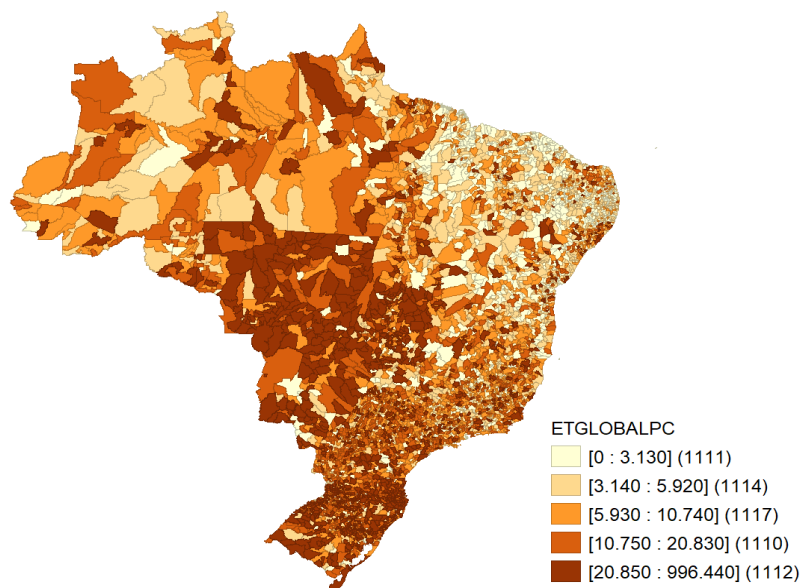
4. Análise e Discussão dos Resultados

Observa-se que nas regiões Sul e Centro-Oeste estão concentrados um número maior de municípios com elevados níveis de emissão de CO₂ globais. Enquanto nas regiões Norte e Nordeste estão concentrados o maior número de municípios com os menores níveis de emissão (Figura 1). Já em relação às emissões do setor de transportes, pode-se observar na Figura 2 que os municípios com maiores níveis relativos de emissão por habitantes estão concentrados nas regiões Sul e Sudeste.

Quando analisada especificamente a emissão de CO₂ associadas ao setor de transporte pode-se verificar que as regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam menores níveis de emissão, dado que um maior número de municípios com baixa emissão per capita estão localizados nessas regiões.

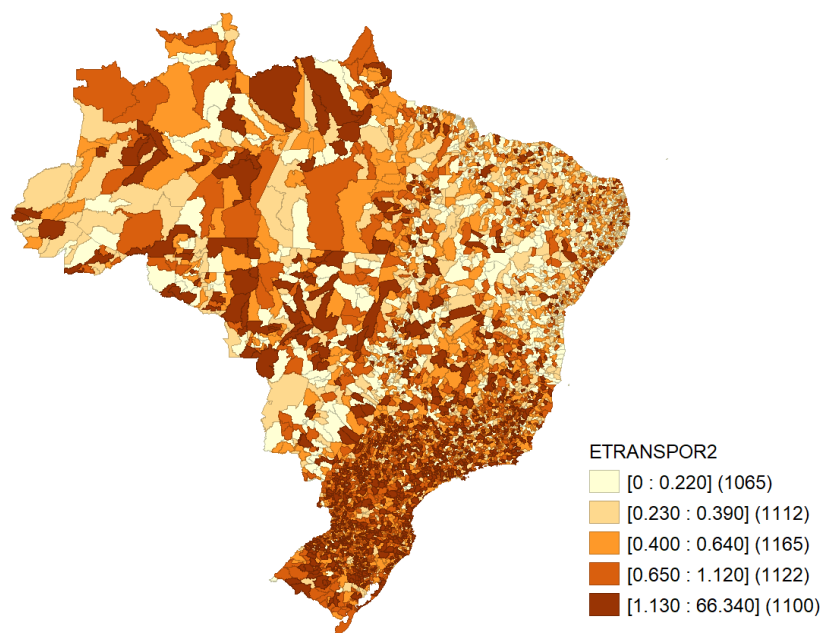
⁶ *Shapefile* é um arquivo contendo os dados geoespaciais dos municípios em formato vetorial.

Figura 01. Distribuição das Emissões globais per capita de gases de efeito estufa nos municípios brasileiros em 2018.



Fonte: Elaboração a partir dos dados do SEEG e o *software Geoda*.

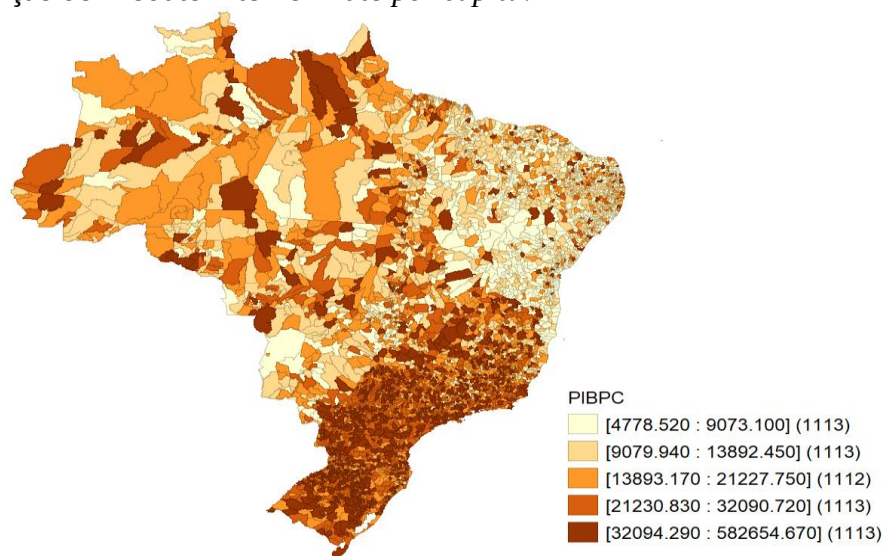
Figura 02. Distribuição das emissões do setor de transporte per capita de gases de efeito estufa nos municípios brasileiros em 2018.



Fonte: Elaboração a partir dos dados do SEEG e o *software Geoda*.

Na distribuição espacial do PIB per capita e IFDM (Figura 3 e 4), concentram-se na região Sul e Sudeste os municípios com maiores níveis de renda (PIBpc) e desenvolvimento regional (IFDM).

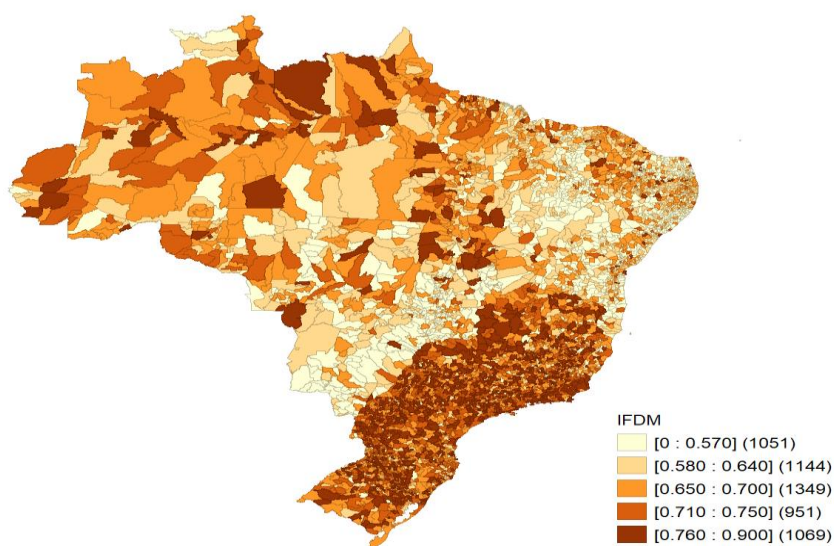
Figura 03. Distribuição do Produto Interno Bruto *per capita*.



Fonte: Elaboração própria utilizando os dados do IBGE e o *software Geoda*.

Em relação a baixos níveis de renda (PIBpc) pode-se perceber que a maior concentração de municípios está na região Nordeste (Figura 03). Adicionalmente, os menores níveis de desenvolvimento (IFDM) estão nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, estando a maioria dos municípios dessas regiões com baixos níveis de desenvolvimento.

Figura 04. Distribuição do Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM).



Fonte: Elaboração própria utilizando os dados Firjan e o *software Geoda*.

Os resultados apresentados na Tabela 2, mostram que a maioria das matrizes apresentaram autocorrelação espacial (I de Moran) positiva e significativa, indicando a existência de um padrão espacial nos dados, cujas dispersões para as matrizes testadas são apresentadas no anexo A.

Como os dados analisados consideram a unidade de análise como sendo o município, optou-se pela utilização das matrizes k, pois nas análises globais e locais, necessita-se da criação de uma Matriz de Pesos Espaciais (W) que é a forma de demonstrar a estrutura espacial dos dados, e nessa matriz há um conjunto de vizinhança que interage com determinado ponto no

espaço, com o intuito de evidenciar a disposição de um elemento (neste caso o município) na área geográfica em relação aos demais elementos (Buhse; Pelegrini; Fochezatto, 2018; Silva; Borges; Parré, 2013).

Tabela 2. Índice de Moran Univariado.

Variável/Matriz	k1	k3	k5	k10
ETranspc	0,127* (0.001)	0,113 (0.001)	0,108 (0.001)	0,089 (0.001)
ETGlobalpc	0,568* (0.001)	0,528 (0.001)	0,514 (0.001)	0,471 (0.001)
PIBpc	0,305* (0.001)	0,322 (0.001)	0,313 (0.001)	0,278 (0.001)
IFDM	0,49* (0.001)	0,475 (0.001)	0,459 (0.001)	0,449 (0.001)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: * Indica a matriz utilizada/selecionada.

Com base nos resultados das Tabelas 2 e 3, seguindo os critérios indicados por Anselin e Florax (1995), considerou-se para a estimação do Indicador Lisa univariado a matriz k1 e para o indicador bivariado k3. Os resultados para os *clusters* são apresentados nas Figuras (Figuras 5 e 6).

Tabela 3. Índice de Moran Bivariado.

Variável/Matriz	k1	k3	k5	k10
ETGlobalpc e PIBpc	0,077 (0.002)	0,086* (0.001)	0,084 (0.001)	0,079 (0.001)
ETranspc e PIBpc	0,117 (0.001)	0,127* (0.001)	0,12 (0.001)	0,114 (0.001)
ETGlobalpc e IFDM	-0,012 (0.186)	-0,006 (0.215)	-0,007* ^{ns} (0.1030)	-0,005 (0.147)
ETranspc e IFDM	0,132 (0.001)	0,135* (0.001)	0,129 (0.001)	0,128 (0.001)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: * Indica a matriz utilizada/selecionada; ^{ns} indica não significativo.

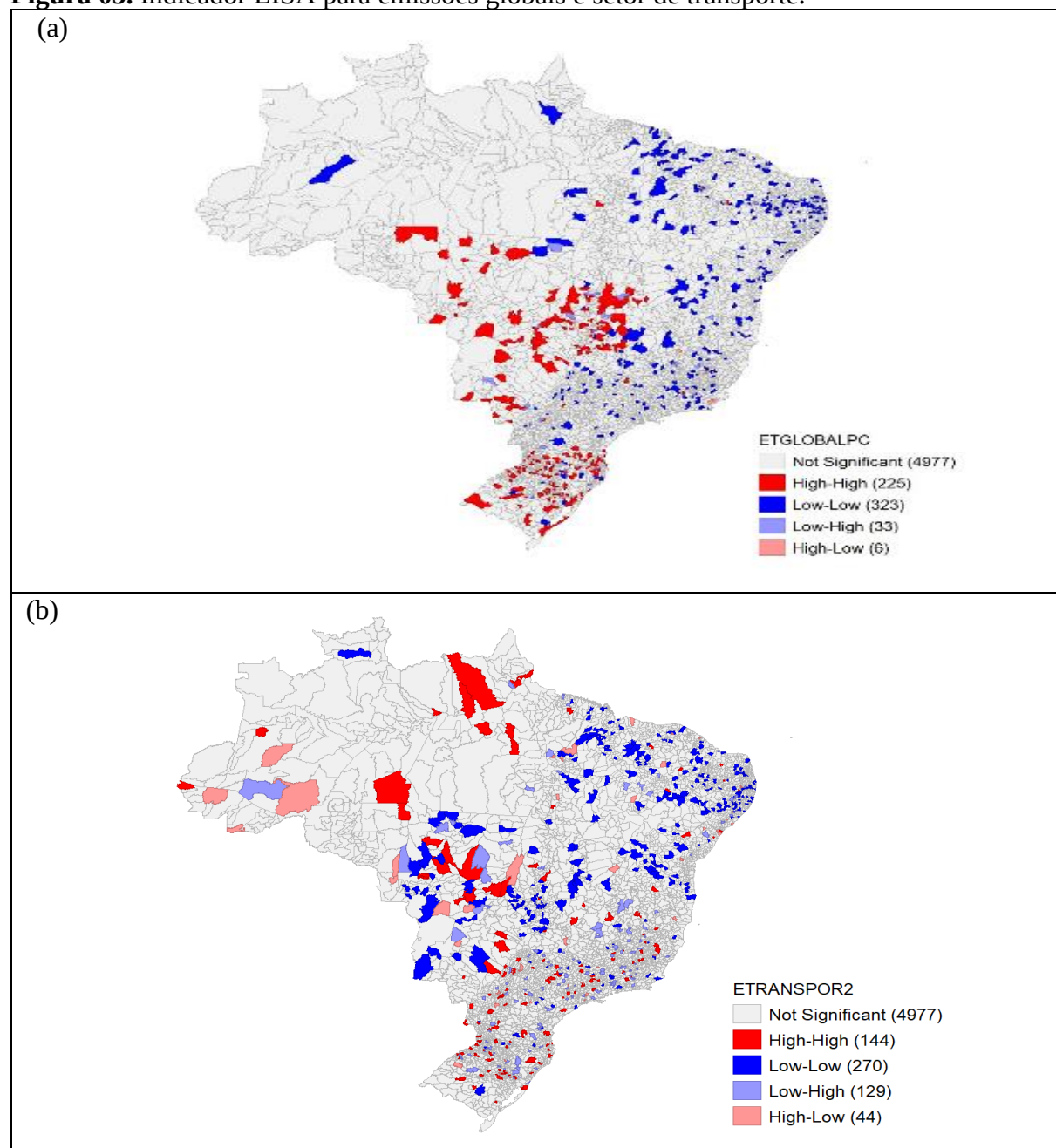
Nas Figuras 05 e 06, pode-se observar o indicador Lisa Univariado para as emissões globais de CO₂ e do setor de transporte, nível de desenvolvimento municipal (IFDM) e renda (PIBpc). Na Figura 05, painel a, verifica-se um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Baixo (323 municípios), assim, municípios que apresentam baixo nível de emissões globais e possuem vizinhos com baixo nível de emissões, com destaque para as regiões Nordeste e Sudeste. Ou seja, nessas regiões existe uma relação de associação de municípios com baixos níveis de emissão.

Outro *cluster* de destaque é o de padrão Alto-Alto, com um total de 225 municípios, com altos níveis de emissão globais e que possuem vizinhos com também alto nível de emissões, concentrando-se principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul. Nessas regiões o padrão verificado indica que existe uma relação significativa de altos níveis de emissão entre os municípios e seus vizinhos.

Quando analisado para as emissões do setor de transporte (Figura 05, painel b), pode-se perceber que os *cluster* com maior destaque permanecem os mesmos do caso das emissões

globais, porém com menor número de municípios (270), e em segundo momento, o de padrão Alto-Alto, com um total de 144 municípios, com altos níveis de emissão do setor de transporte e que possuem vizinhos com também alto nível de emissões, concentrando-se nas mesmas regiões que nas emissões globais de CO₂. Pode-se observar a formação de *clusters* Alto-Alto também na região Norte. Na região Centro-Oeste, o panorama se altera em relação à existência de um número significativo de *clusters* de níveis Baixo-Baixo.

Figura 05. Indicador LISA para emissões globais e setor de transporte.



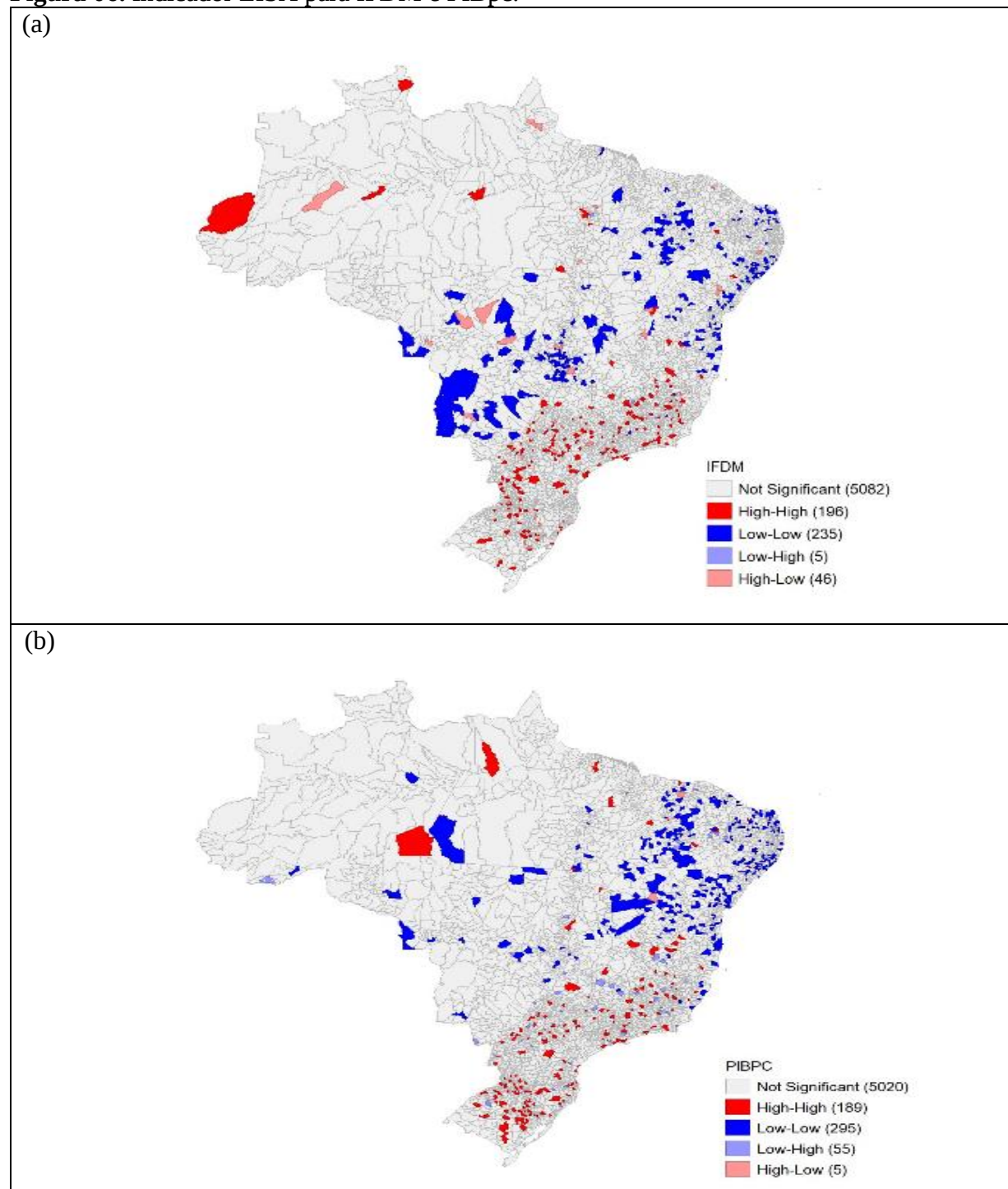
Fonte: Resultados da pesquisa.

Para o nível de desenvolvimento municipal (IFDM), pode-se destacar na Figura 06, painel a, para um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Baixo (235 municípios), ou seja, municípios que apresentam baixo nível de desenvolvimento municipal e vizinhos com também baixo nível de emissões, com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste. Outro *cluster* de destaque é o de padrão Alto-Alto, com um total de 196 municípios, com

altos níveis de desenvolvimento e que possuem vizinhos com a mesma característica, concentrando-se principalmente nas regiões Sudeste e Sul.

Em relação a renda (PIBpc), Figura 06, painel b, há um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Baixo (295 municípios) também, ou seja, municípios e vizinhos apresentam baixo nível de renda, com destaque para a região Nordeste. O *cluster* de destaque também é o de padrão Alto-Alto, com um total de 189 municípios, com altos níveis de renda que também possuem vizinhos com elevado nível de renda, concentrando-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste.

Figura 06. Indicador LISA para IFDM e PIBpc.



Fonte: Resultados da pesquisa.

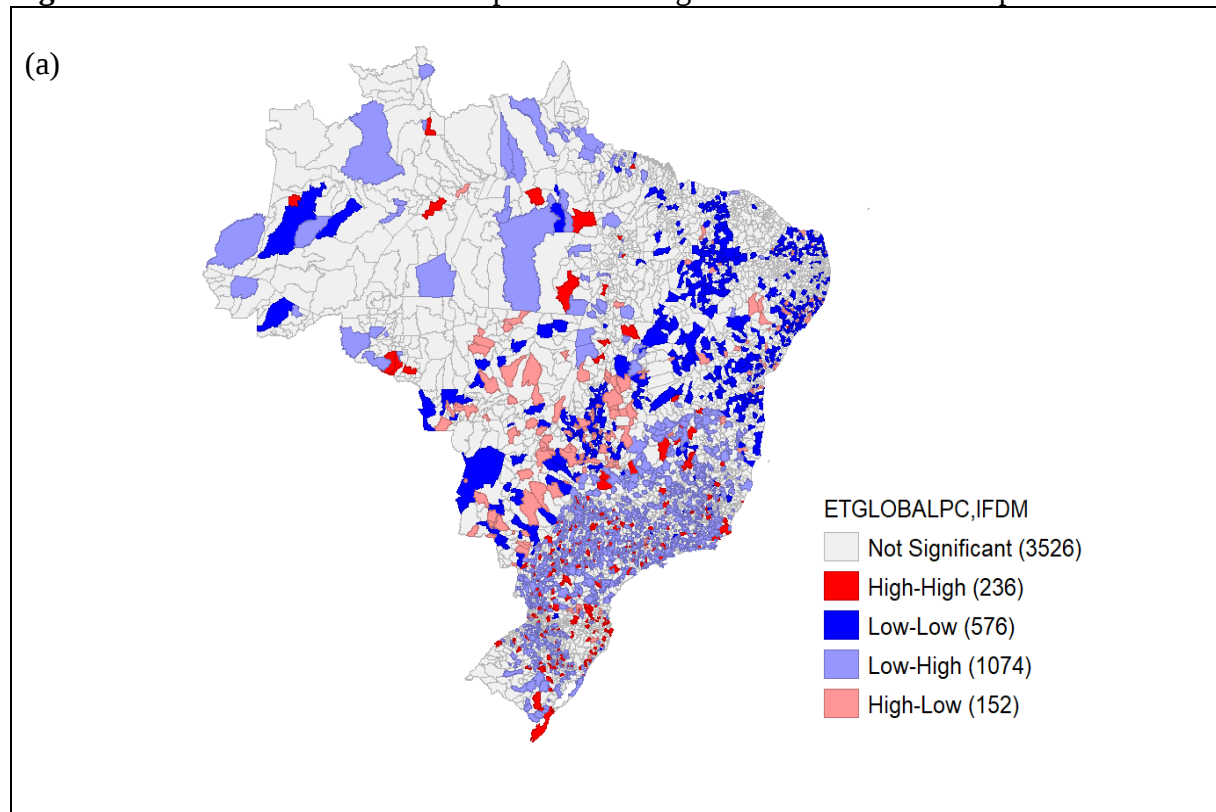
Na Figura 07, pode-se observar o indicador Lisa Bivariado para as emissões globais de CO₂ e do setor de transporte associado com o nível de desenvolvimento municipal (IFDM) e renda (PIBpc), em que se identifica formação de *clusters* de todos os padrões para o Brasil. Há um destaque na Figura 07, painel a, para um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Alto (1074 municípios), ou seja, municípios que apresentam baixo nível de emissões e vizinhos com elevado nível de desenvolvimento, com destaque para a região Sudeste. Analisando países da América Latina, Mahmood (2022) destaca em seus achados que, em grande parte, o crescimento econômico exerce uma pressão negativa no ambiente de seus países, ao passo que é positivo nos vizinhos.

Seguindo o estudado na literatura apresentada, nessas regiões o nível de degradação ligado a emissões já se encontra em um menor nível, dado que os níveis de desenvolvimento são elevados, característica que pode ser percebida em muitos municípios da região Sudeste.

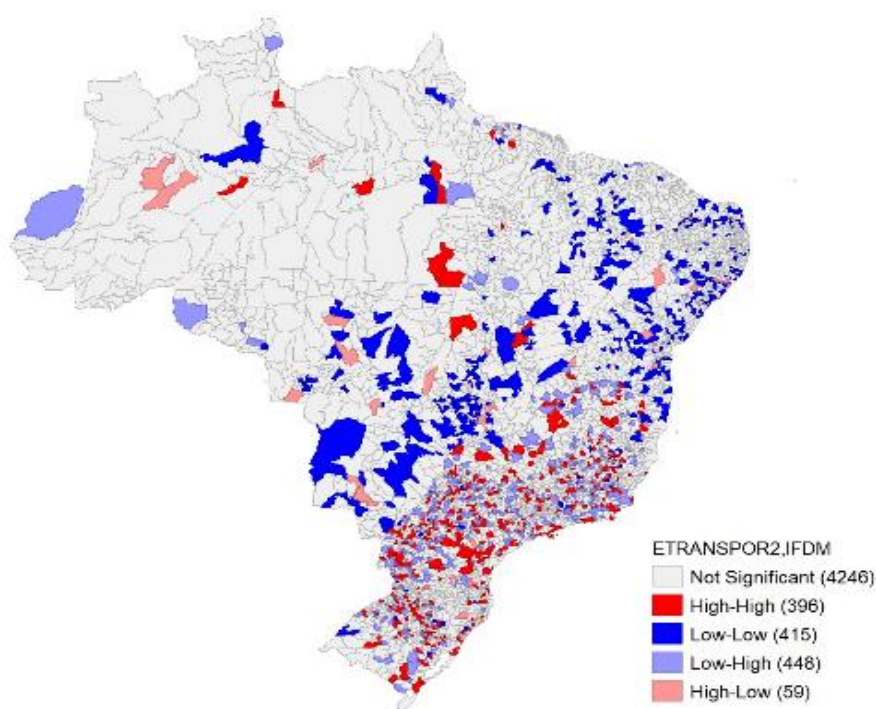
Outro *cluster* de destaque é o de padrão Baixo-Baixo, com um total de 576 municípios, com baixos níveis de emissão e que possuem vizinhos com baixo nível de desenvolvimento, concentrando-se principalmente na região Nordeste (Figura 07, painel a). Nesses municípios, pode-se atrelar a tal resultado, a possível nível de crescimento e desenvolvimento ainda baixo, o que explica os baixos níveis de emissão global, dado também a existências de municípios com menores níveis de renda nestes municípios nordestinos.

Quando analisado o Lisa Bivariado para as emissões do setor de transporte e o nível de desenvolvimento municipal (Figura 07, painel b), pode-se perceber que os *cluster* com maior destaque permanecem os mesmos do caso das emissões globais, porém com número bem menor de municípios, redução de mais de 50% de municípios concentrados no *cluster* Baixo-Alto, tendo uma dispersão maior desse *cluster* também na região Sudeste.

Figura 07. Indicador LISA Bivariado para emissões globais e do setor de transporte com IFDM.



(b)

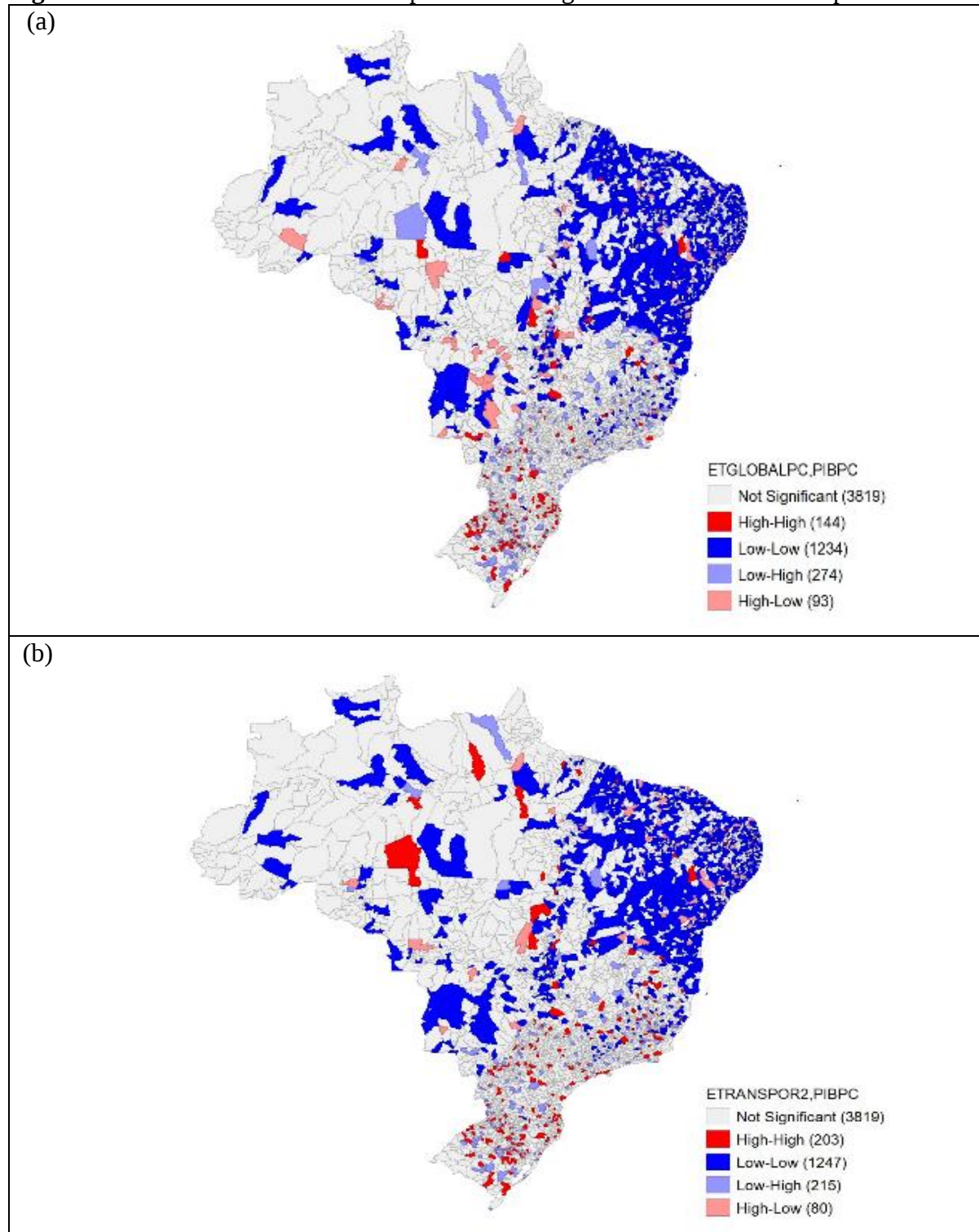


Fonte: Resultados da pesquisa.

Para as emissões globais de CO₂ e nível de renda (PIBpc), há um destaque na Figura 08, painel a, para um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Baixo (1234 municípios), ou seja, municípios que apresentam baixo nível de emissões e vizinhos com baixo nível de renda, com destaque, novamente, para a região Nordeste. O que mostra que relativamente os menores níveis de renda nesses municípios estão também associados ao baixo nível de emissões em municípios vizinhos. Outro *cluster* de destaque é o de padrão Baixo-Alto, com um total de 274 municípios, com baixos níveis de emissão e que possuem vizinhos com alto nível de renda, concentrando-se principalmente na região Sudeste.

Para as emissões do setor de transporte e o nível de renda (PIBpc), como se visualiza na Figura 08, painel b, há um maior número de municípios compondo o *cluster* Baixo-Baixo (1247 municípios), ou seja, municípios que apresentam baixo nível de emissões no setor de transporte e vizinhos com baixo nível de renda, com destaque, mais uma vez, para a região Nordeste, indicando uma maior concentração de municípios com menores níveis de renda nesta região. Outro *cluster* de destaque é o de padrão Baixo-Alto, com um total de 215 municípios, com baixos níveis de emissão e que possuem vizinhos com alto nível de renda, concentrando-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste, caracterizadas por maiores níveis de renda.

Figura 08. Indicador LISA Bivariado para emissões globais e do setor de transporte com PIB.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Com base nos resultados, pode-se perceber que existe uma relação de associação espacial entre as emissões de CO₂ e os níveis de crescimento e desenvolvimento dos municípios brasileiros. Os principais padrões apontam para relações de baixos níveis de emissão em regiões compostas por maior número de municípios com baixo desenvolvimento (Nordeste) e, por outro lado, em regiões mais desenvolvidas (Sul e Sudeste) maiores níveis de emissão associados a menores níveis de emissão, quando realizada a análise bivariada. Estudos como de Danish *et*

al. (2019) e Adedoyin *et al.* (2021) ao analisarem essa relação para outros países encontraram também uma influência nas emissões de CO₂ associadas ao PIB.

Cabe destacar que, quando realizada a análise bivariada comparando o indicador de desenvolvimento (IFDM) e o de renda (PIBpc), o comportamento do padrão de *clusters* demonstra que para o setor de transportes existe uma amenização em relação ao número de municípios em que as relações são significativas, o que pode indicar que menores níveis de emissão estão mais associados ao nível de desenvolvimento dos municípios, além do que os efeitos de associação para o setor de transportes é menor comparado às emissões globais. Mesmo assim, pode-se identificar (Figura 7, painel b) um número considerável de municípios com altos níveis de desenvolvimento e com níveis elevados de emissão ligados ao setor de transportes (7,24% do total).

Por fim, cabe salientar que quando analisado a relação entre emissões e a renda (PIBpc) identificou-se em sua maioria há relações de dependência espacial positiva, indicando para relações do tipo Alto-Alto e Baixo-Baixo, mesmo resultado encontrado para a China por Wang e Zhu (2020).

Já em estudos realizado para países do Golfo, Mahmood e Furqan (2020) evidenciaram que as emissões de CO₂ aumentam em níveis mais altos de renda, demonstrando que se tratando de efeitos colaterais, o aumento do PIB per capita colabora com as emissões dos países vizinho, assim tratando-se de urbanização, este exerce efeitos ambientais negativos, diante do aumento das emissões de CO₂ e o reflexo nos países vizinhos. Ainda, que o uso de energia tem o efeito positivo nas emissões de CO₂, diante da maior utilização de combustível fóssil.

Porém, quando comparado o nível de desenvolvimento dos municípios (IFDM) o padrão de dependência espacial negativa do tipo Baixo-Alto (baixa emissão e alto desenvolvimento) se mostrou o mais prevalente, seguida do padrão positivo Baixo-Baixo. Esse efeito indica que o desenvolvimento elevado dos municípios vizinhos explica o baixo nível de emissão de um município, resultado que corrobora a análise realizada por Lv e Li (2021) ao analisarem um painel com 97 países ao longo de 2000 a 2014, em que os resultados apontaram que as emissões de CO₂ de um país podem ser influenciadas pelo desenvolvimento financeiro dos seus vizinhos, sendo o efeito indireto significativamente negativo.

5. Considerações Finais

Em relação aos níveis de emissão, pode-se verificar uma maior concentração de elevados níveis de emissão de CO₂ global nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com exceção apenas da região Centro-Oeste para as emissões do setor de transportes, enquanto na região Nordeste concentrou-se um maior número de municípios com baixos níveis de emissão per capita. Esse padrão é semelhante para o nível de renda e desenvolvimento econômico, em que as regiões Sul e Sudeste apresentam maior concentração de municípios com níveis mais altos e a região Nordeste predominância de municípios com baixos níveis de renda e desenvolvimento.

A análise univariada permitiu identificar maior formação de clusters de municípios com baixos níveis de desenvolvimento com municípios também com baixos níveis de desenvolvimento nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. Enquanto nas regiões Sul e Sudeste, identificou-se padrão com maiores níveis de desenvolvimento. Em relação às emissões, para as regiões Sul e Centro-Oeste apresentaram um padrão de clusters com maiores níveis de emissão global nos municípios e seus vizinhos, enquanto nas regiões Norte e Nordeste se evidenciou um padrão de agrupamento de municípios com baixos níveis de emissão global. Quanto ao setor de transportes, cabe destacar apenas as regiões Nordeste e Centro-Oeste com agrupamentos de municípios com baixos níveis de emissão e com vizinhos também possuindo a mesma característica.

A análise bivariada evidenciou relações de dependência espacial positiva e negativa para os municípios brasileiros, indicando que as emissões de CO₂ estão associadas de forma significativa aos níveis de renda e de desenvolvimento econômico dos municípios. Como principal evidência, pode-se destacar que o desenvolvimento econômico municipal desempenha um papel importante na mitigação das emissões de CO₂ e que estar rodeado de municípios próximos com um elevado desenvolvimento pode melhorar o desempenho ambiental de um município. Sendo um importante achado para políticas públicas focadas em elevar os índices de desenvolvimento econômico regional aliado a amenizar os efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Por fim, é importante ressaltar que o estudo foi realizado com dados do ano de 2018, diante da indisponibilidade de dados dos últimos anos, assim para pesquisas futuras, propõe-se a utilização de dados mais atuais, caso disponíveis, que auxilie a aplicação de outras metodologias que viabilizem estimar as relações de dependência espacial e identificar os efeitos de *spillover* regional. Dessa forma, espera-se que os resultados e conclusões apresentadas aqui contribuam para discussões atuais sobre a temática e para um desenvolvimento socioeconômico aliado a uma redução na degradação ambiental.

Referências Bibliográficas

ADEDOYIN, Festus Fatai; OZTURK, Ilhan; AGBOOLA, Mary Oluwatoyin; AGBOOLA, Phillips O.; BEKUN, Festur Victor. The implications of renewable and non-renewable energy generating in Sub-Saharan Africa: The role of economic policy uncertainties. **Energy Policy**, n. 150, p. 112115, 2021.

ALMEIDA, E. Econometria Espacial Aplicada. Campinas, São Paulo: **Alínea**, v. 31, 2012.

ALMEIDA, Eduardo Simões de; PEROBELLI, Fernando Salgueiro; FERREIRA, Pedro Guilherme Costa. Existe convergência espacial da produtividade agrícola no Brasil?. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, p. 31-52, 2008.

ANSELIN, Luc. *Spatial econometrics*, 1999. Disponível em: https://web.pdx.edu/~crkl/WISE/data/papers/anselin99_baltchap.pdf. Acesso em: 11 de jul. 2023.

ANSELIN, Luc. *Spatial econometrics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1988.

ANSELIN, Luc. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n. 3, p. 705-710, 2001.

ANSELIN, L.; FLORAX, R. **New Directions in Spatial Econometrics**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. (Advances in Spatial Science)

BATISTELLA, P.; LAZARETTI, L. R.; TEIXEIRA, F. O.; PRESOTTO, E.; de FREITAS, C. A. Avaliação do processo de convergência da produtividade agrícola: uma análise espacial dos municípios gaúchos, **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 17, n. 3, pp. 466-484, 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm. Acesso em: 5 abr. 2025. Acesso em: 04 de mar. 2023.

BRASIL. *Brasil abre estande na COP 27 e apresenta todo o seu potencial verde ao mundo em Sharm El-Sheik*. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 7 nov. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/brasil-na-cop/brasil-abre-estande-na-cop-27-e-apresenta-todo-o-seu-potencial-verde-ao-mundo-em-sharm-el-sheik>. Acesso em: 12 de mar. 2023.

BUHSE, Ana Paula; PELEGRINI, Tatiane; FOCHEZATTO, Adelar. Análise espacial das agroindústrias da Região Sul: um estudo a nível municipal para o ano 2010. **Geosul**, v. 33, n. 68, p. 116-136, 2018.

CLIMATE WATCH. *Greenhouse Gas (GHG) Emissions*. Climate Watch. 2023. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?chartType=percentage&end_year=2020&gases=co2®ions=WORLD§ors=transportation&start_year=1990. Acesso em: 20 jul. 2023.

DAI, J.; ALVARADO, R.; ALI, S.; AHMED, Z.; MEO, M. S. Transport infrastructure, economic growth, and transport CO2 emissions nexus: Does green energy consumption in the transport sector matter? **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-13, 2023.

DANISH; BALOCH, M. A.; MAHMOOD, N.; ZHANG, J. W. Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO2 emissions in BRICS countries. **Science of the Total Environment**. v. 678, p. 632-638, 2019.

DONG, Liang; LIANG, Hanwei. Spatial analysis on China's regional air pollutants and CO2 emissions: Emission pattern and regional disparity. **Atmospheric Environment**, v. 92, p. 280-291, 2014.

FIRJAN. **Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro**. Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM): ano base 2016, ano 2018. Recorte municipal de abrangência nacional – Emprego e Renda, Saúde e Educação. Disponível em: <http://www.firjan.com.br/ifdm/>. Acesso em: 20 maio 2023.

HOECKEL, P. H. O.; CASAGRANDE, D. L.; SANTOS, C. A. P. Análise espacial da pobreza no Rio Grande do Sul. In: FOCHEZATTO, A.; PELEGRINI, T.; HOECKEL, P. H.; TOMKOWSKI, F. G. (org.). **Desenvolvimento socioeconômico regional: cidades, crescimento e especialização produtiva**. v. 1, p. 129–161. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2019.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Monitoramento do território: mudanças climáticas. 2022. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>. Acesso em: 11 out. 2023.

LE GALLO, Julie; ERTUR, Cem. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980– 1995. **Papers in regional science**, v. 82, p. 175-201, 2003.

LV, ZHIKE; LI, SHASHA. How financial development affects CO2 emissions: a spatial econometric analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111397, 2021.

MAHMOOD, Haider. Trade, FDI, and CO2 emissions nexus in Latin America: the spatial analysis in testing the pollution haven and the EKC hypotheses. **Environmental Science and Pollution Research**, 30, n. 6, 14439-14454, 2022.

MAHMOOD, Haider; FURQAN, Maham. Oil rents and greenhouse gas emissions: spatial analysis of Gulf Cooperation Council countries. **Environment, Development and Sustainability**, 23, n. 4, 6215-6233, 2020.

MME. **Ministério de Minas e Energia; EPE** – Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Brasília: MME/EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 18 mar. 2023.

MME. **Ministério de Minas e Energia; EPE** – Empresa de Pesquisa Energética. RenovaBio. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-bicombustiveis/acoes-e-programas/programas/RenovaBio>. Acesso em: 8 mar. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. *Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável*. Adotada em 2015. Disponível em: https://www.undp.org/sustainable-development-goals?utm_source=EN&utm_medium=GSR&utm_content=US_UNDP_PaidSearch_Brand_English&utm_campaign=CENTRAL&c_src=CENTRAL&c_src2=GSR&gclid=Cj0KCQiA1sucBhDgARIsAFoytUvzQJtyYV1gSxnNrDgQvTTHDKbfWswCFVpeNMJOQv3hS9mDUhepf-IaAuhQEALw_wcB. Acesso em: 24 set. 2023.

PELLENZ, J. D. L.; PUCHALE, C. L. Qualidade ambiental e seus condicionantes: uma análise multivariada para os municípios do rio grande do sul. **Estúdios económicos**, v. 35, n. 71, p. 5-24, 2018.

PEREIRA, Greisson Almeida; MOREIRA, Tito Belchior da Silva. A Influência dos Consórcios Intermunicipais de Saúde no Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM). **Planejamento e Políticas Públicas**, [s. l.], n. 46, p. 132–159, 2016.

POSTALI, Fernando Antonio Slaibe; NISHIJIMA, Marislei. Distribuição das rendas do petróleo e indicadores de desenvolvimento municipal no Brasil nos anos 2000. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 463–485, 2011.

PROLO, C. D.; PENIDO, G.; SANTOS, I. T.; LA HOZ THEUER, S. Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. **Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade**. 2021. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>. Acesso em: 25 de março de 2023.

SALMI, Frederico; CANOVA, Moara Almeida; PADGURSCHI, Maíra CG. Ética climática, (in) justiças e limitações do Pagamento por Serviços Ambientais no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 26, p. 01232, 2023.

SCHLINDWEIN, Cleiton Mateus; CARDOSO, Bárbara Françoise; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. Evolução dos indicadores de desenvolvimento socioeconômico nos municípios paranaenses que recebem royalties da Itaipu Binacional. **URBE: Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 361-375, 2014.

SEEG. **Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**; OBSERVATÓRIO DO CLIMA. 2019. Disponível em: <http://seeg.eco.br/download>. Acesso em: 17 out. 2022.

SEEG. **Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil: 1970–2020. 2021. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/10/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 25 mar. 2023.

SEEG. **Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**; OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Séries totais 2022. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?_gl=1*1mttjp1*_ga*NTYyNjMwNTk0LjE2NzU4MTM5NjU.*_ga_XZWSWEJDWQ*MTcwODEyMTIyNi4xLjEuMTcwODEyMjQ5OC4wLjAuMA. Acesso em: 1 fev. 2024.

DA SILVA, Leandro Nunes Soares; BORGES, Murilo José; PARRÉ, José Luiz. Distribuição espacial da pobreza no Paraná. **Revista de Economia**, v. 39, n. 3, 2013.

STERN, D.I. The rise and fall of the environmental Kuznets curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.

UMAR, Muhammad; JI, Xiangfeng; KIRIKKALELI, Dervis; XU, Qinghui. COP21 Roadmap: Do innovation, financial development, and transportation infrastructure matter for environmental sustainability in China? **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 271, p. 111026, 1 out. 2020.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change**. *Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of The United Nations Framework Convention on Climate Change*. 2023. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2023.

WANG, Zilong; ZHU, Yongfeng. Do energy technology innovations contribute to CO₂ emissions abatement? A spatial perspective. **Science of the Total Environment**, v. 726, p. 138574, 2020.

ZHAO, Xueting; BURNETT, J. Wesley; FLETCHER, Jerald J. Spatial analysis of China province-level CO₂ emission intensity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 1–10, 2014.