

Fatores Espaciais e Socioeconômicos da Geração Fotovoltaica Distribuída em Minas Gerais

Guilherme Perobelli Salgueiro¹; Fernando Salgueiro Perobelli²; Edson Paulo Domingues³
Victor Eduardo de Melo Valério⁴

Resumo

Este artigo, mensura os impactos espaciais da geração fotovoltaica distribuída em Minas Gerais, por meio de um modelo de Econometria Espacial. Foi testada e rejeitada a hipótese de aleatoriedade espacial para a variável dependente. A correlação espacial foi avaliada utilizando o I de Moran para a caracterização dos clusters de maior e menor geração fotovoltaica no Estado. Sob um modelo econométrico de defasagem espacial, caracterizou-se os efeitos diretos e indiretos do salário médio, acesso à educação superior, trabalhadores com baixa escolaridade, urbanização e irradiação (recurso solar) para a geração solar em Minas Gerais, se mostrando significativo para todas variáveis

Palavras-chave: Autoconsumo Remoto. Econometria Espacial. Energia Solar

Abstract

This article measures the spatial impacts of distributed photovoltaic generation in Minas Gerais using a Spatial Econometrics model. The hypothesis of spatial randomness for the dependent variable was tested and rejected. Spatial correlation was evaluated using Moran's I to characterize clusters of higher and lower photovoltaic generation in the state. Under a spatial lag econometric model, the direct and indirect effects of average salary, access to higher education, workers with low education levels, urbanization, and irradiation (solar resource) on solar generation in Minas Gerais were characterized, proving significant for all variables.

Keywords: Remote self-consumption. Spatial Econometrics. Solar Energy.

Área de Submissão: 1 - Economia.

Agradecimentos: Esse trabalho conta com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) no âmbito do edital 007/2021, processo RED-00161-22. Agradece também ao financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

¹ Doutorando em Economia pelo Cedeplar/UFMG; Mestre em Economia pelo PPGE/UFJF; Pesquisador associado ao NEMEA/Cedeplar e LATES/UFJF.

² Professor Titular Faculdade de Economia – Universidade Federal de Juiz de Fora – MG – Brasil. Bolsista de Produtividade em Pesquisa – CNPq, Pesquisador Mineiro – FAPEMIG.

³ Professor Titular – Faculdade de Ciências Econômicas - UFMG

⁴ Professor Adjunto – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

1. INTRODUÇÃO

A questão energética é tema central no desenvolvimento das sociedades ao redor do mundo e, ao longo da história, os combustíveis fósseis dominaram as matrizes energéticas globais. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) indicam que, em 2019, em torno de 80% da energia produzida foi oriunda desse tipo de combustível; em especial, petróleo, carvão e gás natural. Evidencia-se ao longo das últimas décadas os potenciais danos ao meio ambiente, em decorrência da manutenção dessa dependência por combustíveis fósseis. Portanto, têm-se a necessidade de difundir e ampliar a utilização de fontes renováveis de energia em todo o planeta. A agenda ambiental ganha cada vez mais espaço nos fóruns multilaterais, por exemplo, na Convenção das Partes 26 (COP26), que definiu a transição de combustíveis fósseis para renováveis um processo necessário para a diminuição dos impactos provenientes do aquecimento global. Os combustíveis fósseis compõem também o grupo de fontes de energia não renováveis, caracterizados por sua escassez natural. A demanda por energia se relaciona de forma direta com o crescimento populacional, ou seja, a dependência por uma matriz energética não renovável coloca em risco futuras gerações.

De acordo com Gielen et al (2019), o sucesso da transição energética perpassa pela atuação dos governos nacionais, e a adoção de políticas públicas que visem a difusão de novas fontes de energia. A União Europeia possui como meta para o ano de 2030 a redução em 27% de emissões de gás carbônico. A Alemanha, por sua vez, planeja abandonar permanentemente a energia nuclear e reduzir 80% das emissões de gás carbônico até 2050, através de uma aceleração na utilização de energias renováveis. O governo indiano também aposta na adoção de fontes renováveis, como: energia eólica e solar; a meta é atingir em 2027 a produção de 227 gigawatts de energia por meio de ambas fontes. Além das pressões externas, se faz necessário a existência de políticas de incentivos fiscais para a difusão de energias renováveis (GIELEN, 2019).

Ao analisar a matriz energética brasileira, a partir de dados do Ministério de Minas e Energia (MME), nota-se um avanço em relação a utilização de fontes energéticas de baixo carbono. Em termos de oferta nacional de energia elétrica no Brasil, o ministério apontou que em 2019, em torno de 77% de toda eletricidade produzida no país era proveniente de fontes renováveis, em especial geração hidrelétrica, com 61%.

Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2018) indicou que, apesar das hidrelétricas serem uma energia limpa e renovável, existem desafios e limitações que a longo prazo podem exigir do país uma diversificação em sua matriz energética. É latente a dificuldade de ampliação e implantação de novas usinas hidrelétricas, dado que a principal região para novas plantas é a região amazônica. Os custos de novos projetos são elevados, e adicionalmente, se faz necessário o investimento em longas linhas de transmissão, devido a considerável distância até os principais centros populacionais consumidores do país. Fato esse que aumenta ainda mais os custos de novos investimentos. Ademais, o estudo salienta que a região amazônica abriga grandes unidades de conservação, terras e povos indígenas, inviabilizando ainda mais a execução de novos projetos hídricos (EPE/MME, 2018).

No processo de transição energética, o Brasil se situa à frente de outros países, dado a baixa utilização de petróleo, carvão, e gás natural como geradores de energia elétrica no País. O próximo passo a ser desenvolvido, por meio de iniciativas públicas e privadas, deve ser a diversificação da matriz, diminuindo a dependência para com usinas hidrelétricas. Por exemplo, difundindo a geração solar, através de painéis fotovoltaicos.

O presente artigo visa identificar os fatores socioeconômicos e os componentes espaciais na geração fotovoltaica no estado de Minas Gerais. Como recorte espacial, serão utilizados todos os 853

municípios do Estado. Devido ao fato da geração solar não seguir uma distribuição aleatória, existindo um componente de dependência espacial entre as observações, se faz necessário a utilização de um modelo econométrico espacial. Tal modelagem, permitirá avaliar os impactos locacionais e identificar políticas públicas focalizadas para cada região do estado.

Minas Gerais, apresenta a maior quantidade de municípios do Brasil, 853 unidades, agrupadas em 66 microrregiões e 12 mesorregiões de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para além, sua área de 586.513,983 km² torna o estado o quarto mais extenso do país, e o segundo mais populoso. Toda essa dimensão resulta em uma heterogeneidade regional no que tange a condições socioeconômicas, afetando a distribuição de novas tecnologias, como os módulos fotovoltaicos. Devido a essa diferenciação nas distintas regiões mineiras entende-se que a absorção da geração solar não se dá de maneira homogênea em todos os municípios. A tabela 1 apresenta alguns indicadores socioeconômicos que visam ilustrar essa heterogeneidade no estado.

Tabela 1: Indicadores Socioeconômicos de Minas Gerais

Mesorregião	PIB a Preços Constantes (Milhões de R\$)		Renda per capita (R\$)	% de pobres (renda < R\$ 140,00)	Taxa de Analfabetismo
	2010	% do total de MG	2010	2010	2010
Noroeste de Minas	140.925,37	7,28%	508,64	16,12%	12,37%
Norte de Minas	68.074,98	3,52%	313,87	33,02%	20,64%
Jequitinhonha	36.182,54	1,87%	322,24	31,74%	22,13%
Vale do Mucuri	58.439,70	3,02%	341,25	33,21%	25,24%
Triângulo Mineiro	356.234,14	18,41%	687,23	6,67%	9,49%
Central Mineira	86.078,37	4,45%	547,26	11,25%	10,97%
RMBH	672.304,25	34,75%	553,27	14,16%	9,69%
Vale do Rio Doce	91.779,53	4,74%	399,75	23,69%	17,55%
Oeste de Minas	133.730,69	6,91%	587,56	8,42%	9,28%
Sul/Sudoeste	126.448,47	6,54%	578,74	9,77%	9,85%
Campo das Vertentes	84.209,63	4,35%	515,29	14,33%	8,76%
Zona da Mata	80.533,25	4,16%	472,24	17,02%	12,48%
Total	1.934.940,92	100%			

Fonte: Elaborado pelos autores de acordo com o CENSO 2010 (IBGE)

Ao avaliar os dados da Tabela 1, nota-se que existe grande disparidade socioeconômica entre as mesorregiões do estado. Em destaque, estão as três maiores e menores observações para cada um dos indicadores. Nota-se a região do Triângulo Mineiro, com maior nível de renda per capita e baixo percentual de pobres e analfabetos. Tal região se contrasta por exemplo com o Norte de Minas, Vale do Mucuri e Jequitinhonha, que são os recortes espaciais menos desenvolvidos em termos socioeconômicos, detendo as menores parcelas de PIB e renda per capita. Nessas mesorregiões encontra-se também o maior nível de analfabetismo e de percentual de pobres, indicando um possível déficit educacional.

Dessa maneira, devido a heterogeneidade socioeconômica presente no estado de Minas Gerais justifica-se a adoção das variáveis explicativas do modelo nos seguintes eixos: renda, escolaridade, urbanização e irradiação. Sob tais perspectivas será possível verificar quais regiões do estado necessitam de políticas públicas focalizadas, com objetivo de alcançar o máximo potencial de geração solar.

Os resultados apresentados por esse artigo indicam a existência de clusters localizados de alta e baixa geração solar em Minas Gerais, o que corrobora com a heterogeneidade socioeconômica identificada no estado. Algumas localidades apresentam um potencial inexplorado de geração fotovoltaica, regiões em que se verifica uma alta incidência solar, entretanto, baixa potência instalada,

o que pode ser reflexo de uma baixa renda associada a tais municípios. Os componentes de renda, escolaridade e urbanização se mostraram estatisticamente significativos nas regressões e serão apresentados em detalhes na seção de resultados.

Para além dessa introdução, o artigo está estruturado com uma seção dedicada a contextualização e justificativa do problema de pesquisa, seguido por uma apresentação da metodologia e base de dados utilizadas no artigo, e por fim, são expostos os resultados e as considerações finais.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A energia solar fotovoltaica está em crescimento ao redor do mundo, sendo classificada como energia limpa e de baixo carbono. Sampaio (2017), discute o crescimento dessa matriz ao longo dos últimos anos. Entre o período de 2000 até 2015, a instalação de painéis fotovoltaicos aumentou mundialmente em 41%. Tal crescimento, é resultado da evolução tecnológica e do avanço das pesquisas no setor, bem como a ampliação de políticas de incentivos governamentais. Países como: Espanha, Alemanha, Dinamarca, China e Taiwan, possuem o sistema conhecido como *feed in tariff* (FIT), que consiste em um mecanismo de compensação aos produtores da energia. Esse incentivo busca acelerar a produção de energia renovável por parte da própria população, que pode instalar painéis em residências e áreas privadas. Por sua vez, países como Estados Unidos, Reino Unido, Japão e Suécia possuem a política conhecida como *Renewable Portfolio Standard* (RPS), que visa o aumento da produção de energia por meio de fontes renováveis através da requisição de que parte do consumo energético seja proveniente de tais fontes. (SAMPAIO, 2017).

Ritchie (2020), apresenta os dados da evolução da geração mundial de eletricidade a partir de módulos fotovoltaicos. Em 2010, apenas 0,16% do total produzido pelo planeta era proveniente dos raios solares, sendo a fonte menos utilizada dentre todas as avaliadas. Em 2021, a geração elétrica solar já é mais utilizada que o petróleo, alcançando 3,6% do total. Esse valor ainda pode ser considerado pequeno quando comparado com as fontes tradicionais de eletricidade. Entretanto, cabe ressaltar que a tecnologia ainda é relativamente recente e possui grande potencial de crescimento nas próximas décadas.

No caso brasileiro, a geração distribuída de energia solar entra em vigor no país através da Resolução Normativa 482/2012, que regulamenta a micro e minigeração distribuída de energia elétrica. A partir dessa normativa foi permitido que os próprios consumidores gerassem energia por meio de fontes renováveis, como por exemplo, os módulos fotovoltaicos. Os incentivos governamentais possuem papel fundamental na difusão de novas tecnologias energéticas, por meio da Resolução 482 entrou em vigor o sistema de compensação de energia elétrica, em que ocorre a compensação da energia gerada pelo consumidor como créditos em sua fatura de energia. (ANEEL). A resolução 687/2015 apresentou avanços e revisões das normas iniciais com objetivo de alavancar a geração distribuída no país, incluindo o aumento da potência máxima permitida para a micro e minigeração distribuída. Outro avanço em relação a Resolução 482 foi a criação de novas modalidades de geração distribuída.

Apesar da geração distribuída e a energia solar fazerem parte de um projeto nacional de transição energética, cabe ressaltar que as unidades federativas devem atuar de forma a maximizar o potencial solar do país como um todo. É o caso, por exemplo, de Minas Gerais, que em 2023 alcançou a liderança nacional na geração fotovoltaica nacional, sendo responsável por 13,5% da geração de energia solar no Brasil. (ABSOLAR, 2023). O destaque de Minas Gerais é fruto de ações governamentais e privadas, como é o caso do projeto Sol de Minas, que visa difundir a geração fotovoltaica pelo estado através de benefícios e incentivos. De acordo com a secretaria de desenvolvimento econômico do estado, tal iniciativa permitiu o estado se tornar líder nacional nessa forma de geração e fazer com que exista ao menos uma instalação fotovoltaica em cada município mineiro. A secretaria destaca que o Governo de Minas implantou incentivos fiscais para a geração solar e toda a sua cadeia produtiva. Por meio da Lei Estadual Nº 23.762/2021, os consumidores ficam

isentos do pagamento de ICMS incidente na energia consumida e depois compensada por meio de créditos de sistemas de geração distribuída de até 5 MW, valor que é de 1 MW nos demais estados. Além disso, o mesmo ocorre no ICMS sobre equipamentos, peças, partes e componentes utilizados nesses sistemas. Em 2022, os benefícios para o setor de energia solar fotovoltaica foram renovados por mais 10 anos, passando assim a ter vigência até 2032. (SEDE/MG, 2023).

Dentre os fatores que são considerados importantes para o crescimento da geração solar fotovoltaica, destaca-se a irradiação e disponibilidade solar, como apontado por Pravalie (2019). Além dos fatores geográficos, destaca-se os avanços tecnológicos, os incentivos financeiros e indicadores socioeconômicos como fatores relevantes para a instalação de projetos desse porte.

No Brasil, Rosa (2016), indica que o índice de radiação solar no país é superior quando comparado com países europeus. Ao comparar diretamente com a Alemanha e Espanha que são os líderes em geração fotovoltaica no mundo, o Brasil apresenta um índice de irradiação duas vezes maior, demonstrando o potencial brasileiro em geração solar. Minas Gerais, objeto desse estudo é o segundo estado com maior potencial de geração solar no país, atrás apenas de São Paulo. O estado mineiro tem capacidade de gerar apenas com energia solar, duas vezes o seu consumo residencial de energia elétrica. (EPE *apud* ROSA, 2014).

O potencial brasileiro nessa forma de energia é avaliado por autores como: (Morais, 2023; Brito, *etal*, 2023; Weirich *etal*, 2022; Oliveira, *etal*, 2010). De maneira localizada, alguns trabalhos mensuram a expansão fotovoltaica para algumas localidades específicas, como: sertão pernambucano (Silva, 2021); estado da Bahia (Gomes, *etal*. 2019) e para o nordeste como um todo (da Silva, 2023).

Sob a ótica econômica, alguns trabalhos econométricos buscam mensurar os fatores determinantes, os impactos setoriais e os efeitos macroeconômicos da geração solar ao redor do mundo. (Guney, 2022; Shrimali, 2020; Palage, *etal*, 2018; Byrne, *etal*, 2017) Alguns trabalhos também são aplicados para avaliar os resultados na sociedade brasileira. (Dias, 2020; Avelino, 2020; Giugni, 2019).

Para além da econometria tradicional, a utilização da econometria espacial permite avaliar de maneira regional e locacional os efeitos da expansão de geração solar. Alguns trabalhos internacionais utilizam tal abordagem. (Shao, 2021; Khezri, 2021). Para o território brasileiro (Romanello, 2022; Fochezatto, 2020; Sabadini; 2019). Outras abordagens econômicas também são adotadas para avaliar o tema, como por exemplo, modelos de Equilíbrio Geral Computável (Carvalho, 2019).

Além da literatura supracitada, existem lacunas sob tal área temática. Não existem, até onde pesquisamos, trabalhos que abordem os fatores socioeconômicos, regionais e espaciais que afetam a geração fotovoltaica sob o recorte do estado de Minas Gerais. Portanto, esse trabalho visa preencher essa lacuna, apresentando um modelo econométrico espacial com objetivo de identificar os determinantes para a expansão do potencial de geração solar no estado de Minas Gerais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Ao utilizar modelos econométricos tradicionais, a questão espacial não é tratada diretamente no modelo. Ou seja, considera-se que as observações de um local geográfico independem dos valores observados em distintas localidades. Portanto, ao trabalhar com variáveis que aparentemente violem esse pressuposto de independência deve-se utilizar métodos que abordem explicitamente a questão espacial na especificação do modelo. A dependência espacial ocorre quando a estrutura de correlação entre as diferentes observações se deriva de algum ordenamento espacial verificado pela posição relativa das observações em um determinado espaço geográfico, como descrito por Tobler (1979) como a primeira lei da geografia: “*tudo está relacionado a tudo mais, mas coisas próximas estão mais relacionadas do que coisas distantes*”. Portanto, a dependência espacial congrega a existência

de uma relação funcional entre o que acontece em um ponto no espaço e o que acontece em outro ponto (ANSELIN, 1988).

Em situações cujas propriedades são atendidas, o estimador de Mínimos Quadrados Ordinários é eficiente e não viesado. Entretanto, quando a amostra utilizada apresenta dependência espacial algumas suposições do estimador de MQO são violadas. De acordo com Anselin (1988), para que o estimador de MQO se mantenha consistente na presença de variáveis defasadas, o termo de erro não pode apresentar correlação serial. Entretanto, para modelos com defasagem espacial esse resultado não é válido em respeito às propriedades do termo de erro. Para que o estimador de MQO seja consistente, o modelo deve ser linear nos parâmetros e o termo de erro deve apresentar homoscedasticidade e média zero. Entretanto, a presença da matriz de pesos espaciais no modelo resulta em uma forma quadrática nos termos de erro. (ANSELIN, 1988).

Em um conjunto de dados a ser tratado com os pressupostos econométricos tradicionais, prevalece a hipótese nula de aleatorização espacial, ou seja, as observações se distribuem de maneira aleatória no espaço. A estatística I de Moran é testada para se rejeitar tal hipótese em favor da existência de clusters locais. A partir de tal, Anselin (1995) atribui o conceito de associação espacial local, *local indicator of spatial association* (LISA). Esse indicador, tem o objetivo de identificar clusters espaciais e possíveis *outliers*. A partir das informações espaciais torna-se possível classificar os clusters identificados como Alto-Alto, ou Baixo-Baixo, nesses casos, as observações estão rodeadas por vizinhos que possuem valores semelhantes. Ou, pode avaliar os *outliers*, Alto-Baixo ou Baixo-Alto, que são observações que apresentam valores discrepantes em relação aos vizinhos. Tal referência é relativa à média da variável avaliada. (ANSELIN, 2020).

Ao identificar uma correlação espacial através do índice de Moran e em posse da matriz de pesos correspondente é possível testar de maneira formal a presença da dependência espacial no modelo. São realizados quatro distintos testes, conhecidos como multiplicadores de Lagrange que indicam a presença e o tipo da dependência espacial. A dependência pode estar presente nas variáveis endógenas do modelo, no termo de erro, ou em ambas. Quando se indica a dependência espacial na variável dependente, utiliza-se um modelo de defasagem espacial, com objetivo de tratar tal correlação espacial. Esse modelo, especificado em Anselin (2014), é formalizado da seguinte maneira.

$$y = \rho W y + X \beta + \mu$$

A notação segue a modelagem tradicional de regressão, com a introdução de um operador de defasagem espacial $W y$ no lado direito da equação de regressão. y é um vetor $n \times 1$ de observações da variável dependente, W é um operador de defasagem espacial de ordem $n \times n$. $W y$ é o termo de defasagem espacial, com um parâmetro espacial autorregressivo ρ . X é uma matriz $n \times k$ de observações da variável explicativa com um vetor de coeficientes $k \times 1$, β , e um vetor de erros μ . Esse modelo pode ser generalizado para conter mais variáveis explicativas, adicionando termos à especificação (ANSELIN, 2014). Através desse modelo, pode ser capturado os efeitos de transbordamentos que são transmitidos na especificação pelo termo ρ .

3.2 Base de Dados

Nesse estudo, é analisado a geração distribuída de energia fotovoltaica no estado de Minas Gerais, em que a produção solar é destinada ao uso residencial na própria unidade consumidora. Dessa maneira, exclui-se da análise a geração do tipo compartilhada. Para a classificação de geração distribuída, utilizou-se a micro e a minigeração de energia, com um limite máximo de potência instalada de 5Mw por instalação.

A base de dados congrega os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a potência instalada em geração fotovoltaica para até setembro de 2023. As variáveis explicativas utilizadas dizem respeito a indicadores sociais para os 853 municípios de Minas Gerais. Com o objetivo de estimar os efeitos salariais, utilizou-se o salário médio dos trabalhadores disponibilizado pela RAIS; mesma fonte que originou os dados acerca do número de trabalhadores com até a quinta série completa para mensurar a escolaridade. Para o nível superior, utilizou-se os

dados de frequência líquida ao ensino superior (IBGE) Esse indicador avalia a razão entre o número de pessoas na faixa etária de 18 a 24 anos frequentando o ensino superior (graduação, especialização, mestrado ou doutorado) e a população total dessa mesma faixa etária. Adicionalmente, utilizou-se a variável de taxa de urbanização disponibilizada pela Fundação João Pinheiro (FJP). Além das variáveis socioeconômicas foi utilizado um fator de irradiação solar para os municípios mineiros, desenvolvido a partir da métrica de Energia Normalizada, mensurando o recurso solar potencial para a geração fotovoltaica em cada região.

Para todas as variáveis utilizadas tomou-se o logaritmo natural dos valores obtidos. A tabela 2 apresenta todas as variáveis utilizadas, fonte de obtenção e os sinais esperados na regressão.

Tabela 2: Variáveis utilizadas no modelo.

Sigla	Descrição	Fonte	Sinal Esperado
ln_potência	Potência Instalada em Kw	ANEEL	Variável Dependente
ln_salario	Indicador de Salário	RAIS	+
ln_até_5ª_série	% dos trabalhadores com até a 5ª série	RAIS	-
ln_freq_liq	% da população no ensino superior	IBGE	+
ln_urbanização	% da população em área urbana	FJP	+
ln_irradiação	Indicador de Irradiação e Recurso Solar	ANEEL	+

Fonte: elaborado pelos autores.

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas.

Tabela 3: Estatísticas descritivas das variáveis.

Variável	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
ln_potência	0,6931	5,5407	5,6023	10,8173
ln_salario	7,101	7,444	7,470	8,331
ln_até_5ª_série	-5,5215	-2,3645	-2,3904	-0,3011
ln_freq_liq	-5,240	-2,410	-2,482	-1,175
ln_urbanização	0,270	3,135	3,240	8,941
ln_irradiação	1,539	1,627	1,647	1,792

Fonte: elaborado pelos autores.

3.3 Especificação do Modelo

Com objetivo de identificar a robustez do modelo e entender qual matriz de pesos espaciais se ajusta melhor ao objeto de estudo, foram testados alguns tipos de matrizes. Inicialmente calculou-se a matriz de pesos do tipo Rainha de primeira ordem, e a partir dela, obteve-se a quantidade média de vizinhos para as observações, sendo assim, também foi testada matrizes do tipo k-vizinhos próximos. Para se escolher a matriz que seria utilizada na regressão final optou-se por aquela que conferiu melhor ajuste ao modelo (R quadrado). As matrizes testadas e os ajustes obtidos estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Matrizes de pesos espaciais testadas ao modelo

Matriz de Pesos	Rainha ⁵	Knn-4	Knn-5	Knn-6
R Quadrado	0,4131	0,4130	0,3838	0,3828

Fonte: elaborado pelos autores

Dado os resultados obtidos, após o cômputo das matrizes de pesos e seus respectivos ajustes ao modelo, optou-se por utilizar a matriz do tipo Rainha de primeira ordem para a especificação da

⁵ A partir da matriz rainha, obteve-se uma média de 5 vizinhos, portanto, testou-se para 4, 5 e 6 vizinhos próximos.

matriz utilizada na regressão espacial. Essa matriz foi utilizada tanto na regressão, como nos cálculos do I de Moran.

Ao realizar os testes de multiplicadores de Lagrange, optou-se por utilizar o modelo de defasagem espacial, por ser o que melhor representa a dependência espacial identificada no modelo. Portanto, a especificação com as variáveis utilizadas está disposta na equação de regressão abaixo:

$$\ln_{potencia} = \rho W \ln_{potencia} + \ln_{salario} \beta_1 + \ln_{at\acute{e}_5a} \beta_2 + \ln_{freq_liq} \beta_3 + \ln_{urb} \beta_4 \ln_{dens} + \ln_{irradia} \beta_5 + \mu$$

Em que no lado esquerdo da equação dispõe a variável dependente (potência instalada). Do lado direito, apresenta-se o parâmetro espacial autorregressivo ρ e o operador de defasagem espacial $W \ln_{potencia}$. Em sequência, apresenta-se os termos das variáveis explicativas com seus respectivos coeficientes β .

Por meio dessa regressão será estimado o impacto de tais indicadores, bem como os efeitos diretos e indiretos da vizinhança na potência instalada em cada município do estado de Minas Gerais. De acordo com o número de observações e a natureza dos dados, o modelo a ser utilizado será o estimador de momentos generalizados (GMM).

4. RESULTADOS

O primeiro resultado a ser avaliado, diz respeito ao I de Moran univariado e bivariado, calculados a partir da variável dependente e a sua interação com potência/irradiação. A tabela 5 mostra o indicador univariado para todas as variáveis utilizadas, e apresenta também o I de Moran bivariado para a variável de irradiação, em relação a variável dependente.

Tabela 5: I de Moran global das variáveis utilizadas

Variável	I de Moran Univariado	p-valor ⁶	I de Moran Bivariado ⁷	p-valor
Potência Instalada	0,248	0,001		
Salário Médio	0,285	0,001		0,001
Até_5ª Série	0,150	0,001		0,001
Frequência_Líquida_Superior	0,318	0,001		0,001
Urbanização	0,570	0,001		0,001
Irradiação	0,243	0,001	0,073	0,001

Fonte: elaborado pelos autores

A partir da estatística do I de Moran, confirmou-se a existência de dependência espacial nas variáveis utilizadas pelo modelo. O resultado, indica que a distribuição das observações no espaço não segue uma distribuição aleatória, portanto, o componente espacial é relevante e deve ser considerado pelo modelo de maneira adequada.

O indicador positivo do I de Moran univariado em todas as variáveis indica que a correlação espacial entre as observações é positiva, ou seja, vizinhos tendem a compartilhar características semelhantes para as variáveis. Em especial, para a variável dependente esse valor foi de 0,248, identificando a possibilidade de existência de clusters espaciais.

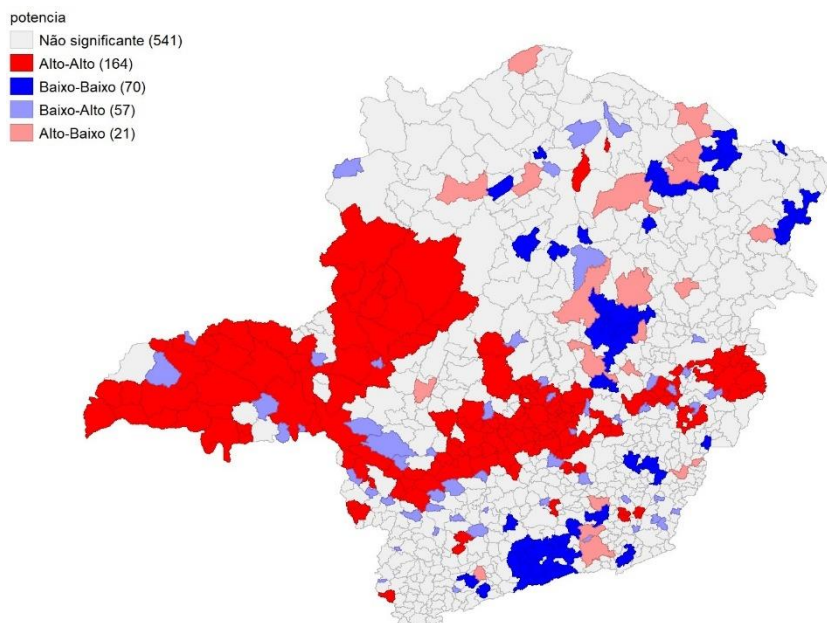
Ao contabilizar o I de Moran bivariado, cruzando as variáveis explicativas com a variável dependente, tem o objetivo de calcular a relação de vizinhança entre a variável dependente e suas covariadas. Por exemplo, no caso desse artigo, buscou-se verificar se existe correlação espacial entre

⁶ P-valor baseado em 999 permutações aleatórias.

⁷ Entre a variável dependente Potência Instalada e a variável explicativa indicada.

a potência instalada em uma observação i e o índice de irradiação de seus j vizinhos. Dessa maneira, se torna possível identificar a interação espacial entre ambas as variáveis.

Figura 1: I de Moran univariado local – Potência Instalada



Fonte: elaborado pelos autores com apoio do software Geoda.

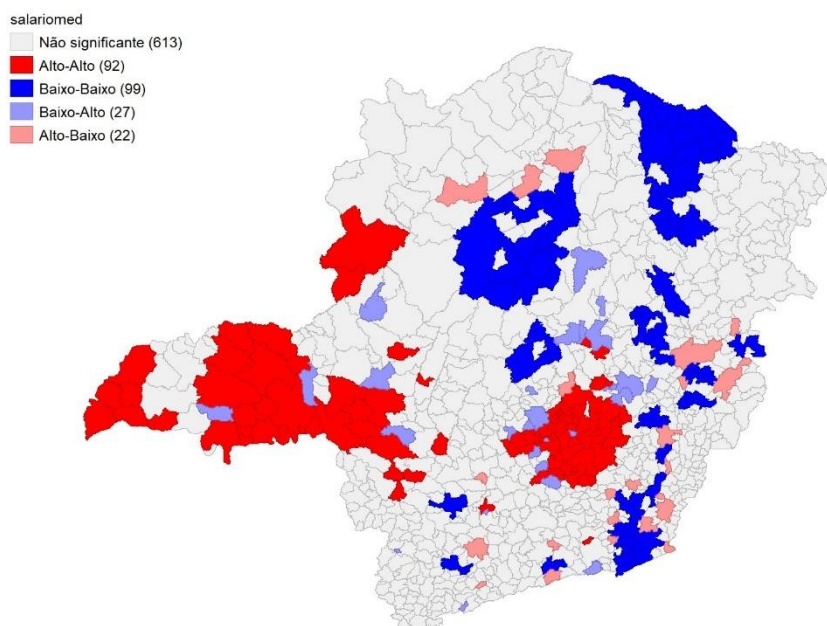
Por meio da Figura 1, é possível identificar clusters espaciais na potência instalada em geração solar no estado de Minas Gerais. Nota-se, em especial, a região do Triângulo Mineiro, Noroeste de Minas e a Região Metropolitana de Belo Horizonte, como as regiões que abrigam os clusters alto-alto na geração fotovoltaica no estado. Nessas localidades estão dispostos municípios que apresentam uma alta geração fotovoltaica e cujo vizinhos também apresentam a mesma característica.

Entretanto, além do cluster de alta-alta geração, também se nota a presença de alguns clusters de baixa-baixa geração. Essa classe, compreende municípios com baixa geração fotovoltaica instalada, e que são cercados por vizinhos com essa mesma característica. É o caso, principalmente, das regiões da Zona da Mata, Vale do Mucuri e Jequitinhonha e a região Central mineira. Nessas regiões supracitadas, a geração fotovoltaica apresenta um padrão inferior à média contabilizada no estado.

Os dados da variável dependente “potência instalada” dizem respeito ao somatório das potências geradas por cada um dos módulos fotovoltaicos presentes nos municípios mineiros. Essas instalações se referem a geração residencial, portanto, a instalação cabe aos habitantes das cidades, sendo assim, fatores socioeconômicos terão peso na escolha em se instalar ou não a energia solar.

De acordo com a literatura, a renda é uma importante variável para a instalação de painéis fotovoltaicos, dado o seu custo e o ainda baixo acesso da população como um todo a tal tecnologia. Portanto, acredita-se que em regiões com maior nível de renda, a geração fotovoltaica distribuída tende a se destacar. Dessa maneira, com objetivo de destacar como a renda formal se distribui espacialmente, será apresentado o I de Moran univariado também para a variável de salário médio.

Figura 2: I de Moran univariado local – Salário Médio



Fonte: elaborado pelos autores com apoio do software Geoda.

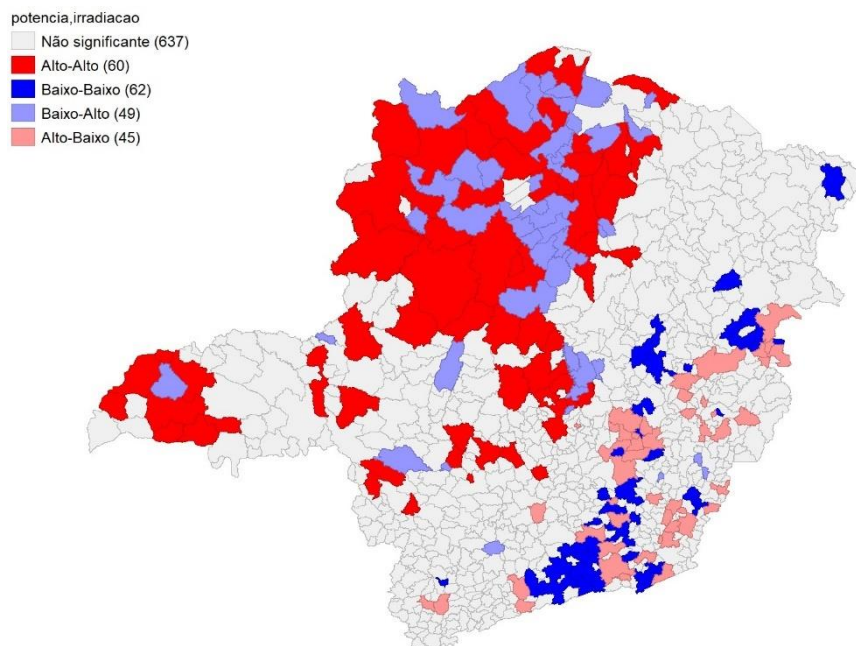
Nota-se que a região do Triângulo Mineiro, RMBH, Noroeste de Minas e Vale do Rio Doce, apresentam clusters alto-alto, ou seja, observações que possuem um coeficiente de salário acima da média global, cercado por vizinhos com essa mesma característica, dado uma matriz do tipo Rainha de primeira ordem. Por sua vez, a região norte, o Vale do Mucuri e Jequitinhonha e Zona da Mata mineira, apresentam observações que possuem baixo salário médio, cujo vizinhos também apresentam a mesma característica.

Ao avaliar individualmente cada uma das regiões mineiras, os resultados se relacionam com os indicadores socioeconômicos apresentados na Tabela 1, e que indicam a heterogeneidade social entre os municípios de Minas Gerais. Como renda, é um fator preponderante para a instalação de módulos fotovoltaicos, aquelas regiões mais abastadas tendem a apresentar maior potência instalada. O Triângulo mineiro, a RMBH, Noroeste de Minas e Oeste mineiro são aquelas regiões que apresentam os maiores índices de PIB e renda per capita. Na Figura 1, que apresenta o I de Moran univariado para a potência instalada, indica que essas regiões também são as maiores produtoras de geração fotovoltaica no estado, corroborando com os dados apresentados.

A análise inversa pode ser feita na região da Zona da Mata, Norte de Minas, e do Jequitinhonha em que se existe uma baixa potência instalada, e baixa renda associada, como também apresentado pelos indicadores da Tabela 1 e da Figura 2.

Uma análise distinta, que também pode ser apresentada para avaliar o fenômeno da energia fotovoltaica em Minas Gerais tem como partida o I de Moran Bivariado. De acordo com Anselin (2019) a interpretação do I de Moran Bivariado mede o grau em que o valor de uma determinada variável num local está correlacionado com os seus vizinhos para uma variável diferente. A correlação espacial nesse índice refere-se ao efeito dos vizinhos em uma observação central. Sendo assim, ao avaliar aspectos geográficos e que sejam comuns em relação aos vizinhos a mensuração bivariada pode ser interessante. Para esse estudo, será calculado o I de Moran Bivariado entre a potência instalada e o nível de irradiação. Ou seja, verifica-se a correlação entre a potência observada no município i , para com a irradiação apresentada em seus j vizinhos contíguos.

Figura 3: I de Moran Bivariado – Potência/Irradiação



Fonte: elaborado pelos autores com apoio do software Geoda.

Além dos fatores socioeconômicos, a literatura aponta também a necessidade de fatores geográficos favoráveis para o bom aproveitamento do sol como fonte energética. Dentre esses fatores, incluem a posição em relação a terra como a latitude, e os níveis de irradiação. A baixa irradiação pode explicar o cluster de baixa-baixa geração solar na Zona da Mata mineira. De acordo com o I de Moran bivariado, é uma região que apresenta observações com baixa potência instalada rodeada por vizinhos com baixa irradiação.

Outra região de interesse é o Norte de Minas, que apresenta observações que contém uma baixa potência instalada, entretanto, cercado por vizinhos com alta irradiação. Tal constatação pode ser um indicador para a necessidade de políticas públicas regionais que alavanquem o potencial energético da região. Trata-se de uma região que apresenta uma condição geográfica favorável para a geração solar, entretanto, pouco aproveitada em decorrência de condições socioeconômicas desfavoráveis.

A análise exploratória dos dados, sintetizadas pelas Figuras 1, 2 e 3 teve como objetivo apresentar a distribuição espacial das variáveis, que, segundo a literatura apresentam influência sobre a instalação de módulos fotovoltaicos. Sendo assim, constatou-se a grande heterogeneidade no estado de Minas Gerais, e notou-se que a distribuição espacial das observações não segue uma distribuição aleatória no espaço. Portanto, o modelo econométrico testará de maneira forma a relação entre as variáveis escolhidas.

Para o modelo econométrico espacial a ser utilizado, inicialmente, testou-se o modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para verificar a existência de dependência espacial e identificar qual modelo espacial seria o mais adequado para a base de dados apresentada. A matriz de pesos utilizada foi do tipo rainha de primeira ordem e o teste de dependência espacial está disposto na Tabela 6.

Tabela 6: Diagnóstico de Dependência Espacial

Test	MI/DF	Vaue	p-valor
Lagrange Multiplier (lag)	1	64,664	0,0000
Robust LM (lag)	1	7,270	0,0070
Lagrange Multiplier (error)	1	62,497	0,0070
Robust LM (error)	1	5,103	0,0239
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	69,767	0,0000

Fonte: elaborado pelos autores por meio do software Geoda Space.

Por meio do diagnóstico de dependência espacial, tanto o modelo de erro quanto o modelo de defasagem espacial apresentaram significância a um nível de confiança de 5% (p-valor < 0,05). Ao analisar os testes de robustez o modelo que mais se adequou foi o modelo de defasagem espacial (*spatial lag*). Logo, tal modelo foi o escolhido para ser utilizado na regressão. Os resultados da regressão tanto utilizando o estimador de MQO, quanto o modelo de defasagem espacial obtido via Método dos Momentos Generalizados (GMM) estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados das regressões

Variáveis	MQO	Spatial Lag
Constant	- 21,746*** (2,593)	- 19,694*** (2,595)
Rho	-	0,196*** (0,064)
ln_salario	1,839*** (0,297)	1,571*** (0,300)
ln_até_5ª_série	-0,686*** (0,080)	-0,694*** (0,077)
ln_freq_líquida	0,671*** (0,775)	0,648*** (0,753)
ln_urbanizacao	1,941*** (0,212)	1,772*** (0,212)
ln_irradiação	3,174*** (0,731)	2,839*** (0,715)
Akaike info criterion (AIC)	2764,132	-
Jarque Bera Test	27,102***	-
Breusch-Pagan Test	7,947	-
Anselin-Kelejian Test	-	0,178
R ²	0,376	0,413
N	853	853

Fonte: elaborado pelos autores.

Nota: *, **, *** denotam significância a 10%, 5%, e 1%; desvio padrão apresentado em parênteses.

Ao implementar as regressões, rejeita-se a hipótese nula de normalidade (Jarque-Bera) e não se rejeita a hipótese de heterocedasticidade (Breusch-Pagan).

O valor do parâmetro Rho significativo indica que existe um efeito de transbordamento espacial na variável de potência instalada. Tal resultado confirma a hipótese de não aleatoriedade espacial, indicando novamente a existência de clusters regionais. De forma geral, usuários próximos a

instalações de geração distribuída, estão mais propensos a também instalarem módulos fotovoltaicos. Ao não rejeitar a hipótese nula do teste de Anselin-Kelejian, após a utilização do modelo de defasagem espacial, indica que a autocorrelação espacial das observações foi tratada com sucesso pelo modelo proposto.

Todas as variáveis explicativas relacionadas ao desenvolvimento socioeconômico apresentaram o sinal esperado, indicando uma correlação positiva para com a instalação fotovoltaica. A exceção se dá no indicador de trabalhadores com até a quinta série completa, que apresentou valor negativo, sinal também esperado. A correlação positiva em relação ao salário médio indica que os municípios com maior índice de renda tendem a apresentar maior potência instalada. Esse resultado era esperado, principalmente pelo ainda alto custo de instalação e manutenção dos módulos fotovoltaicos. A tecnologia de geração solar na própria unidade consumidora ainda é recente e está em processo de difusão, o que torna a questão financeira um importante filtro para a instalação de novos módulos. A própria modalidade de geração solar na própria residência pode explicar a correlação positiva entre a variável dependente e a taxa de urbanização, pois, os grandes centros urbanos tendem a apresentar maior disponibilidade de telhados, condomínios, e zonas propícias para a instalação dos módulos fotovoltaicos.

As variáveis que indicam a escolaridade média dos habitantes também foram significativas. Os municípios que apresentam maior proporção de trabalhadores com baixa escolaridade, representado por aquelas pessoas que concluíram apenas até a quinta série do ensino fundamental tendem a ter baixa potência instalada. Logo, um aumento na proporção de trabalhadores com baixo nível educacional impacta negativamente na geração solar. Por outro lado, uma variação positiva na frequência dos habitantes no ensino superior impacta positivamente na instalação de módulos fotovoltaicos. Portanto, conclui-se que a dimensão educacional é relevante para o aumento da geração elétrica por meio solar.

Ao utilizar um modelo de defasagem espacial, os valores não podem ser interpretados de maneira direta, é necessário decompor os efeitos em impactos diretos e indiretos. O impacto direto diz respeito ao efeito das variáveis explicativas no próprio município de interesse, por sua vez, o impacto indireto mostra o efeito das variáveis explicativas sobre os vizinhos da região observada. A Tabela 8 apresenta a decomposição desses efeitos.

Tabela 8: Decomposição dos Efeitos

Variáveis	Efeito Direto	Efeito Indireto	Efeito Total
ln_salario	1,571	0,38298	1,95398
ln_até_5ª_série	-0,694	-0,16918	-0,86318
ln_freq_líquida	0,648	0,15797	0,80597
ln_urbanizacao	1,772	0,43198	2,20398
ln_irradiação	2,839	0,692095	3,531095

Fonte: elaborado pelos autores com base nos resultados.

Por meio da decomposição dos efeitos, como esperado, nota-se que o valor de efeito direto é superior ao efeito indireto, isso indica que os impactos no município observado são superiores em relação ao efeito transbordamento. Por exemplo, para a variável salário, uma variação de 1% no indicador reflete em um impacto total de 1,953% na geração fotovoltaica. Desse valor, 1,571% é percebido no município cuja instalação foi realizada, e 0,383% é o efeito de *spillover*, ou transbordamento, para os municípios vizinhos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho em questão buscou avaliar a existência de clusters regionais em relação a potência instalada de geração distribuída de energia fotovoltaica em Minas Gerais. Para tanto, foram calculados os indicadores globais de correlação espacial, e por meio de um modelo econométrico espacial verificou também o impacto de variáveis socioeconômicas em relação a variável dependente.

A conclusão que se apresenta é que é possível afirmar que no estado de Minas Gerais as instalações de módulos fotovoltaicos não seguem uma distribuição aleatória, sendo o componente espacial um fator relevante na análise. Através do I de Moran univariado, percebe-se a existência de clusters de alta-alta geração fotovoltaica bem localizados no estado, com destaque positivo para o Triângulo Mineiro, Noroeste de Minas e a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Essas regiões apresentam uma instalação de geração distribuída superior à média estadual, compondo um cluster em que os municípios são grandes produtores e estão cercados por vizinhos com essa mesma característica. Por sua vez, clusters de baixa-baixa produção fotovoltaica também foram apontados, como é o caso do Vale do Mucuri e Jequitinhonha, assim como a Zona da Mata mineira.

A regressão apresentada, aponta que os fatores de maior impacto para a existência de geração fotovoltaica, são os índices de irradiação, renda e urbanização. A partir desses prismas pode-se entender por que as regiões supracitadas não se destacam na geração solar no estado. O Vale do Mucuri e Jequitinhonha apresentam baixos índices de renda e de escolaridade, sendo por vezes considerada a mesorregião com maior pobreza no estado e menos desenvolvimento social, logo, os fatores socioeconômicos são preponderantes para o resultado nos municípios dessa região. Por sua vez, a Zona da Mata apresenta baixos índices de irradiação, o que pode ser a explicação para a baixa geração fotovoltaica na região. Para além, os resultados educacionais corroboram com a hipótese de que o fator renda é relevante para a geração solar, visto que aqueles municípios com maior acesso à educação se correlacionam com os principais salários.

Aponta-se resultados interessantes para a região do Norte de Minas Gerais, em que se registrou altos índices de irradiação, entretanto, uma baixa renda o que resulta em uma baixa geração fotovoltaica. Os níveis de irradiação são uma consequência geográfica, e a região norte apresenta altos níveis. Portanto, a questão da renda toma forma como a principal justificativa para a baixa geração nesses municípios. A região deve ser alvo de políticas públicas de incentivo, ou até mesmo subsídios para a instalação de módulos fotovoltaicos com o objetivo de mitigar a questão financeira e aproveitar o potencial geográfico da região. Dessa forma, impulsionando ainda mais a geração fotovoltaica no Estado.

Tais políticas públicas, devido a heterogeneidade do estado de Minas Gerais, devem ser focalizadas nas regiões de interesse, para que a absorção da tecnologia ocorra de maneira exitosa. No Estado, por exemplo, aqueles municípios que apresentam os maiores níveis de recurso solar, também são aqueles cujo nível de renda, escolaridade e pobreza são deficitários, denotando uma correlação entre ambas as variáveis. Logo, tanto a questão geográfica, como os fatores sociais são preponderantes para o desenvolvimento da geração fotovoltaica. Esses municípios que apresentam abundância de recurso solar (geográfico) devem receber políticas que visem consolidar o potencial ainda não atingido na geração solar.

Referências

- ANEEL. **Nota Técnica – Resolução 482, de 2012**. ANEEL, Brasília, 2012.
- ANEEL. **Nota Técnica – Resolução 687, de 2016**. ANEEL, Brasília, 2016.
- ANSELIN, L. **Local Indicators of Spatial Association – LISA**. *Geographical Analysis*, v. 27, p. 31-115. 1995
- ANSELIN, L. **Local Spatial Autocorrelation**. GeoDa Center, 2020.
- ANSELIN, L. **Spatial Econometrics: Methods and Models**. University of California, Springer-Science. 1998.
- ANSELIN, L; RAY, S. **Modern Spatial Econometrics in Practice: A guide to GeoDa, GeoDa Space and PySAL**. GeoDa Press, Chicago, Illinois. 2014
- ANSELIN, L. **Spatial Econometrics in Econometrics Research**. Center of Spatial Data Science, University of Chicago, 2021.
- CARVALHO, M.M; MAGALHÃES, A.S; DOMINGUES, E.P. **Impactos econômicos da ampliação do uso de energia solar residencial em Minas Gerais**. *Nova Economia*, v.29, n.2, p. 459-485.
- EPE/MME. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo**. Brasília, 2018.
- FOCHEZATTO, A; KORNEZIEWICZ, M; FOCHEZATTO, I. **Existem spillovers espaciais na expansão da energia solar no Brasil?** Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais ENABER, 2020.
- Fundação João Pinheiro (FJP). **Índice Mineiro de Responsabilidade Social**, Belo Horizonte, 2023.
- GIELEN, D; BOSHELL, F; SAYGIN, D; BAZILIAN, M.D; WAGNER, N; GORINI, R. **The role of renewable energy in the global energy transformation**. *Energy Strategy Reviews*, v. 24 p. 38-50, 2019.
- IEA, **Key World Energy Statistic:Transformation**. 2021.
- PRAVALIE, R; PATRICHE, C; BANDOC, G. **Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach**. *Clarivate*, v. 209, p. 692-721, 2019.
- RITCHIE, H; ROSER, M; ROSADO, P. **Energy: Electricity Mix**. *Our World in Data*, 2020.
- ROMANELLO, M. **Renewable energy power plants and economic development in Brazil's northeast region**. *Desarrollo y Sociedad, Unuversidad de los Andes*, n. 92, p. 169-194, 2022.
- ROSA, A; GASPARIN, F. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. *Revista Brasileira de Energia Solar*. Ano 7, v. 7, p. 140-147, dez/2016.
- SAMPAIO, P.G.V; GONZÁLES, M.O.A. **Photovoltaic solar energy: Conceptual framework**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 74, p. 590-601, 2017.
- Secretaria de Desenvolvimento Econômico – MG (SEDE/MG). **Projeto Sol de Minas**. Belo Horizonte, 2023.
- SHAO, X; FANG, T. **Performance analysis of government subsidies for photovoltaic industry: Based on spatial econometric model**. *Energy Strategy Reviews*, Elsevier, v. 34, 2021.

- GIUGNI, Raffael. **O Efeito do Câmbio na Produção e Crescimento de Energia Fotovoltaica no Brasil (2010-2019)**. INSPER, São Paulo, 2019.
- DIAS, Arthur. **Análise de Séries Temporais Aplicada a Difusão da Energia Fotovoltaica no Brasil**. Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- AVELINO, Lara. **Energia Solar Fotovoltaica Centralizada e Distribuída: O Caso do Brasil**. Universidade do Porto, Porto, 2020.
- PALAGE, Kristoffer; LUNDMARK, Robert; SODERHOLM, Patrick. **The innovation effects of renewable energy policies and their interaction: the case of solar photovoltaics**. *Environmental Economics and Policy Studies*, p. 217-254, 2018.
- BYRNE, John; TAMINIAU, Job, *etal.* **Multivariate analysis of solar city economics: impact of energy prices, policy, finance, and cost on urban photovoltaic power plant implementation**. *Wires Energy Environ*, 2017.
- SHRIMALI, Gireesh; AGARWAL, Navin; DONOVAN, Charles. **Drivers of solar deployment in India: A state-level econometric analysis**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020.
- GUNEY, Taner. **Solar energy and sustainable development: evidence from 35 countries**. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 29:2,187-194, 2021.
- KHEZRI, Mohsen; HESHMATI, Almas; KHODAEI, Mehdi. **The role of R&D in the effectiveness of renewable energy determinants: A spatial econometric analysis**. *Energy Economics*, v.99, jul/2021.
- SABADINI, Felipe. **Determinantes Socioeconômicos da Distribuição Espacial de Painéis Fotovoltaicos Residenciais no Brasil**. Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- OLIVEIRA, Alzira; MARIO, Mauricio; PACHECO, Marcos. **Fontes renováveis de energia elétrica: evolução da oferta de energia fotovoltaica no Brasil até 2050**. *Brazilian Applied Science Review*, 2021.
- SILVA, Neff. **Geração Fotovoltaica no Semiárido Pernambucano: Uma Explicação do Potencial Energético do Sertão do Pajeú**. *Revista Multidisciplinar do Sertão*, v.03, n.3, 2021.
- WEIRICH, Cintia; SOUZA, Samuel; NOGUEIRA, Carlos; NADALETI, William. **Análise do Potencial Brasileiro para a geração de eletricidade a partir de fontes de energia solar fotovoltaica e o biogás no contexto da geração distribuída**. *Research, Society and Development*, v.11, n.8, 2022.
- GOMES, Adjeferon; *etal.* **Análise do Potencial de Geração Fotovoltaica no Estado da Bahia**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- SILVA, Brenda. **Aproveitamento e Potencial da Energia Solar no Nordeste Brasileiro**. *Meio Ambiente*, v.5, n.1, 2023.
- MORAIS, Paulo. **Mapeamento do Potencial de Geração Fotovoltaica: Uma Conquista Sustentável**, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2023.
- BRITO, Everton; TEIXEIRA, Telma; SOUZA, Frank. **As Potencialidades e os Limites da Energia Fotovoltaica no Brasil**. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, n.16, 2023.