

Existem *spillovers* espaciais na expansão da energia solar no Brasil?

Adelar Fochezatto¹
Mariza Bethanya D. V. Korzeniewicz²
Isabela Mallmann Fochezatto³

Resumo

O uso de energia solar vem aumentando mundialmente. No Brasil essa tendência mostra uma forte aceleração nos anos mais recentes por se tratar de um tipo de energia acessível, abundante, inesgotável e limpa. Quando falamos sobre inovações, sabemos que a tendência é existir forte dependência espacial, pois as informações práticas sobre a utilização das mesmas são mais acessíveis aos que estão mais próximos, e, dito isso, o uso prático de energia solar ainda é novidade para a maior parte da população. Além da imitação, há outros fatores que influenciam a difusão do uso deste tipo de energia, como a renda e a educação. O objetivo deste estudo é analisar os fatores associados à expansão da capacidade instalada de energia solar de pequena escala destinada ao consumo residencial nas mesorregiões do Brasil. Entre esses fatores, de particular interesse é verificar o efeito da dependência espacial. Para capturar este indicativo, é usado um modelo de econometria espacial. Os resultados confirmam a presença de transbordamentos espaciais e, juntamente com a renda per capita e a educação, são os principais fatores que favorecem a expansão deste tipo de energia nas mesorregiões do Brasil.

Palavras-chave: recursos naturais; energia solar; dependência espacial.

Abstract

The use of solar energy is increasing worldwide. In Brazil, that trend shows a strong acceleration in recent years as it is an accessible, abundant, inexhaustible and clean type of energy. When we talk about innovations, we know that the tendency is to have a strong spatial dependence, because practical information on the implementation of it is more accessible to those who are closest, and, having said that, the practical use of solar energy is still new to most part of the population. In addition to imitation, there are other factors that influence the widespread use of this type of energy, such as income and education. The objective of this study is to analyze the factors associated with the expansion of the installed capacity of small-scale solar energy intended for residential consumption in the mesoregions of Brazil. Among these factors, of particular interest is to verify the effect of spatial dependence. To capture this indicative, a spatial econometrics model is used. The results confirm the presence of spatial overflows and, together with per capita income and education, are the factors that explain the expansion of this type of energy in the mesoregions of Brazil.

Keywords: natural resources; solar energy; spatial dependence.

JEL: R11; Q5; Q4

Área Enaber: 9

¹ Doutor em Economia. Professor Titular da PUCRS. Pesquisador do CNPq. E-mail: adelar@pucrs.br

² Mestranda em Economia do Desenvolvimento no PPGE/PUCRS. E-mail: bethanyadvk@gmail.com

³ Graduada em Economia na Escola de Negócios/PUCRS. E-mail: isafoche@msn.com

1. Introdução

O uso de energia de placas solares vem crescendo exponencialmente ao longo dos últimos anos, dentre os principais fatores de seu crescimento está o fato de ter se tornado economicamente mais acessível. Vários estudos para diferentes países destacam o alto crescimento da geração de energia solar fotovoltaica (FV). Muitos destacam o alto potencial deste tipo de energia por ela ser acessível, abundante, inesgotável e limpa. Um dos principais entraves apontados para o seu crescimento é o custo das instalações. Apesar de estar caindo nos últimos anos, este aspecto tem motivado pesquisas e a formulação de políticas específicas.

Dados da Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD (2014) mostram que, nos últimos dez anos, a capacidade instalada acumulada de energia FV cresceu em média 49% ao ano. Este crescimento passou a ser mais acentuado a partir de 2010, principalmente na Alemanha, Itália, Estados Unidos, China, Japão e Espanha. Apesar disso, a participação do consumo desta energia no total ainda é pequena. Os destaques são Alemanha e Itália, com 5,3% e 7%, mas na Europa como um todo, a participação é de apenas 2,6%. Em termos de projeções de longo prazo em nível mundial, a OECD projeta que a energia FV venha a representar 2% do total da geração de eletricidade em 2020, 7% em 2030 e 16% em 2050.

A literatura aponta algumas ressalvas ao uso deste tipo de energia. A primeira refere-se a cola utilizada nos equipamentos que tem em sua fórmula componentes poluentes que, em contato com a água, podem contaminá-la. A segunda refere-se ao risco de combustão, caso as placas solares sejam submetidas a temperaturas muito elevadas. A terceira ressalva é a preocupação com a reciclagem das placas, por terem uma vida útil de uso estimada em 30 anos (FTHENAKIS, 2000). Apesar dessas ressalvas, a energia solar é considerada uma energia limpa, já que não emite gases poluentes, além de possibilitar a redução da degradação ambiental e de melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Há também benefícios socioeconômico, pois aumenta a independência de energia regional ou nacional e acelera o processo de eletrificação de áreas rurais (TSOUTSOS, 2005).

O Brasil vem acompanhando esta tendência, tendo acelerado o ritmo de expansão no período mais recente, especialmente após 2016, considerando a potência instalada. Embora a energia solar ainda não seja o tipo de energia renovável mais consumido, vem crescendo e aumentando a sua participação na matriz energética nacional (ESPOSITO e FUCHS, 2013). Em 2017, o uso das energias renováveis solar e eólica ultrapassou o uso de energia nuclear no Brasil, de acordo com os dados da OECD (2019). Atualmente o país possui um total de 84.511 usinas instaladas gerando 1.031.118,20 kW de potência.

Essa expansão, no entanto, difere entre países e entre as regiões dentro dos países. Primeiro por causa das diferenças naturais relativas às condições climáticas, particularmente à incidência de radiação solar. Além destes, a literatura aponta outros fatores socioeconômicos, como renda, educação, características das estruturas urbanas e políticas locais. Outro fator relevante associado à expansão deste tipo de energia é a dependência espacial, que se relaciona com a imitação, difusão de hábitos ou interação e compartilhamento de informações entre vizinhos.

O objetivo deste estudo é analisar os fatores associados à expansão da capacidade instalada de energia FV destinada ao consumo residencial no Brasil. Entre esses fatores, de particular interesse é verificar o efeito da dependência espacial. Quando o tema de interesse representa uma novidade (inovação), como é o caso do uso da energia solar, a dependência espacial tende a ser mais acentuada no período inicial e tende a diminuir à medida que os conhecimentos se difundem.

Além desta introdução, na seção dois é feita uma revisão bibliográfica na qual é realizada uma breve apresentação dos tipos de placas fotovoltaicas existentes no mercado, seguido por uma revisão de literatura de estudos realizado sobre o tema em outros países, seguidos pelos estudos realizados sobre o Brasil. A terceira seção apresenta a metodologia e a base de dados utilizada. A quarta seção é dedicada à análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as principais conclusões e recomendações de potenciais políticas.

2. Revisão bibliográfica

A literatura relacionada ao tema destaca o alto crescimento deste tipo de energia verificado nos últimos anos bem como a perspectiva de aumento de sua importância no futuro. O seu crescimento, no entanto, não é homogêneo entre países ou entre regiões subnacionais. Estas diferenças se relacionam com fatores naturais, custos das instalações e outros fatores socioeconômicos. Entre os estudos que fazem uma revisão a respeito das motivações e barreiras para a adoção desta tecnologia em nível regional estão Balcombe et al (2013); Balta-Ozkan et al (2015) e Copiello e Grillenzoni (2017).

O primeiro fator para que haja energia FV é a presença de radiação solar (ZHANG et al, 2011; BALCOMBE et al, 2013; BALTA-OZKAN et al, 2015; COPIELLO e GRILLENZONI, 2017). No Brasil, a radiação solar é abundante em todo o território nacional, com uma incidência relativamente maior em áreas das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

O sistema de energia FV é produzido através da captação de potência elétrica dos raios solares, por meio das células fotovoltaicas existentes nas placas. Há três tipos de tecnologia de instalação deste tipo de energia: painel rígido, também conhecido por silício cristalino; filmes finos, também chamado de silício amorfo; e, por último, a célula orgânica (OPV). Os painéis fotovoltaicos de silício cristalino representam 80% do consumo mundial, podendo ser de diferentes variações de silício, seguidos pelos filmes finos, que representam quase o restante do consumo do mercado fotovoltaico (ESPOSITO e FUCHS, 2013).

O segundo fator importante que influencia a difusão deste tipo de energia é o seu relativamente alto custo de instalação. Em vista disso, espera-se que políticas de incentivo à adoção de energia FV e a renda per capita tenham uma relação positiva com o aumento do número de instalações e com a potência instalada (ZHANG et al., 2011; ZHAI e WILLIAMS, 2012; SARDIANOU e GENOUDI, 2013; SCHAFFER e BRUN, 2015; VASSEUR e KEMP, 2015). No Brasil, é uma relação inversa entre a renda per capita e a incidência de radiação solar. Com isso, é de se esperar uma relação inversa entre radiação solar e aumento do número de produtores e da potência instalada. Ao mesmo tempo espera-se uma relação positiva com a renda per capita.

Outros dois fatores associados que influenciam a instalação de equipamentos de energia solar são a densidade populacional e o tipo de configuração urbana (SCHAFFER e BRUN, 2015; GRAZIANO e GILLINGHAM, 2015; BALTA-OZKAN et al., 2015; SOMMERFELD et al., 2017). Estas duas variáveis tendem a ser correlacionadas. Por exemplo, uma maior densidade populacional tende a ser maior em cidades com alta presença de prédios e arranha-céus e isso diminui o potencial de instalação de usinas em relação a cidades menos densas, mais espalhadas e com participação relativa de casas maior. Espera-se, portanto, que a densidade demográfica seja associada negativamente com o número de usinas e com a potência instalada per capita. Os estudos de Bollinger e Gillingham (2012), Rode e Weber (2012) e Graziano e Gillingham (2014) encontraram resultados que confirmam esta hipótese. Suas descobertas indicam que centros urbanos menores contribuem para a adoção de energia FV residencial mais do que áreas urbanas maiores.

Outros fatores socioeconômicos apontados pela literatura são os níveis educacionais da população e o grau de consciência em relação à preservação do meio ambiente e com desenvolvimento sustentável. Estes dois fatores tendem a estar positivamente associados. Além destes, a literatura aponta ainda a proporção de casas próprias (inverso de alugadas), a idade, o gênero e o estado civil do proprietário, bem como o tamanho dos arranjos familiares (SARDIANOU e GENOUDI, 2013; BALCOMBE et al, 2013; BALTA-OZKAN et al, 2015; SCHAFFER e BRUN, 2015; GRAZIANO e GILLINGHAM, 2015; SOMMERFELD et al, 2017). Em estudo realizado para Grécia, Sardianou e Genoudi (2013) concluem que indivíduos de meia-idade e com alto grau de instrução são relativamente mais propensos a adotar fontes renováveis de energia. Concluem ainda que a renda afeta positivamente esta adoção e que o estado civil e gênero não são fatores estatisticamente significativos.

Outra motivação para a adoção de energia FV confirmada pelos estudos é o efeito de pares, que pode se dar por inspiração, difusão de hábitos, emulação comunitária ou pelo compartilhamento informal de informações entre vizinhos (SCHELLY, 2014). Este tipo de efeito, na literatura da análise espacial, é conhecido por dependência espacial ou de efeitos de transbordamento espacial (ANSELIN, 1988; LeSAGE e PACE, 2009; ALMEIDA, 2012). A dependência espacial caracteriza muitos fenômenos sociais, significando que o comportamento dos agentes é afetado pelo que acontece nas áreas circunvizinhas (COPIELLO e GRILLENZONI, 2017).

Em termos teóricos, Manski (1993) identifica três tipos potenciais de efeitos de grupos no comportamento individual: endógenos, contextuais e correlacionados. No primeiro caso, o comportamento individual influencia o comportamento médio do grupo e, ao mesmo tempo, é influenciado pelo comportamento do grupo. No segundo caso, o comportamento individual pode ser influenciado por características exógenas ao seu grupo. Por fim, os indivíduos de um grupo tendem a se comportar de maneira semelhante, pois possuem características similares ou enfrentam condições políticas, institucionais ou ambientais similares (BALTA-OZKAN et al, 2015).

Vários estudos confirmam a importância das instalações ocorridas nos arredores, especialmente no passado recente, sobre a adoção e difusão de energia FV residencial (RICHTER, 2013; MÜLLER e RODE, 2013; SCHAFFER e BRUN, 2015; GRAZIANO e

GILLINGHAM, 2015; BALTA-OZKAN et al, 2015; PALM, 2016; RODE e WEBER, 2016; DHARSHING, 2017; ZHAO et al, 2017; COPIELLO e GRILLENZONI, 2017b). Bollinger e Gillingham (2012) testaram os efeitos na difusão de energia FV residencial na Califórnia, destacando dois aspectos que originam os transbordamentos sociais, a visibilidade dos painéis fotovoltaicos e a informação repassada boca a boca. Graziano e Gillingham (2015) encontram evidências de que os efeitos de transbordamentos diminuem ao longo do tempo e com a distância geográfica. Zhao et al (2017) afirmam que a difusão da adoção de energia FV residencial pode ser descrita como a formação de clusters espaciais que tendem a se espalhar para as áreas circundantes. Segundo Schaffer e Brun (2015), estes efeitos acabam desempenhando um efeito maior do que a presença de radiação solar. Rode e Weber (2012), em estudo para Alemanha, concluem que a dependência espacial é mais forte quando se usa unidades geográficas mais desagregadas o que leva a crer que o comportamento imitativo na adoção de energia FV residencial é altamente localizado.

Além dos aspectos naturais e aos relacionados ao tipo de energia, outros fatores, como a regulamentação e incentivos governamentais, explicam o alto crescimento verificado. No Brasil, os processos de regulamentação da geração e distribuição de energia solar são recentes. Em 2012, a ANEEL estabeleceu algumas regras para a geração de energia solar por particulares (minigeração). A resolução normativa n. 482 foi o primeiro ato regulatório a permitir o sistema de compensação, onde a energia produzida por painéis fotovoltaicos instalados em telhados gera créditos que podem ser compensados, abatendo assim os custos da conta de luz. Este sistema de compensação é conhecido como *net-metering*. Ele representa o marco inicial da geração solar distribuída no Brasil. Em 2015 algumas regras foram alteradas, aumentando o limite de capacidade das unidades, reduzindo a burocracia de conexão de sistemas e criando a geração compartilhada.

Em termos de incentivos governamentais, existe uma série de isenções fiscais e condições especiais de financiamento para a produção e comercialização de equipamentos para a geração de energia solar: a) isenção de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI) para painéis fotovoltaicos e similares bem como para elementos acessórios, como cabos, conectores e estruturas de suporte; b) isenção de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para a comercialização de geradores fotovoltaicos (não estão incluídos os inversores e outros componentes do sistema); isenção de ICMS da energia solar injetada na rede, fazendo que as unidades produtoras e consumidoras passassem a pagar o imposto apenas sobre o consumo líquido de energia (consumida menos injetada na rede); e c) financiamento da Caixa Econômica Federal a pessoas físicas para a aquisição de equipamentos com quitação em até 240 meses com taxas de juros de mercado.

Existe ainda o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia. O mesmo foi criado para estimular a geração distribuída no país e visa criar linhas de crédito e formas de financiamento que ajudem a ampliar a instalação destes sistemas em residências, comércio e indústrias. Além das linhas de crédito, também pretende estabelecer valores de referência para a venda de energia solar, estruturar a comercialização da energia excedente; e promover a atração de investimentos para a nacionalização de tecnologias em energias renováveis.

3. Metodologia

Quando se trabalha com dados desagregados por subdivisões territoriais deve-se cogitar o uso da econometria espacial, pois é comum haver dependência espacial entre as observações. A econometria tradicional considera que os valores observados em um local (região) são independentes dos valores observados em outros locais, sejam eles próximos ou não. Dependência espacial ocorre quando o valor de uma variável de interesse em um local específico depende do valor desta mesma variável em locais próximos. Pode-se dizer também que existe dependência espacial quando os valores da variável de interesse formam clusters espaciais. Quando isso acontece, o método de estimação tradicional não é apropriado porque os resultados poderão ser viesados e/ou ineficientes.

Sob condições específicas, MQO é o melhor (mais eficiente) estimador linear não viesado (best linear unbiased estimator). No entanto, a presença de dependência espacial viola algumas suposições do estimador MQO. Dois casos são especialmente críticos: suposição de que não há nenhuma variável omitida, ocasionando resultados viesados; e suposição de que os erros são independentes e homocedásticos, que pode ser rejeitada por causa de variáveis omitidas ou outros fatores. O primeiro caso pode ser corrigido utilizando um modelo tipo SAR (Spatial Autoregressive Model) e o segundo utilizando um modelo tipo SEM (Spatial Error Model).

O modelo de regressão clássico assume normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos, dado o conjunto de regressores. Isto tem duas implicações: a) elementos constantes na diagonal principal da matriz de variâncias-covariâncias (homocedasticidade); e b) valores iguais a zero fora da diagonal principal da matriz de variâncias-covariâncias (ausência de dependência entre as observações). A violação destas propriedades é muito comum de acontecer quando se trabalha com dados espaciais, devido à presença de dependência e heterogeneidade espacial. Quando isso acontece o estimador MQO perde suas propriedades.

O primeiro passo na análise econométrica espacial é verificar se efetivamente existe dependência espacial. Para isso, em geral se observa o comportamento dos resíduos do modelo não espacial verificando se são espacialmente independentes ou se formam clusters espaciais. Pode-se, também, calcular o I de Moran, mas para isso é preciso definir a matriz de pesos espaciais que melhor represente a verdadeira estrutura espacial das informações utilizadas. Várias são as possibilidades de construção destas matrizes, usando a contiguidade geográfica (queen ou rook), a distância física (diferentes funções de decaimento) ou definindo um determinado número de vizinhos mais próximos (ANSELIN, 1988; LeSAGE e PACE, 2009; ALMEIDA, 2012)

Com a matriz de pesos é possível testar formalmente a presença de dependência espacial nos resíduos da regressão não espacial. Existem quatro testes para verificar a presença de dependência espacial (LM ou multiplicadores de Lagrange), os quais indicam se existe dependência espacial e o tipo da mesma, se na variável endógena, nos resíduos ou em ambos. Além de diagnosticar a natureza da dependência espacial, estes testes indicam, também, qual o modelo mais adequado.

Se a dependência espacial está apenas na variável dependente, então o operador de defasagem espacial desta variável é adicionado ao modelo clássico. Neste caso é usado o modelo SAR, que apresenta a seguinte especificação:

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon$$

em que: WY é o operador de defasagem espacial; ρ é o parâmetro de autocorrelação ou dependência espacial; X é uma matriz de variáveis explicativas; β são parâmetros estimados associados às variáveis explicativas; e ε é o termo de erro, com as propriedades tradicionais (independente e homocedástico). O valor esperado de Y é $E(Y) = (I - \rho W)^{-1}(X\beta)$. Desta forma este tipo de modelo é especial porque ele captura os efeitos de transbordamentos, que são transmitidos no sistema via $(I - \rho W)^{-1}\beta$. No modelo não espacial este efeito não é capturado, pois o efeito de X sobre Y é dado apenas por β .

Se a dependência espacial está nos resíduos da regressão, utiliza-se o modelo SEM. Este modelo é mais simples que o SAR e os seus resultados não diferem muito do MQO. Formalmente, ele é definido por:

$$Y = X\beta + \mu$$

$$\mu = \lambda W\mu + \varepsilon$$

em que: $W\mu$ é o operador de defasagem espacial dos erros; λ é o parâmetro de dependência espacial dos erros; μ é um termo de erro sem as propriedades usuais (não independente); e ε são os resíduos com as propriedades usuais. Neste caso, o valor esperado de Y é igual ao modelo MQO ($E(Y) = X\beta$). Assim, se for usada estimativa via MQO quando há correlação espacial nos erros, os resultados não serão viesados, mas serão não eficientes. Quando o número de observações do modelo é grande, os dois modelos, MQO e SEM, devem estimar parâmetros com valores similares.

O modelo SAC é uma combinação dos dois modelos anteriores e é usado quando os testes identificarem a presença dos dois tipos de dependência espacial. Há ainda a possibilidade de especificar dependência espacial em variáveis explicativas. Neste caso, abrem-se quatro novas possibilidades: modelo SLX, com dependência espacial apenas nas variáveis explicativas; modelo Durbin-SAR, com dependência na variável endógena e nas variáveis explicativas; modelo Durbin-SEM, com dependência nos resíduos e nas variáveis explicativas; e modelo completo (Manski), contemplando os três tipos de dependência.

Os modelos de econometria espacial (exceto SLX) não podem ser estimados por MQO por causa de conexões entre as observações introduzidas pela matriz de pesos espaciais e pelas defasagens espaciais. O operador de defasagem está correlacionado com o termo de erro, que, desta forma, deixa de ser independente. Assim, a defasagem espacial ocasiona endogeneidade dos resíduos. Por isso esses modelos em geral são estimados pelo método de máxima verossimilhança.

Neste estudo, são analisadas as pequenas usinas (menos de 10 kW de potência) cuja produção se destina ao uso residencial na própria unidade. A Tabela 1 mostra os filtros aplicados para gerar as informações usadas neste estudo, partindo de um total de 84 mil usinas de energia solar instaladas no Brasil até maio de 2019. Estas informações foram consolidadas

para as mesorregiões brasileiras, dado que para níveis geográficos inferiores (municípios ou microrregiões) haviam muitos valores zerados. A Tabela 2 mostra a definição das variáveis usadas, suas fontes e sinal esperado e a Tabela 3 mostra as estatísticas descritivas destas variáveis (em logaritmo natural).

Tabela 1: Unidades instaladas de energia solar, Brasil, 2019 (filtros aplicados para o estudo).

Estratos	Unidades instaladas
Total de usinas	84.511
Total da fonte radiação solar (A)	64.563
Apenas da classe residencial (B)	47.160
(B) e com potência menor ou igual a 10 kW (C)	43.700
(C) e geração na própria unidade de consumo (D)	38.431
(D) e quantidade de módulos menor ou igual a 12 (E)	20.833
(E) e área do arranjo menor ou igual a 1000 m ²	20.828

Fonte: Elaboração própria, a partir de informações da ANEEL.

Nota: neste estudo foi considerada a potência das 20.828 unidades instaladas (última linha), que em maio de 2019 totalizou 50.845,64 kW.

Tabela 2: Variáveis utilizadas nos modelos, fonte e sinal esperado para os coeficientes.

Sigla	Descrição	Fonte	Sinal esperado
potenpc	Potência instalada em kW/população (x100.000)	ANEEL	Var. endógena
area	Área da região em Km ²	IBGE	+
dens	População da região/Área da região	IBGE	-
pibpc	Produto Interno Bruto da região/População da região	IBGE	+
educ	Indicador de Educação (x100)	FIRJAN	+
radia	Indicador de Radiação Solar	INMET	+
txurb	População urbana/População total (x100)	IBGE	+

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3: Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas nos modelos.

Variáveis	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
lnpotenpc	0,000	2.855	2.703	5.288
lnarea	7,927	10,164	10,348	13,090
lndens	0.2922	3.6090	3.5208	7.8132
lnpibpc	8,845	9,860	9,813	11,278
lneduc	3.981	4.345	4.313	4.558
lnradia	2.708	2.833	2.875	3.045
lntxurb	3.529	4.160	4.143	4.570

Fonte: Elaboração própria.

Nota: a variável lnpotenpc refere-se a maio de 2019; as variáveis lnarea, lndens e lnradia referem-se ao ano de 2017; as variáveis lnplibpc, lneduc e lntxurb referem-se ao ano de 2016.

Para realizar a análise exploratória espacial e estimar os modelos espaciais foi necessário criar uma matriz de pesos espaciais. Vários tipos foram testados, tendo sido escolhida aquela com maior valor do I de Moran para a variável de interesse do estudo (Inpotenpc). A Tabela 4 mostra os valores das diferentes matrizes, sendo que a de dois vizinhos mais próximos (Knn=2) foi a escolhida.

Tabela 4: Valor do I de Moran para diferentes matrizes de pesos (variável Inpotnpc)

Matriz	Queen	Rook	Knn=1	Knn=2	Knn=3	Knn=4	dbw4	dbw7	dbw=10
Inpotenpc	0,775	0,775	0,760	0,790	0,760	0,754	0,744	0,637	0,607

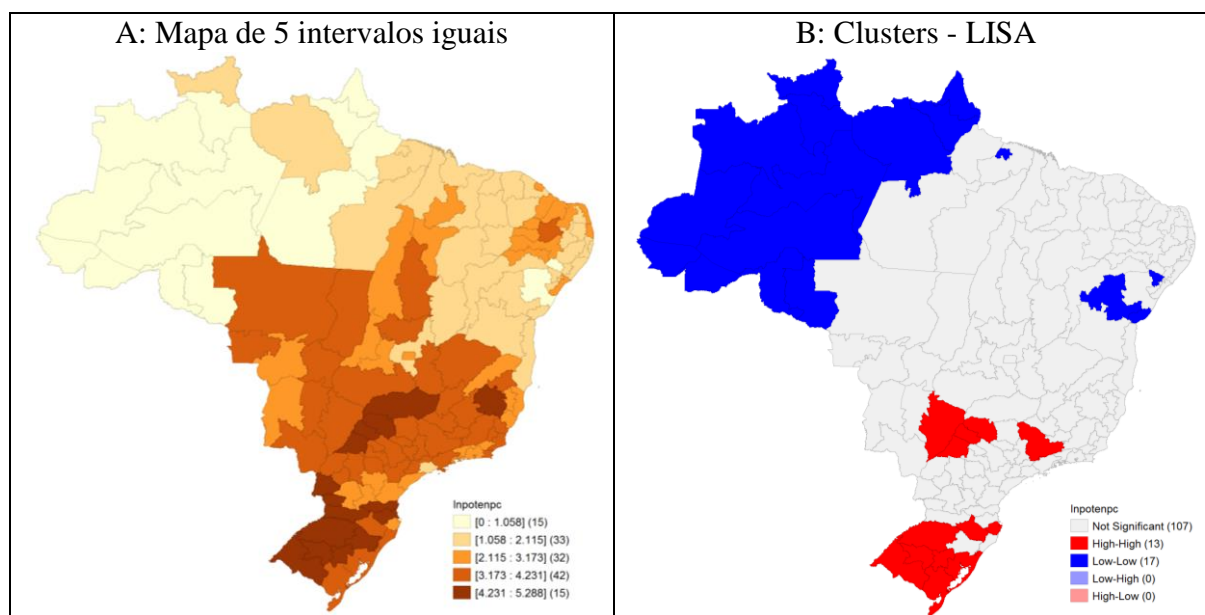
Fonte: elaboração própria.

Nota: dbw4, dbw7, dbw10 indicam matrizes de distância com limites de distância euclidiana (threshold) de 4, 7 e 10 respectivamente; em todos os casos, menos Queen e Rook, a função de distância usada é do tipo uniforme (1/d); e para identificação de clusters espaciais e estimar os modelos foi escolhida a matriz com maior I de Moran (Knn=2).

4. Análise dos resultados

A Figura 1 mostra a distribuição espacial da potência instalada (Inpotenpc) nas mesorregiões brasileiras (mapa A) e da formação de clusters espaciais (mapa B). É possível observar uma maior concentração da variável nas regiões da metade sul do Brasil. O mesmo se verifica em termos de formação de clusters (manchas vermelhas). Estes resultados vão contra o que se espera, considerando apenas a incidência de radiação solar.

Figura 1: Distribuição espacial e a formação de clusters (Inpotenpc)



Fonte: elaboração própria.

Os modelos escolhidos para analisar os determinantes do uso de energia solar nas mesorregiões brasileiras foram os modelos Mínimo Quadrados Ordinários (MQO) e o modelo autorregressivo espacial (SAR). A Tabela 5 mostra os resultados dos testes de dependência espacial que justificam esta escolha. Dado que LMerr e LMlag foram ambos significativos na versão não robusta e que apenas RLMLag foi significativo na versão robusta, é possível pelo uso deste tipo de modelo.

Tabela 5: Testes de dependência espacial (multiplicadores de Lagrange)

Multiplicadores	Parâmetro
LMerr	17,924***
LMlag	30,622***
RLMerr	0,558
RLMlag	13,255***
SARMA	31,179***

Fonte: elaboração própria.

Nota: *, **, *** denotam significância a 10%, 5% e 1%.

Os resultados das regressões para os modelos MQO e SAR estão na Tabela 6. O primeiro aspecto a ser observado é que há muita similaridade nos resultados dos dois modelos em relação às variáveis que se mostraram significativas e os sinais dos coeficientes das mesmas. No modelo SAR, no entanto, o ajuste aos dados é melhor já que o AIC é menor. O poder explicativo dos modelos é relativamente alto, com R^2 acima de 0,65. O *Jarque Bera Test* mostra que não foi rejeitada a hipótese nula de que os resíduos são normais e o *Breusch-Pagan test* mostra que não foi rejeitada a hipótese nula de que os resíduos são homocedásticos.

Analisando os resultados do modelo SAR, observa-se que há um forte efeito de transbordamento regional (*spillovers*) em instalações de micro usinas residenciais de energia solar. Este efeito é capturado pelo parâmetro (ρ). Desta forma confirma-se a principal hipótese do trabalho de que o processo de difusão deste tipo de energia, por ainda ser novidade, especialmente em relação a aspectos práticos de seu funcionamento, segue uma distribuição espacial não aleatória. Em outras palavras, as pessoas próximas de usinas já instaladas, por terem mais conhecimentos do seu funcionamento, tendem a ser mais propensas a passarem a usar este tipo de energia.

Além dos *spillovers*, os resultados mostram que a renda per capita e a educação também explicam a expansão do uso de energia solar. Os resultados para a renda eram esperados, pois o custo de instalação para gerar este tipo energia continua relativamente alto, apesar de ele ter diminuído bastante nos últimos anos. A educação em geral anda na mesma direção da renda com o acréscimo, neste caso, de que ela tende a valorizar mais a questão ambiental. Ou seja, pessoas mais educadas são relativamente mais propensas a adotarem práticas protetoras do meio-ambiente.

Os resultados para a taxa de urbanização foram na direção oposta da esperada inicialmente. Esperava-se um efeito positivo, com a justificativa de que as pessoas do meio urbano consomem e gastam relativamente mais com energia. No entanto, há pelo menos dois bons argumentos para justificar também o efeito negativo que foi encontrado. Primeiro, o fato de que nas cidades há menos casas em relação a apartamentos e, portanto, há relativamente menos pessoas com teto para a instalação de placas fotovoltaicas. Segundo, nas cidades há relativamente mais áreas sombreadas pelos prédios, diminuindo a área de incidência de radiação solar. Estes argumentos estavam guardados para a variável densidade populacional, mas esta não foi significativa.

Tabela 6: Resultados dos modelos MQO e SAR (variável endógena: lnpotenpc)

Variables	MQO	SAR
const	-22,068*** (4,462)	-13,684*** (4,029)
lnarea	-0,127 (0,100)	-0,118 (0,085)
lndens	-0,041 (0,081)	-0,039 (0,068)
lnpibpc	0,585*** (0,176)	0,405*** (0,152)
lneduc	6,324*** (0,710)	4,032*** (0,719)
lnradia	-0,837 (0,888)	-0,531 (0,759)
lntaurb	-1,056** (0,458)	-0,751* (0,389)
Rho (ρ)		0,379*** (0,067)
Akaike info criterion (AIC)	309,77	281,44
Jarque Bera Test	1,3262	0,38073
Breusch-Pagan test	2,9088	1,6887
R ²	0,682	0,665
N	137	137

Fonte: elaboração própria.

Nota: *, **, *** denotam significância a 10%, 5% e 1%; erro padrão entre parênteses; e ausência de multicolinearidade (VIF < 5).

As outras duas variáveis que não foram estatisticamente significantes, área geográfica da região e incidência de radiação solar, são fáceis de justificar. No caso da área era esperado um efeito positivo, mas para isto deveria haver um certo povoamento mínimo dos territórios. O sua não significância, pode estar associada ao fato de que nas grandes regiões há também grandes áreas vazias, com baixa ou nenhuma população. Em relação à incidência solar, pode-se justificar pela sua relação inversa com a renda per capita. As regiões com maior radiação solar são as que possuem menor renda e, como já foi dito, os custos das instalações das placas solares continuam relativamente altos.

A decomposição dos efeitos das variáveis explicativas pode ser observada na Tabela 7. Nela são apresentados três tipos de impactos das variáveis explicativas na potência instalada (lnpotenpc): o direto mostra o efeito das variáveis explicativas na potência instalada da própria mesorregião em questão; o indireto mostra o efeito das variáveis explicativas das regiões vizinhas sobre a potência instalada da mesorregião em questão; e o total é a soma dos dois efeitos. Em linhas gerais, pode-se dizer que a expansão de energia solar é em parte explicada por fatores endógenos e em parte por fatores exógenos às mesorregiões. Os efeitos endógenos ou diretos, para as três variáveis significativas do modelo SAR, representam aproximadamente dois terços do total enquanto que os efeitos exógenos ou indiretos representam em torno de um terço do total.

Tabela 7: Impactos diretos, indiretos e totais do modelo SAR (variáveis com significância estatística)

Multiplicadores	Direto	Indireto	Total
Inpibpc	0,429	0,223	0,652
Ineduc	4,268	2,225	6,494
Intxurb	-0,795	-0,414	-1,209

Fonte: elaboração própria.

5. Comentários finais

A partir de 2010, a geração e consumo de energia solar vem aumentando bastante, principalmente nos países mais desenvolvidos. Nestes países, este tipo de energia representa hoje ao redor de 2% total, com projeções de chegar a 16% em 2050. No Brasil o aumento passou a ser mais acelerado a partir de 2016. Esta expansão, no entanto, difere bastante entre países e regiões, o que se explica pela heterogeneidade de condições naturais, socioeconômicas e de configurações urbanas. No Brasil, verificou-se uma distribuição espacial desigual da potência instalada entre as mesorregiões brasileiras, com alta concentração nas regiões da metade sul do Brasil. Esta distribuição é curiosa na medida em que não segue o mesmo padrão da incidência de radiação solar.

Outro fator, de particular interesse neste estudo, é o conhecimento prático acerca do sistema de produção de energia solar (instalação, geração, uso e custos). Este é um conhecimento tácito e se difunde através da imitação, dos contatos, da interação e do compartilhamento de informações entre vizinhos (spillovers). O objetivo deste estudo foi verificar a presença deste mecanismo e de outros na expansão da capacidade instalada de geração deste tipo energia nas mesorregiões brasileiras. Foram consideradas apenas as pequenas unidades destinadas ao consumo residencial.

A principal hipótese do estudo foi confirmada, na medida em que o parâmetro estimado de dependência espacial da variável endógena foi positivo e significativo estatisticamente. Isto permite afirmar que lugares com alta carga de energia solar instalada estão cercados de lugares também com alta carga deste tipo de energia e vice-versa. Este resultado torna evidente que o conhecimento prático do funcionamento do sistema nas residências influencia a adoção do mesmo. Em outras palavras, os moradores próximos das residências que já possuem este tipo de energia, possivelmente por conhecerem melhor seus custos e benefícios, são mais propensos a também passarem a utilizá-la. Este resultado pode ser justificado pelo tema ainda ser novidade para as pessoas, associado ao fato de ser uma decisão importante em termos de custos de entrada.

Os outros fatores que explicam a expansão da energia solar são a renda per capita e a educação. Possivelmente a renda esteja associada aos custos de instalação e aos gastos domiciliares com energia e a educação com a valorização da questão da geração de energias limpas e sustentabilidade ambiental. A divergência entre incidência de radiação e uso de energia solar explica-se também pelo fator renda per capita e gastos com energia, que tendem a ser relativamente menores nas regiões da metade norte do Brasil.

Para um país com alta desigualdade e baixa renda per capita da grande maioria da população, aumentar a potência instalada de energia solar de pequeno porte visando o consumo residencial depende de dois fatores fundamentais: a redução do custo das instalações e a difusão de informações práticas dos seus custos e benefícios.

Bibliografia

- ALMEIDA, E. *Econometria Espacial Aplicada*, Campinas/SP: Alinea, 2012.
- ANSELIN, L. *Spatial econometrics: methods and models*. Dordrecht: Springer Kluwer, 1988.
- BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, pp.655–666, 2013.
- BALTA-OZKAN, N.; YILDIRIM, J.; CONNOR, P. M. Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. *Energy Economics*, 51, pp.417–429, 2015.
- BOLLINGER, B.; GILLINGHAM, K. Peer Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Panels. *Marketing Science*, 31(6), pp.900–912, 2012.
- COPIELLO, S. Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp.1064–1076, 2017.
- COPIELLO, S.; GRILLENZONI, C. Is the cold the only reason why we heat our homes? Empirical evidence from spatial series data. *Applied Energy*, 193, pp.491–506, 2017a.
- COPIELLO, S.; GRILLENZONI, C. Solar photovoltaic energy and its spatial dependence *Energy Procedia*, 141, pp. 86–90, 2017b.
- DHARSHING, S. Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany. *Energy Research & Social Science*, 23, pp.113–124, 2017.
- ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil, *Revista do BNDES* 40, 2013.
- FTHENAKIS, V. M. End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, v. 28, n. 14, p. 1051-1058, 2000.
- GRAZIANO, M.; GILLINGHAM, K. Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: The influence of neighbors and the built environment. *Journal of Economic Geography*, 15(4), pp.815–839, 2015.
- KELLER, W. Geographic localization of international technology diffusion. *American Economic Review*, 92(1), pp.120–142, 2002.
- LeSAGE, J.; PACE, R.K. *Introduction to Spatial Econometrics*. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group, 2009.
- MANSKI, C.F. Identification of Endogenous Social Effects: The Reflection Problem. *The Review of Economic Studies*, V. 60, N. 3, p. 531-542, 1993.
- MÜLLER, S.; RODE, J. The adoption of photovoltaic systems in Wiesbaden, Germany. *Economics of Innovation and New Technology*, 22(5), pp.519–535, 2013.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*, International Energy Agency 2014.

- ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*, International Energy Agency 2019.
- PALM, A. Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: A case study of five municipalities in an early market. *Energy Research and Social Science*, 14, pp.1–12, 2016.
- PALMER, J.; SORDA, G.; MADLENER, R. Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation. *Technological Forecasting and Social Change*, 99, 106–131, 2015.
- RICHTER, L.L. *Social Effects in the Diffusion of solar Photovoltaic Technology in the UK*, Cambridge Working Papers in Economics 1357, 2013.
- RODE, J.; WEBER, A. Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*, 78, pp.38–48, 2016.
- SARDIANOU, E.; GENOUDI, P. Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies? *Renewable Energy*, 57, pp.1–4, 2013.
- SCHAFFER, A. J.; BRUN, S. Beyond the sun—Socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany. *Energy Research & Social Science*, 10, pp.220–227, 2015.
- SHELLY, C. Residential solar electricity adoption: What motivates, and what matters? A case study of early adopters. *Energy Research and Social Science*, 2, pp.183–191, 2014.
- SOMMERFELD, J.; BUYS, L.; MENGERSEN, K.; VINE, D. Influence of demographic variables on uptake of domestic solar photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp.315–323, 2017.
- TIBA, C. (coord.). *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 111 p, 2000.
- TOBLER, A.W.R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, pp.234–240, 1970.
- TSOUTSOS, T.; FRANTZESKAKI, N.; GEKAS, V. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy policy*, v. 33, n.3, p. 289-296, 2005.
- VASSEUR, V.; KEMP, R. The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.483–494, 2015.
- ZHAI, P; WILLIAMS, E.D. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. *Renewable Energy*, v.41, I(C), p.350-357, 2012.
- ZHANG, Y.J. Interpreting the dynamic nexus between energy consumption and economic growth: Empirical evidence from Russia. *Energy Policy*, V.39, I(5), p. 2265-2272, 2011.
- ZHAO, T.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; LING, P.; TIAN, Y. Spatio-temporal analysis and forecasting of distributed PV systems diffusion : A case study of Shanghai using a data - driven approach. *IEEE Access*, 5, pp.5135–5148, 2017.