



Congresso de Administração,
Contabilidade, Economia
e Sustentabilidade

IMPACTOS ESPACIAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA EM MINAS GERAIS

Guilherme Perobelli Salgueiro

Doutorando em Economia (UFMG)

guilhermeperobelli@outlook.com

RESUMO

Este artigo, mensura os impactos espaciais da geração fotovoltaica para o autoconsumo nos municípios de Minas Gerais, por meio de um modelo de Econometria Espacial. Além da significância de indicadores socioeconômicos para a expansão dessa matriz energética. Para tal, foi testada e rejeitada a hipótese de aleatoriedade espacial para a potência instalada em energia solar no estado, confirmando a correlação espacial da variável dependente. Para avaliar de maneira formal essa correlação foi utilizado o I de Moran para a caracterização dos clusters de maior e menor geração fotovoltaica no Estado. Por meio de uma regressão do tipo de defasagem espacial, caracterizou-se os efeitos diretos e indiretos da renda, educação, saúde, urbanização, densidade populacional e irradiação para a geração solar em Minas Gerais, se mostrando significativa para todos os indicadores. Os resultados confirmam a relevância espacial na análise e propõe políticas públicas para potencializar a expansão da energia fotovoltaica no estado.

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

Patrocínio:



Apoio:



Realização:



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. Apesar de concentrarem a matriz energética mundial ao longo de toda a série histórica desde 1971, tais fontes de energia são grandes emissores de gases de efeito estufa, principalmente o gás carbônico (CO₂) (IEA, 2021).

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. Tal 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. Tais combustíveis 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.

Conforme apresentado por Gielen et al (2019), apesar de ser um processo lento, a transição para soluções de baixo carbono deve impactar de forma significativa na redução das emissões de gases de efeito estufa, visto que o dióxido de carbono representa dois terços das emissões totais dessa classe de gases. Os avanços tecnológicos na produção de energias renováveis tendem a reduzir custos e aumentar a competitividade dessa nova matriz energética, impulsionando o processo transitório.

O autor indica que 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 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.

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 41%. Tal crescimento, segundo o autor, é resultado da evolução tecnológica e do avanço das pesquisas no setor, bem como a ampliação de políticas de incentivos governamentais. Alguns 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 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 de eletricidade a partir de painéis solares. 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 ao comparar 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 de energia fotovoltaica apresenta duas modalidades distintas: a geração centralizada e a distribuída. O primeiro caso se caracteriza pela execução de projetos de grande porte, normalmente instalados distantes do consumidor final. Nessa modalidade se torna necessário a conexão em redes de alta tensão para a transmissão até os centros locais de distribuição que transportará a energia até os consumidores. A geração distribuída, por sua vez, 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, sendo elas: a geração remota, que permitiu a compensação dos créditos em diferentes locais, pertencentes a um mesmo titular; as múltiplas unidades consumidoras, que permite diferentes consumidores conectados a uma mesma geração, como prédios e condomínios.; e a geração compartilhada, que dá início aos consórcios de energia distribuída com a permissão de conectar consumidores em diferentes localidades. (ANEEL).

Apesar da geração distribuída e a energia solar fazer 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).

Dada a natureza desse trabalho cabe ressaltar os incentivos que permitiram o Estado alcançar posição de destaque nacional, sendo assim o presente artigo visa identificar os fatores e componentes espaciais na geração fotovoltaica no estado. O objetivo do estudo é identificar a existência de clusters locais nessa geração, o que possibilita o desenvolvimento de políticas públicas localizadas, permitindo a otimização do potencial solar no estado. Como recorte espacial, serão utilizados todos os 853 municípios do Estado, com objetivo de entender como está localizada a distribuição da geração fotovoltaica em Minas Gerais.

A utilização da Econometria Espacial se dá por entender que a distribuição da geração solar no estado não se dá de maneira aleatória, existindo um componente de dependência espacial entre as observações. O artigo está estruturado com essa seção de Introdução e contextualização, seguida por uma revisão bibliográfica, que busca entender o atual estado da arte em relação ao tema. Segue-se com a apresentação da metodologia e base de dados utilizadas no artigo, por fim, são expostos os resultados e as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura acerca do desenvolvimento da geração solar fotovoltaica está em crescimento e alguns fatores são considerados importantes para o êxito dos projetos dessa forma de geração elétrica. Um desses fatores é a irradiação e disponibilidade solar, como apontado por Pravalie (2019). O autor, indica que a viabilidade da maioria dos projetos fotovoltaicos que utilizam os módulos para converter raios solares em eletricidade reside no desenvolvimento em áreas com alta disponibilidade de recurso solar. Adicionalmente, além dos fatores geográficos, as questões tecnológicas, os incentivos financeiros e indicadores socioeconômicos são relevantes para a instalação de projetos desse porte.

Ao trazer a realidade para o Brasil, autores como Rosa (2016), indicam 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 desenvolvimento da literatura ainda é recente, entretanto, alguns autores fazem uso da econometria espacial para avaliar os impactos da transição energética. Como é o caso de Romanello (2022) que busca mensurar a relação entre a instalação de plantas de energia renovável e o desenvolvimento econômico da região nordeste utilizando uma abordagem de econometria espacial. A autora utilizou uma regressão espacial generalizada de mínimos quadrados em dois estágios com defasagem espacial, em que as variáveis dependentes foram PIB per capita e crescimento salarial e as variáveis independentes, a presença de plantas solares

e eólicas. As conclusões apontam que a presença das plantas renováveis se mostrou benéfica apenas em termos de crescimento do PIB, não sendo significativa em termos de crescimento salarial. Sob o prisma espacial os municípios mais beneficiados não foram os que as usinas estão instaladas, mas sim, os municípios vizinhos, demonstrando um maior efeito de transbordamento em relação ao efeito direto. (ROMANELLO, 2022).

Outro autor que apresenta uma perspectiva espacial para a expansão da energia solar no Brasil é Fochezatto (2020). Com objetivo de avaliar a dependência espacial na capacidade instalada de energia fotovoltaica no país. O autor utiliza um modelo de defasagem espacial e confirma a hipótese de dependência espacial, em escala nacional, utilizando as mesorregiões brasileiras. Além do componente espacial, foi verificada significância nos fatores de renda per capita e educação.

O tema também é abordado em estudos para outros países além do Brasil, como é o caso de Shao (2021), que busca analisar a performance de subsídios governamentais para a indústria fotovoltaica na China. A utilização da econometria espacial tem por objetivo verificar os efeitos de dependência e heterogeneidade espacial nas políticas do tipo *feed in tariff*, o modelo utilizado pelos autores foi do tipo erro espacial, em que a dependência é verificada no resíduo da regressão. Ademais, foi utilizado um painel com dados para 8 anos, em que se identificou autocorrelação espacial para 31 províncias chinesas. Para além dos efeitos espaciais, os autores concluem que políticas de incentivo e subsídios tiveram impactos positivos na instalação de painéis fotovoltaicos no país, além dos incentivos, verificou significância no impacto de políticas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Para além da literatura econométrica, o tema de transição energética com foco em geração solar também é tratado nos últimos anos. O trabalho de Carvalho (2019) busca mensurar sob a ótica do equilíbrio geral computável os impactos da ampliação do uso de energia solar para o autoconsumo no estado de Minas Gerais. O principal objetivo do estudo é simular os impactos econômicos da utilização de energia solar fotovoltaica, bem como, a utilização de aquecedores solares como fonte alternativa ao consumo elétrico. Os autores indicam que a geração fotovoltaica impacta em uma redução dos gastos das famílias para com eletricidade, em um valor superior ao investimento, gerando um incremento na renda dos consumidores.

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 determinado 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. Logo, as propriedades serão violadas e o estimador será tanto viesado como ineficiente para parâmetros com dependência espacial (ANSELIN, 1988).

Portanto, ao trabalhar com um conjunto de dados que aparenta possuir uma distribuição espacial não aleatória, deve-se verificar de forma empírica se essa assertiva é verdadeira. Para tanto, pode-se construir indicadores próprios para esse tipo de análise, como é o caso do I de Moran. O primeiro passo é a definição de uma matriz de pesos espaciais que melhor represente a estrutura de vizinhança do conjunto de dados. De maneira formal, conforme apresentado por Anselin (2014), os pesos indicam uma estrutura de vizinhança entre as observações como uma matriz W de dimensões $n \times n$, em que cada elemento w_{ij} da matriz são os pesos espaciais:

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix}$$

Os pesos espaciais w_{ij} são valores distintos de zero quando as observações i e j são vizinhos, caso contrário o peso será zero. De maneira simplificada, a matriz de pesos espaciais expressa a existência de uma vizinhança a partir de uma relação binária de pesos entre 0 ou 1 (ANSELIN, 2014). De maneira geral, existem distintas formas de se categorizar uma matriz de pesos, como, por exemplo, uma matriz de contiguidade ou uma matriz de distância. Uma matriz do tipo contiguidade diz respeito a duas unidades espaciais que compartilham uma fronteira comum, sendo a mais comum a matriz do tipo rainha. As matrizes de distância, por sua vez, indicam o conceito de vizinhança dado uma distância entre os dois pontos. Para o trabalho em questão foram testadas ambas matrizes de pesos e a que será utilizada para a construção da análise será aquela que apresentar melhor ajuste ao modelo proposto, de maneira específica, a matriz que conferir ao modelo um maior R quadrado.

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 conceito, 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 a 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.

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

A notação segue a modelagem tradicional de regressão, com a introdução de um operador de defasagem espacial Wy 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 $n \times n$. Wy 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 . No modelo em que não se adiciona o componente espacial, esse efeito não é capturado, pois o efeito da variável explicativa em Y é dado apenas pelo coeficiente de β .

A outra possibilidade de dependência espacial reside no termo de erro do modelo especificado. Nesse caso, de acordo com Anselin (1984), quando o resíduo de uma regressão apresenta dependência espacial, a suposição de uma matriz de covariância de erro esférica deixa de ser válida. Essa matriz assume uma forma geral $\Omega(\theta)$, tipicamente parametrizada em função de um pequeno número de coeficientes. Na econometria espacial, tais coeficientes são associados como um padrão de interação espacial, que é assumido como causa da dependência. (ANSELIN, 1984). A especificação desse tipo de dependência espacial é autorregressiva, para o modelo de regressão linear:

$$y = X\beta + \epsilon$$

Para o vetor de resíduos ϵ :

$$\epsilon = \lambda W\epsilon + \mu$$

O termo λ é o coeficiente autorregressivo espacial, W é a matriz de pesos espaciais utilizada e o termo μ é o resíduo que satisfaz as suposições clássicas de distribuição independente e idêntica (i.i.d) (ANSELIN, 1984). Os modelos de econometria espacial não são estimados pelo modelo tradicional de regressão por mínimos quadrados ordinários por violarem as pressuposições básicas de endogeneidade dos resíduos. Portanto, são utilizadas outras técnicas de inferência estatística como, por exemplo, pelo método de Máxima Verossimilhança e pelo método de Momentos Generalizados (GMM).

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 objetivo de estimar com acurácia utilizou-se o Indicador Mineiro de Responsabilidade Social, disponibilizado pela Fundação João Pinheiro (FJP), para as dimensões de renda, saúde e educação, com ano base de 2020. Adicionalmente, utilizou-se as variáveis de taxa de urbanização e densidade populacional, também disponibilizadas pela 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 potencial de geração fotovoltaica de cada região.

Para a dimensão de renda, os dados do índice se encontram apenas até 2014, portanto, com objetivo de atualizar o índice para o ano base de 2020 foi utilizada uma projeção linear utilizando a série histórica do índice entre 1998 e 2014. Para todas as variáveis utilizadas tomou-

se o logaritmo natural dos valores obtidos. A tabela 1 apresenta todas as variáveis utilizadas, fonte de obtenção e os sinais esperados na regressão.

Tabela 1: Variáveis utilizadas no modelo.

Sigla	Descrição	Fonte	Sinal Esperado Variável Dependente
ln_potência	Potência Instalada em Kw	ANEEL	
ln_renda	Indicador de Renda	FJP	+
ln_educa	Indicador de Educação	FJP	+
ln_saude	Indicador de Saúde	FJP	+
ln_densidade	População/Área	FJP	+
ln_urb	Taxa de Urbanização	FJP	+
ln_irradiação	Indicador de Irradiação e Potencial Solar	ANEEL	+

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em posse das variáveis e da base de dados do modelo, construiu-se uma estatística descritiva das variáveis utilizadas, conforme apresentado pela Tabela 2.

Tabela 2: Estatísticas descritivas das variáveis.

Variável	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
ln_potencia	0,6931	6,6904	6,7804	11,5136
ln_renda	-1,0581	-0,4883	- 0,4739	0,2041
ln_educa	-0,9467	-0,4684	-0,48	-0,2536
ln_saude	-1,0024	-0,3025	-0,325	-0,1054
ln_densidade	0,2624	3,1384	3,2425	8,9442
ln_urb	2,982	4,374	4,342	4,605
ln_irradiação	1,539	1,627	1,647	1,792

Fonte: elaborado pelo autor.

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 3.

Tabela 3: Matrizes de pesos testadas ao modelo

Matriz de Pesos	Rainha ¹	Knn-4	Knn-5	Knn-6
R Quadrado	0,4008	0,3902	0,3982	0,4006

Fonte: elaborado pelo autor

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

¹ A partir da matriz rainha, obteve-se uma média de 5 vizinhos, portanto, testou-se para 4, 5 e 6 vizinhos próximos.

especificação da 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:

$$\ln_{potencia} = \rho W \ln_{potencia} + \ln_{renda} \beta_1 + \ln_{saude} \beta_2 + \ln_{educa} \beta_3 + \ln_{urb} \beta_4 + \ln_{dens} \beta_5 + \ln_{irradia} \beta_6 + \mu$$

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. ANÁLISE DOS 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 cada uma das demais. Esse cálculo, tem como objetivo identificar a existência da correlação espacial nas variáveis presentes no modelo. A tabela 4, apresenta o cálculo desse indicador univariado para todas as variáveis utilizadas, e apresenta também o I de Moran bivariado para cada uma das variáveis explicativas, em relação a variável dependente.

Tabela 3: I de Moran global das variáveis utilizadas

Variável	I de Moran Univariado	p-valor ²	I de Moran Bivariado	p-valor
Potência Instalada	0,288	0,001		
Renda	0,466	0,001	0,272	0,001
Saúde	0,237	0,001	0,117	0,001
Educação	0,156	0,001	0,125	0,001
Urbanização	0,233	0,001	0,132	0,001
Densidade	0,482	0,001	0,123	0,001
Irradiação	0,244	0,001	0,131	0,001

Fonte: elaborado pelo autor

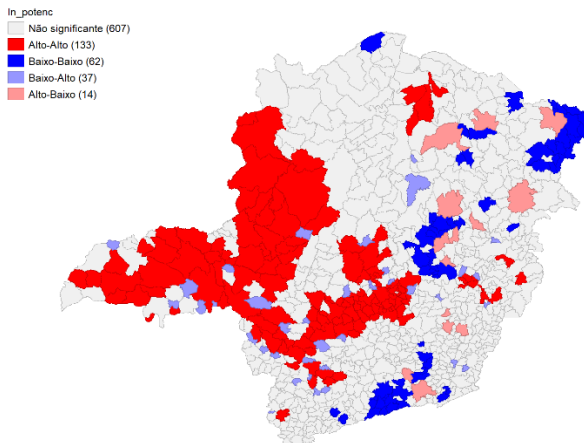
A partir da estatística do I de Moran, confirmou-se a existência de dependência espacial nas variáveis utilizadas pelo modelo. O resultado, indica que a distribuição das observações no espaço não segue uma distribuição aleatória, portanto, o componente espacial é relevante e deve ser considerado pelo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

O indicador positivo 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 0,288, identificando a possibilidade de existência de clusters espaciais.

² P-valor baseado em 999 permutações aleatórias.

Ao contabilizar o I de Moran bivariado, cruzando as variáveis explicativas com a variável dependente, tem o objetivo de identificar se o comportamento dos vizinhos de uma região de interesse. Por exemplo, em uma região i com alta potência instalada, qual será o comportamento dos seus j vizinhos em relação a renda? Dessa maneira, se torna possível identificar a interação espacial entre ambas variáveis.

Figura 1: I de Moran univariado local – Potência Instalada



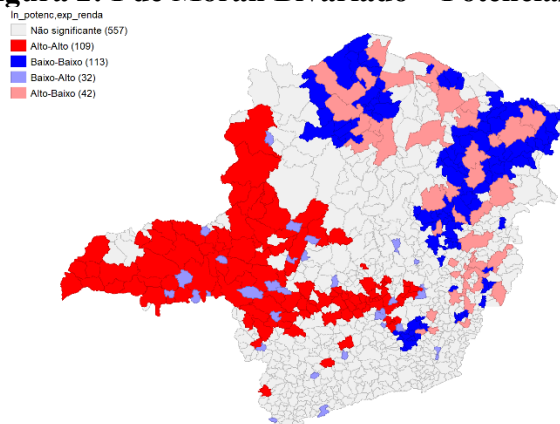
Fonte: elaborado pelo autor com apoio do software Geoda

Por meio da Figura 1, é possível identificar clusters espaciais na potência instalada em geração distribuída 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 na geração fotovoltaica no estado. Nessas localidades estão dispostos municípios que apresentam uma alta geração fotovoltaica e cujo vizinhos também apresentam uma alta geração.

Entretanto, além do cluster de alta geração, também se nota a presença de alguns clusters de 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.

Com objetivo de identificar um pouco da natureza desses clusters será apresentado também, o I de Moran bivariado, que relaciona a variável dependente com a renda e com a irradiação nos municípios do estado. A figura 2 e 3 apresentam esse indicador.

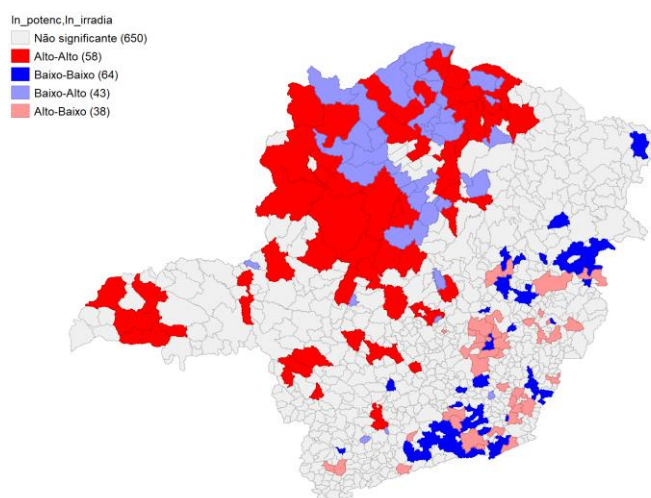
Figura 2: I de Moran Bivariado – Potência/Renda



Fonte: elaborado pelo autor com apoio do software Geoda

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 índice de renda, a geração fotovoltaica distribuída tende a se destacar. É essa relação que é indicada pelo I de Moran bivariado, pois congrega a potência instalada em uma determinada observação com a renda dos seus vizinhos. Pode ser o que impulse a geração no Triângulo mineiro, que apresenta um cluster de alta potência instalada, cercada por vizinhos com alta renda. Por sua vez, a região norte e o Vale do Mucuri e Jequitinhonha apresentam observações que além de apresentarem baixa potência instalada, apresentam também uma baixa renda nos vizinhos. Tal constatação pode indicar uma correlação entre ambas variáveis.

Figura 3 I de Moran Bivariado – Potência/Irradiação



Fonte: elaborado pelo autor 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 à terra como a latitude, e também os níveis de irradiação. A baixa irradiação pode explicar o cluster de 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 contêm uma baixa potência instalada, entretanto, cercada 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. Pode-se, portanto, ser alvo de políticas públicas que desenvolvam o potencial do norte de Minas.

Em termos da regressão a ser utilizada, inicialmente, testou-se o modelo de MQO para entender 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 4.

Tabela 4: Diagnóstico de Dependência Espacial

Test	MI/DF	Value	p- valor
Lagrange Multiplier (lag)	1	49,776	0,0000
Robust LM (lag)	1	7,791	0,0053
Lagrange Multiplier (error)	1	43,617	0,0000
Robust LM (error)	1	1,631	0,2015
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	51,407	0,0000

Fonte: elaborado pelo autor por meio do software Geoda Space

Através do diagnóstico de dependência espacial, tanto o modelo de erro quanto o modelo de defasagem espacial foram significativos, portanto, deve-se ser analisado os testes robustos. Sob essa ótica, apenas o modelo de defasagem espacial se mostrou significativo, 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 estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados das regressões

Variáveis	MQO	Spatial Lag
Constant	- 3,147*** (1,586)	- 4,348*** (1,509)
Rho	-	0,335*** (0,077)
ln_renda	2,117*** (0,235)	1,518*** (0,274)
ln_educa	1,083*** (0,516)	0,945* (0,516)
ln_saude	1,037*** (0,327)	0,754** (0,315)
ln_densidade	0,404*** (0,397)	0,373*** (0,038)
ln_urb	0,830*** (0,227)	0,837*** (0,200)
ln_irradiação	4,171*** (0,713)	3,235*** (0,723)
Akaike info criterion (AIC)	2683,620	-
Jarque Bera Test	31,134***	-
Breusch-Pagan Test	32,783***	-
Anselin-Kelejian Test	-	0,622
R ²	0,359	0,401
N	853	853

Fonte: elaborado pelo autor

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

Ao realizar as regressões, rejeita-se a hipótese nula de normalidade e de heterocedasticidade. Portanto, ao realizar a regressão do modelo de defasagem espacial foi utilizado o modelo com correção de White.

O valor do parâmetro Rho significativo e relativamente alto 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 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 espacial.

Em relação as variáveis explicativas relacionadas ao desenvolvimento humano, todas apresentaram o sinal esperado, indicando uma correlação positiva para com a instalação fotovoltaica. O fator de maior relevância, como esperado, foi o indicador de renda, ou seja, municípios com maior índice de renda tende a apresentar uma 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.

Os indicadores de saúde e educação foram significantes a 5% e 10%, respectivamente, também com correlação positiva. Esse resultado também era esperado dado que ambos indicadores estão relacionados a aspectos de desenvolvimento humano e tecnologias recentes tendem a se difundir de forma inicial em regiões com maior nível de desenvolvimento.

Densidade populacional e urbanização também apresentaram significância e o valor positivo se correlaciona com a própria natureza da geração elétrica para o autoconsumo. Um dos fatores necessários para a instalação dos módulos fotovoltaicos é a presença de telhados, e as regiões urbanas e mais densas apresentam uma maior disponibilidade para a instalação desses módulos.

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 6 apresenta a decomposição desses efeitos.

Tabela 6: Decomposição dos Efeitos

Variáveis	Efeito Direto	Efeito Indireto	Efeito Total
ln_renda	1,518	0,767	2,285
ln_educa	0,945	0,478	1,423
ln_saude	0,754	0,381	1,135
ln_densidade	0,373	0,189	0,562
ln_urb	0,837	0,423	1,260
ln_irradiação	3,235	1,636	4,871

Fonte: elaborado pelo autor 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 de renda, uma variação de 1% no indicador reflete em um impacto total de 2,285% na geração fotovoltaica. Desse valor, 1,518 é percebido no município cuja instalação foi realizada, e 0,767% 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 potencia instalada de geração distribuída de energia fotovoltaica em Minas Gerais. Para tanto, foram calculados índices de aglomeração 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 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 vizinho com essa mesma característica. Por sua vez, clusters de 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 e de renda. A partir desses dois prismas pode-se entender porque as regiões supracitadas não se destacam na geração solar no estado. O Vale do Mucuri e Jequitinhonha apresenta baixos índices de renda, sendo por vezes considerada a mesorregião com maior pobreza no estado, logo, o fator renda é preponderante 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.

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.

Por fim, identifica-se que o Estado de Minas Gerais apresenta destaque nacional na geração solar por advento das suas qualidades geográficas, mas também pela renda apresentada na região. Portanto, para o futuro, políticas públicas localizadas podem ampliar ainda mais a geração solar no estado.

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.