

Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata

Comparative study of the estimates of photovoltaic energy on three-dimensional surfaces in GIS and those reported by Sundata

DOI:10.34117/bjdv6n12-010

Recebimento dos originais:09/11/2020

Aceitação para publicação:02/12/2020

Guilherme Gandra Franco

Engenheiro Agrimensor, Mestrando em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Instituição: Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço: Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901

E-mail: guigandra@gmail.com

Rafael Lemieszek Pinheiro

Arquiteto e Urbanista, Doutorando em Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço: Rua Paraíba, 697, Belo Horizonte, MG. CEP: 30130-140

E-mail: lemieszek@gmail.com

RESUMO

A demanda da sociedade por fontes de energia limpa e de baixo custo tem impulsionado a utilização e propagação de ferramentas auxiliares no dimensionamento de sistemas elétricos. Fornecido gratuitamente pela Eletrobrás, o Sundata é uma plataforma hospedada na *web* composta por modelos climatológicos robustos, capazes de informar dados estimados de energia solar (Wh/m^2) a partir de consultas por coordenadas geográficas. O presente artigo pretende conferir o desempenho do Sundata quando comparado a modelagens de irradiação solar computadas sobre terrenos tridimensionais no software especialista de geoprocessamento ArcGIS. O principal objetivo é propor uma metodologia analítica capaz de considerar os efeitos da existência de barreiras físicas na superfície topográfica que comprometem as métricas dimensionadas na plataforma Sundata.

Palavras chave: Energia Fotovoltaica, Geoprocessamento, Modelagem tridimensional.

ABSTRACT

Society's demand for clean and low-cost energy sources has driven the spread of auxiliary tools to improve the design of electrical systems. Provided by Eletrobrás, Sundata is a free website with robust climatological models able to inform estimated solar energy data (Wh/m^2) from queries by geographic coordinates. This article intends to check the performance of Sundata when compared to solar irradiation models computed on 3D terrains in ArcGIS. The main objective is to propose an analytical

method capable of considering the effects of the existence of physical barriers on the topographic surface that compromise the metrics dimensioned on the Sundata platform.

Key Words: Photovoltaic energy, Geoprocessing, 3D modeling.

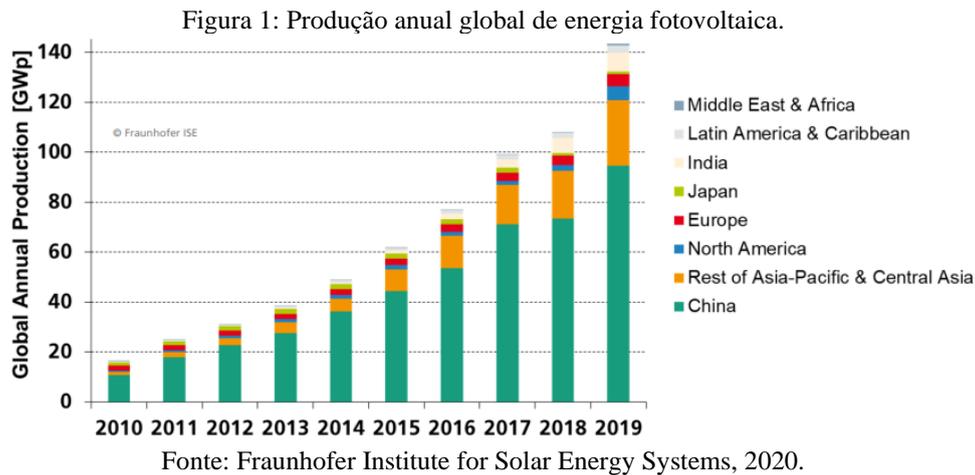
1 INTRODUÇÃO

Tratar a relação humana com a energia oriunda do sol sempre é válido, uma vez que a influência da sua irradiação incidida no planeta Terra ocasiona inúmeros eventos definidos desde a circulação das massas de ar e do ciclo hidrológico até a conversão química da fotossíntese – responsável pela presença de oxigênio e vida em sua superfície. Também é pertinente remeter a importância de sua fonte de calor às principais civilizações que se instalaram em regiões aptas para o desenvolvimento da agricultura e pecuária. No entanto, somente no século XIX que o físico francês Alexandre Edmond Becquerell pôde demonstrar o Efeito Fotoelétrico, que transcendeu estes relacionamentos até então observados. O experimento, datado de 1839, consistiu na submersão de cloreto de prata em uma solução ácida, que quando submetida à luz solar, gerava corrente. A partir deste estudo, nos anos seguintes, Willoughby Smith, William Grylls Adams e Richard Evans Day descobriram a capacidade do selênio de produzir e conduzir eletricidade, para que nos meados de 1880, Charles Fritts pudesse desenvolver e instalar em um terraço na cidade de Nova Iorque o primeiro painel de geração de energia fotovoltaica. (SZABÓ, 2017).

De acordo com Pinho e Galdino (2014), foi na década de 1950 que alguns avanços significativos foram computados, a partir da busca por soluções de telecomunicação para comunidades remotas, seguida pela corrida espacial na década de 60, quando houve necessidade de alternativas de alimentação de baixo custo e peso para os equipamentos em órbita e, por fim, na crise do petróleo na década de 70, quando grandes indústrias se voltaram para o desenvolvimento de novas tecnologias que reduzissem a dependência humana de combustíveis fósseis.

A evolução tecnológica dos materiais se tornou uma aliada no refino dos processos de geração de energia fotovoltaica, adotando o silício como principal elemento químico que compõe seus dispositivos. Presente em mais de 25% da crosta terrestre, sendo o segundo elemento mais abundante do planeta, perdendo apenas para o oxigênio, era em sua grande maioria tratado como matéria prima da indústria eletrônica nas placas semicondutoras dos seus diversos componentes, mas a partir do ano de 2010 ocorreu a consolidação da demanda da indústria fotovoltaica, que permitiu significativa redução dos custos de produção dos painéis geradores. (WOODHOUSE et al., 2020).

Em constante avanço, no decorrer da última década, estes módulos de silício Monocristalinos (Si), Policristalinos (multi-Si), dentre outras tecnologias, subsidiaram o desenvolvimento energético de diversas nações, o que possibilitou o rompimento da barreira dos 140 gW gerados nessa modalidade (figura 1). Segundo Nayak *et al.* (2019), o aumento da consciência pública acerca da necessidade de energia sustentável e limpa, bem como o incentivo governamental, também fomentaram o desenvolvimento avançado do estado da arte em que se encontra.



No Brasil, de acordo com o Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (SIGA ANNEL), no ano de 2020, o montante de energia fotovoltaica gerado foi de 16,9 milhões de kW, que corresponde a 8,08% da matriz elétrica nacional, na qual se configura em destaque a produção de 49,06% nas usinas hidroelétricas.

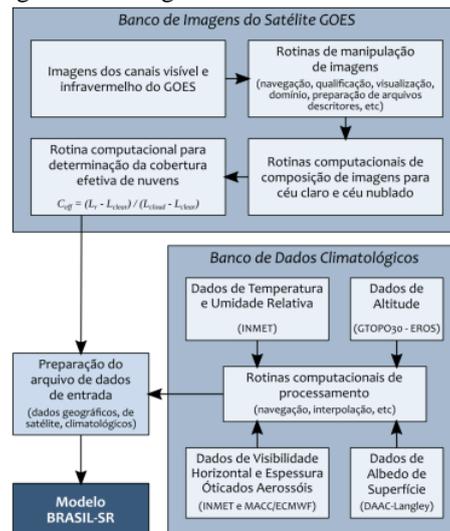
Ainda que o país possua evidência quanto à principal fonte geradora de energia ser considerada limpa no que tange a emissão de gases de efeito estufa, segundo Coelho *et al.* (2016), a energia hidroelétrica tem apresentado oscilações drásticas em função de alteração dos balanços hídricos, que não suprem a capacidade de demanda das concessionárias. Esse fato, conjugado às controversas políticas de distribuição de energia, acarreta o acréscimo de tarifas de consumo para o usuário doméstico, que poderia ser contornado a partir do uso da energia solar, em função da dimensão continental do território brasileiro e das latitudes que favorecem a incidência de luz durante todo o ano e abundante particularmente em épocas de seca.

Brose *et.al.* (2020) afirma que através da Resolução Normativa 482, de abril de 2012, foi autorizada a geração distribuída de energia fotovoltaica a partir da micro geração, ou seja, o consumidor pode produzir sua própria energia e até comercializar o excedente gerado com as concessionárias. Este marco possibilitou um célere desenvolvimento na cadeia produtiva dos módulos fotovoltaicos e na

proliferação de companhias comerciais de instalação e manutenção de sistemas individuais de geração de energia, que se viram diante da demanda de consumir dados geolocalizados de irradiação solar para dimensionamento dos sistemas a serem contratados pelos clientes. A possibilidade de transferir a energia gerada para as redes de concessionárias em momentos superavitários da instalação, e posterior consumo em momentos deficitários, passou a dispensar a necessidade de uso de baterias para armazenagem da energia e simplificou de forma considerável o uso da tecnologia pelos pequenos produtores.

Em face dessa nova necessidade do mercado surge o sistema Sundata, uma plataforma de consulta hospedada na *web*, de livre acesso, desenvolvida pelo Centro de Referência das Energias Solar e Eólica da companhia Eletrobrás. A partir da inserção pontual de latitude e longitude, o sistema apresenta dados de irradiação média diária (Wh/m^2) global horizontal dos 12 meses do ano. Estes dados são oriundos do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, desenvolvido no Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (CCST/LABREN/INPE, 2017). Para a concepção deste Atlas foram utilizadas observações de 503 estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos anos de 2005 a 2015, 17 estações da Rede SONDA (INPE) composta por coletores de dados radiométricos, um banco de imagens dos sensores orbitais *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) com bandas do espectro visível e infravermelho a partir do ano de 1999 para identificação dos parâmetros de cobertura de nuvens e albedo superficial, e por fim, o GTOPO 30 da *United States Geological Survey's Center* (USGS) para obtenção da altimetria da superfície do terreno coletados pelo radar interferométrico SRTM. A partir da compilação destes dados, surge o Brasil-SR (INPE), que segundo Pereira *et al.* (2017) é um modelo físico que contém dados de estimativas da irradiação solar global horizontal, direta normal e irradiação no plano inclinado na latitude do território nacional.

Figura 2: Fluxograma do modelo Brasil-SR.



Fonte: Pereira et.al. 2017

Ainda de acordo com os desenvolvedores do Brasil-SR, a ausência de uma rede coletora de dados mais densa, a resolução temporal das observações restritas a duas décadas e correntes mudanças climáticas observadas contribuem para limitar a simulação dos processos físicos embarcados. No entanto, Silva *et al.* (2019) avaliam como satisfatórios os valores testados a partir de modelos matemáticos, como o Erro Médio Quadrático (RMSE) máximo de 14% nos testes realizados em diferentes regiões do território nacional.

O Brasil-SR é distribuído de forma gratuita nos formatos tabular (CSV) ou vetorial (*shapefile*), topologicamente configurado como polígono regular com mais de 72 mil feições, cada uma dimensionada em $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, projetadas no Datum SIRGAS 2000. Quando hospedado na plataforma Sundata, o modelo é apresentado através de interface visual composta por gráficos e tabelas, contendo as médias mensais e anuais do ponto consultado.

Como forma alternativa no dimensionamento da produção de energia fotovoltaica local, os sistemas de informações geográficas (SIG), que já ocupam um papel de destaque nas últimas décadas, embarcados por algoritmos que também consolidam rigorosas análises de irradiação, associados a modelos tridimensionais mais robustos e detalhados, promovem avançadas consultas que permitem a individualização de alvos e sua interação com a energia incidida (REGINATO & JULIÃO, 2019) e (TARANTINO *et al.*, 2019). O algoritmo *Hemispherical Viewshed* contido no ArcGIS PRO é um exemplo dessa aplicação. A partir da soma da irradiação direta, que consiste no somatório da constante do fluxo solar da atmosfera 1.367 W/m^2 , interagido com as médias dos comprimentos de ondas, tempo, azimute e ângulo de uma determinada superfície, com a irradiação difusa, que é obtida através da

irradiação normal, interagida com os fluxos atmosféricos de difusão da irradiação, duração, proporção do céu visível no setor avaliado e ângulo de incidência, obtém-se o cálculo da irradiação global. (ArcGIS Pro Tool Reference, ESRI, 2020)

Observa-se que os dados de redes de monitoramento meteorológicos contidos no Brasil-SR não fazem parte dos algoritmos. No entanto, o SIG permite ajustes para calibração dos dados conforme modelos solares externos. Ressalta-se também que a componente posição geométrica se faz presente em forma de variável nas duas equações, o que evidencia uma configuração salutar para estudos que compreendem cálculos sobre superfícies irregulares. Ao avaliar estes estudos sobre modelos digitais detalhados por nuvem de pontos oriundas de levantamentos a laser *Light Detection and Ranging (LIDAR)* ou por drones *Structure From Motion (SFM)*, pode-se presumir que em um pequeno espaço poderão ocorrer variações significativas de incidência solar devido à existência de obstáculos físicos que não são representados em níveis de escala menos detalhados, tal como os utilizados na plataforma Sundata.

2 OBJETIVOS

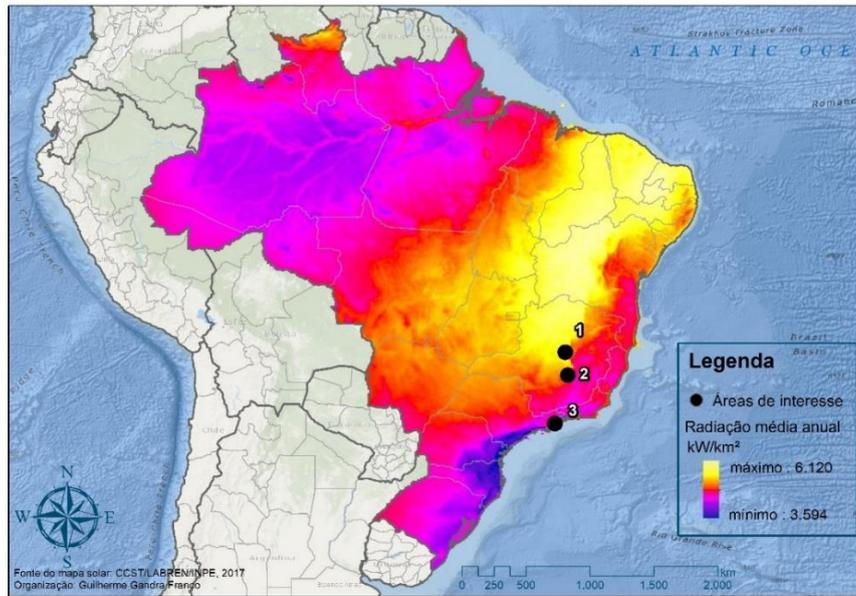
Comparar os resultados de kWh/m² obtidos em consultas pontuais do modelo Sundata e do *Hemispherical Viewshed*, do ArcGIS PRO, projetado sobre Modelos Digitais de Superfície de três áreas distintas nos estados de São Paulo e Minas Gerais e propor uma metodologia de consulta complementar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do estudo, foram selecionados três recortes espaciais com diferentes médias anuais de irradiação solar global horizontal (Figura 3) e diferentes morfologias naturais e construídas:

- 1 Área urbanizada no município de Monjolos, região Norte do estado de Minas Gerais;
- 2 Área urbanizada com elevada densidade de edifícios – Região Centro Sul de Belo Horizonte, Minas Gerais;
- 3 Área urbanizada litorânea inserida numa floresta tropical – Picinguaba, Ubatuba, São Paulo.

Figura 3: Localização das áreas mapeadas sobre o modelo de irradiação Brasil-SR INPE.



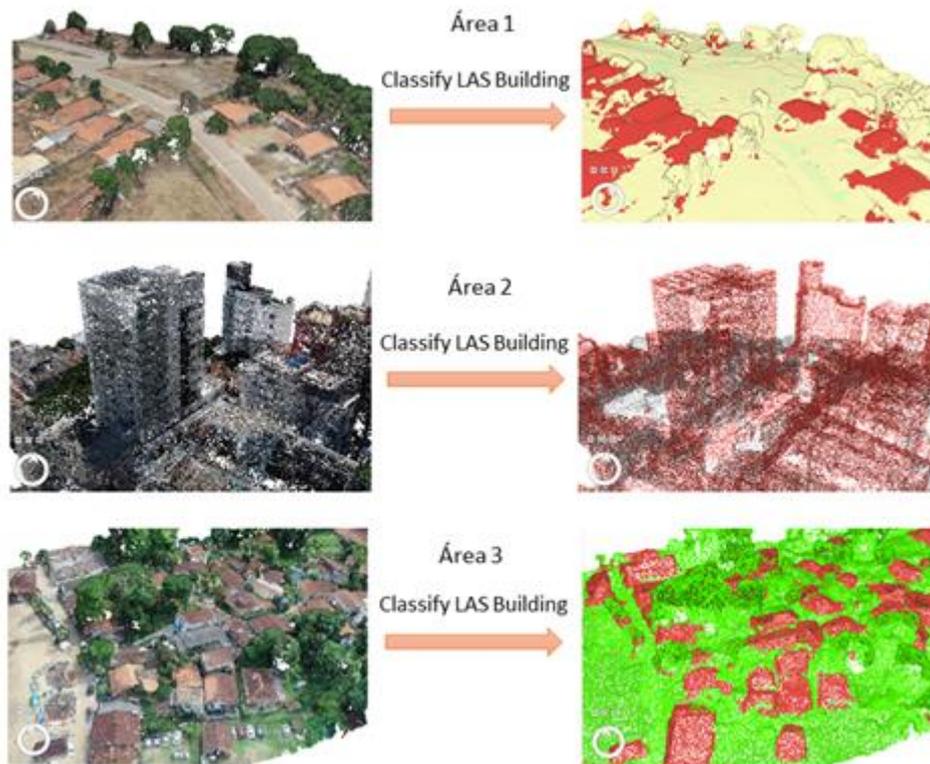
Fonte: Autores, 2020.

Para todas as áreas, foram executados voos com o drone Phantom 4 Pro, do fabricante DJI, com câmera de 20 megapixels e altitude de voo de até 100 metros em relação ao solo, o que possibilitou a criação de Modelos Digitais de Superfície com resolução espacial máxima de 13 centímetros por pixel e ortofotos com resolução espacial máxima de 4 centímetros por pixel. Os voos foram realizados entre os períodos de agosto e outubro de 2020 e processados no software Agisoft Metashape Professional, versão 1.6, onde se obteve a nuvem de pontos densa das áreas através de estereoscopia digital (SFM).

Os dados coletados foram ajustados por pontos de controle georreferenciados por Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS), modelo Topcon Hiper SR de dupla frequência (L1 L2), pós processados no datum Sirgas 2000 e a altitude ortométrica foi corrigida conforme o modelo de ondulação geoidal oficial brasileiro, o MAPGEO 2015 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Para cada área, foi gerado um arquivo de nuvem de pontos 3D com extensão .LAS e realizado tratamento no software ArcGIS PRO 2.6. Neste ambiente, foram aplicados os algoritmos proprietários (*Classify LAS Building*) de detecção e classificação de edificação para delineamento dos telhados.

Figura 4: Classificação automática da nuvem de pontos para identificação dos telhados.



Fonte: Autores, 2020.

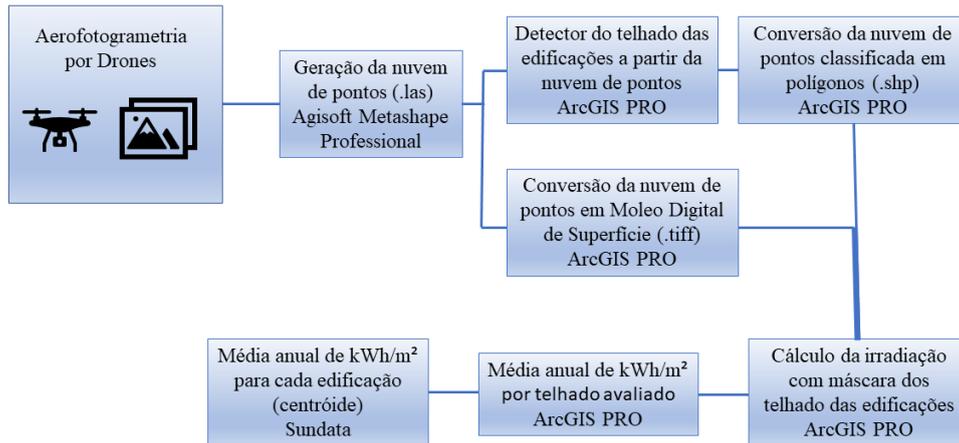
Após o *Classify LAS Building* detectar a morfologia das edificações na nuvem de pontos, esta classe foi separada para a aplicação da conversão de LAS para *feature*, topologicamente configurada em forma de polígono (shp). Foram identificados 101 polígonos de edificações. Já as nuvens densas, que contêm a informações das superfícies completas das áreas mapeadas, foram convertidas para arquivos matriciais (tiff) denominados Modelo Digital de Superfície. Este processo foi realizado para que a função de cálculo de irradiação ocorra somente na área edificada, mas que ainda assim passe a admitir os obstáculos físicos encontrados na superfície total dos MDS até chegar nos alvos selecionados.

Também no ArcGIS Pro 2.6 foi executado o algoritmo *Area Solar Radiation*, que calcula o total de irradiação global sobre uma superfície topográfica, com resultados obtidos em kWh/m² anual total.

Após a obtenção dos valores médios anuais em kWh/m² de cada edificação identificada, foi gerada uma planilha contendo a latitude e a longitude do centróide de cada uma das feições e suas métricas avaliadas nos algoritmos solares.

Estas coordenadas dos centróides de cada edificação também foram lançadas na plataforma de consulta Sundata, e o resultado ali obtido, relativo à média anual de Wh/m², transferido para uma planilha para equalização das unidades de medida (Wh para kWh) e para que os dados pudessem ser confrontados com os obtidos no ArcGIS PRO.

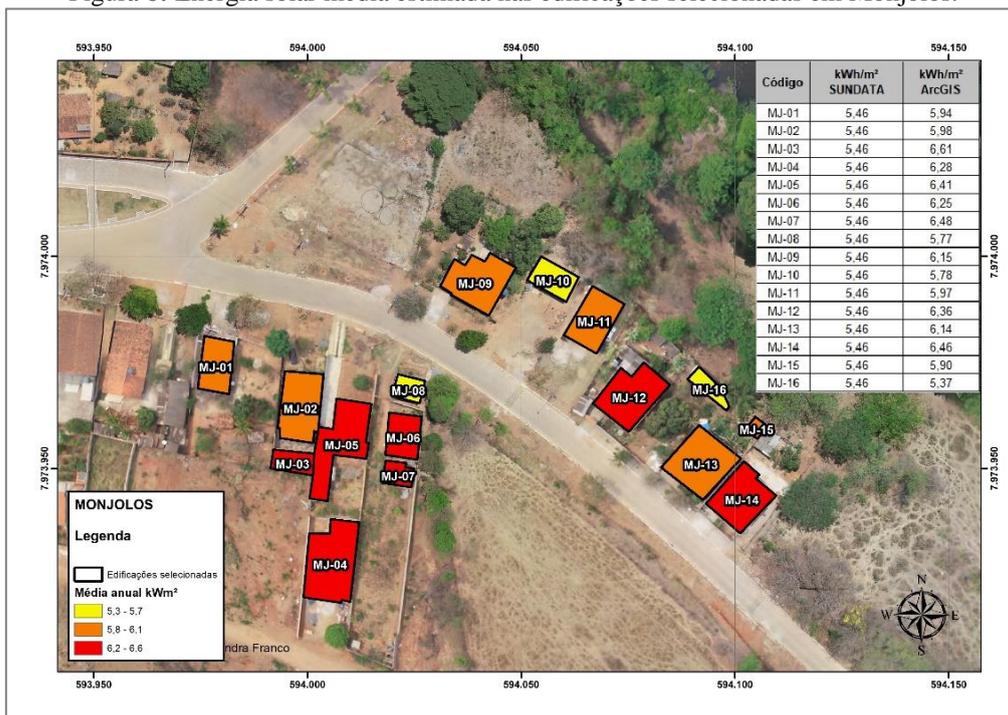
Figura 5: Fluxograma da coleta e modelagem dos dados.



Fonte: Autores, 2020.

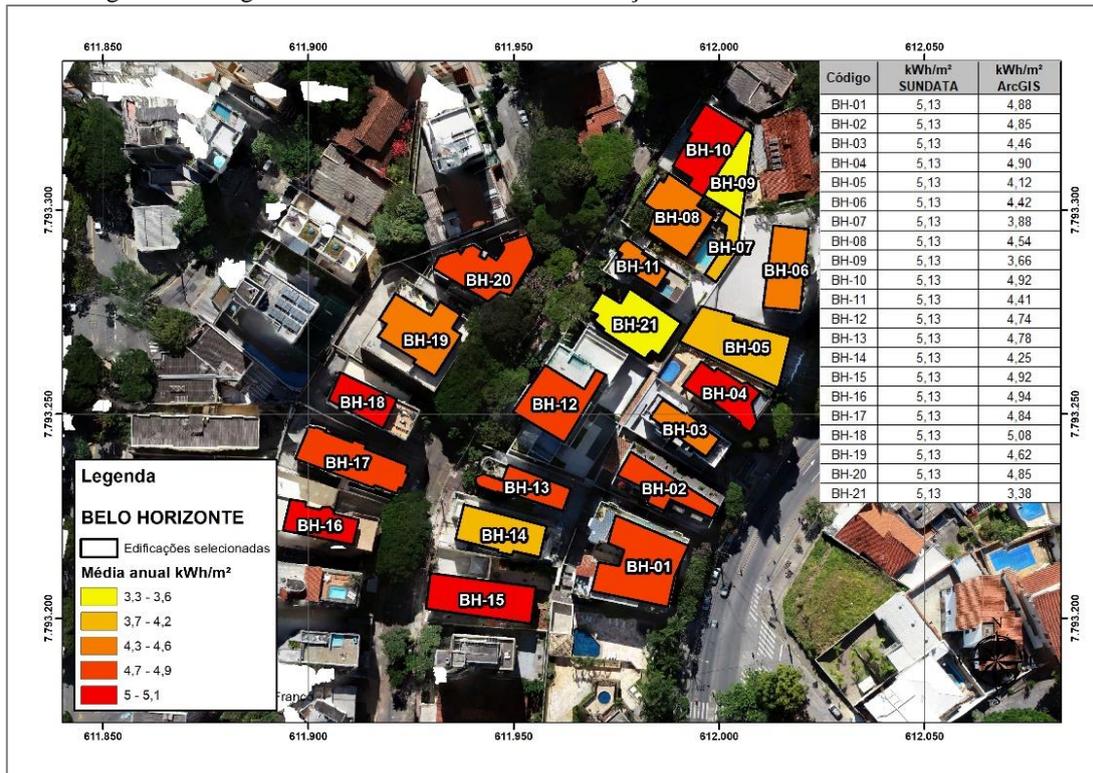
As figuras a seguir apresentam os resultados médios anuais (kWh/m²) da irradiação global individualizada das 101 edificações identificadas.

Figura 6: Energia solar média estimada nas edificações selecionadas em Monjolos.



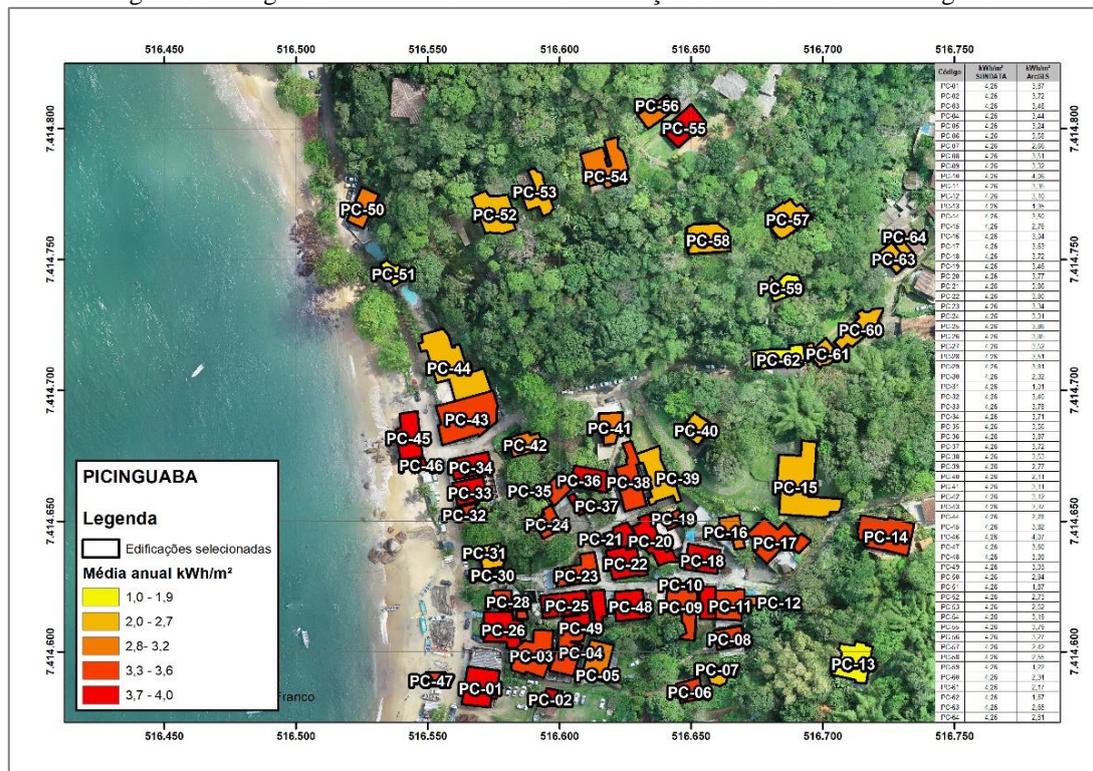
Fonte: Autores, 2020.

Figura 7: Energia solar média estimada nas edificações selecionadas em Belo Horizonte



Fonte: Autores, 2020.

Figura 8: Energia solar média estimada nas edificações selecionadas em Picinguaba

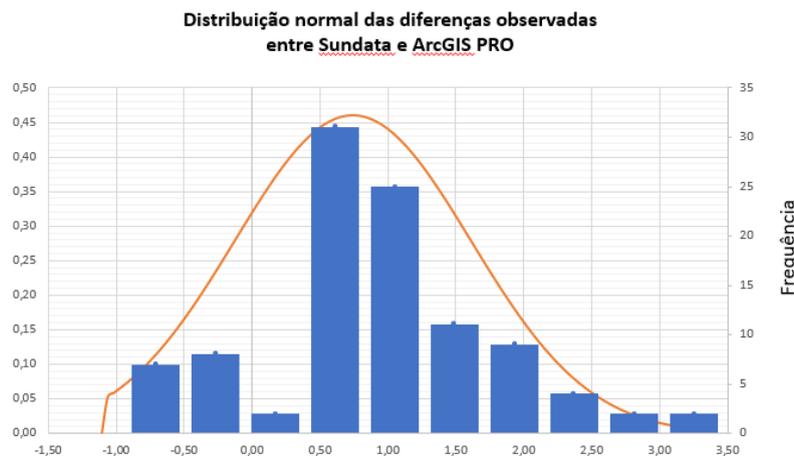


Fonte: Autores, 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo presumido na narrativa do *Hemispherical Viewshed*, do ArcGIS, a componente morfologia geométrica do modelo de superfície contida no algoritmo executado pelo SIG confirmou significativa interferência nos cálculos de incidência de irradiação individual das 101 edificações detectadas nos recortes espaciais mapeados. O histograma (figura 6) demonstra que somente 40% das observações obtiveram variação inferior a $\pm 0,5$ kWh/m² do Sundata pelo ArcGIS, de forma que a maioria das observações resulta em diferença significativa entre um modelo e outro.

Figura 9: Histograma da distribuição normal Sundata e ArcGIS



Fonte: Autores, 2020.

Isso se deve ao fato dos obstáculos físicos contidos no ambiente – que também são importantes variáveis capazes de interferir na irradiação direta e difusa – prejudicariam os módulos fotovoltaicos a captarem energia solar. Tais obstáculos podem ser barreiras antrópicas, como edifícios vizinhos, caixas d'água, muros e posição cardeal das faces do telhado, mas também podem ser apresentados como a vegetação natural, geomorfologia do terreno e variação de altitude do relevo. A edificação nomeada PC-13, em Picinguaba, ilustra bem o exemplo de como as copas das árvores influenciam no cálculo de incidência da irradiação solar. A partir do modelo tridimensional, foi possível verificar que o imóvel está cercado por vegetação de grande porte, o que permitiu uma geração de média anual de 1,95 kWh/m², frente aos 4,26 kWh/m² informados pelo Sundata, que desconsidera a existência destes elementos. Ressalta-se que a área urbanizada está inserida dentro de uma Unidade de Conservação do bioma Mata Atlântica, o Parque Estadual Serra do Mar, onde é restrita a supressão de mata nativa. Com isso, a habitação encontra-se em limitação de obtenção de melhores resultados na absorção da energia solar.

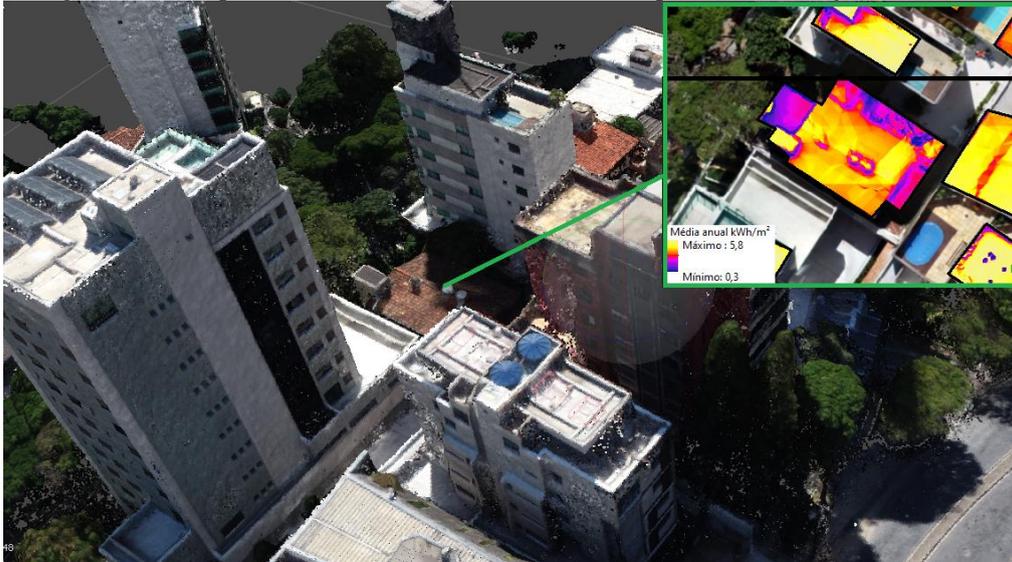
Figura 10: Exemplo de barreira natural que ocasiona baixo desempenho na absorção de irradiação.



Fonte: Autores, 2020.

Destaca-se também a edificação BH-21, imóvel com dois pavimentos, localizado na região Centro Sul de Belo Horizonte, nitidamente afetado pela projeção das sombras dos edifícios vizinhos, que alteram a capacidade de geração de energia nos telhados: 3,38 kWh/m², frente aos 5,13 kWh/m² informados pelo Sundata. No caso avaliado, as condições de melhorias no desempenho hipotético de micro usina geradora também resulta inviável, uma vez que seria necessário eliminar as barreiras que projetam sombras sobre a área de interesse. Tal situação poderá ser ainda mais afetada, se um novo edifício fosse construído na porção noroeste do BH-21, o que poderia bloquear a irradiação do período vespertino, oriunda da direção oeste.

Figura 11: Exemplo de barreira antrópica no baixo desempenho de irradiação absorvida.



Fonte: Autores, 2020.

A região de Monjolos foi a única em que a totalidade da irradiação estimada no Sundata foi inferior à calculada no ArcGIS, com média da diferença de $-0,64 \text{ kWh/m}^2$. Isso se deve pela ausência de obstáculos físicos, uma vez que a morfologia da área – planície de rio – com pouca densidade de vegetação e edificações baixas, projetam um cenário favorável para a captura de irradiação oriunda do sol, o que torna a ferramenta Sundata apta para fornecer valores de dimensionamento neste local. Notou-se também que o tamanho da célula do Sundata de $0,1^\circ$ por $0,1^\circ$ – aproximadamente 10 km^2 – é incompatível com análises em escalas mais detalhadas, uma vez que todas as recortes avaliados estavam envolvidas em um único valor de irradiação, o que torna a aplicação adequada para análises macro regionais mas insuficiente para análises locais.

5 CONCLUSÕES

O estudo apresentou uma metodologia de dimensionamento de irradiação solar sobre diferentes recortes espaciais observados no Brasil, ideal para aplicações de usinas micro geradoras de energia fotovoltaica individual em todo território nacional, e trouxe um alerta para a necessidade de tratamento da informação em softwares especialistas na obtenção de dados mais precisos, principalmente os topográficos. Contar com uma ferramenta intuitiva e gratuita como o Sundata é de extrema valia para a sociedade. Entretanto, é importante salientar que, apesar da robustez do modelo climatológico Brasil-SR que opera dentro da plataforma, os cálculos ali apresentados, se utilizados tal como estão, podem ocasionar graves falhas de estimativas de material necessário e de potencial de geração de energia para

a concepção das usinas fotovoltaicas em áreas urbanas, com relevante ocupação vegetal, topografia acidentada ou qualquer outro obstáculo.

Nas áreas densamente urbanizadas, o estudo pode balizar a elaboração de políticas públicas acerca da interferência das sombras das edificações sobre as demais residências, em vista das demandas da sociedade por cidades mais verdes, que estimulam a produção de energia limpa. Neste cenário, é factível a existência de futuras discussões sobre as prováveis perdas de um sistema já implantado quando ocorre a construção de uma nova edificação vizinha capaz de interferir com sua sombra na micro usina instalada, principalmente devido ao fato destas estruturas possuírem um alto valor de investimento, que muitas vezes são calculados para serem amortizados durante um longo período de tempo – *payback*

Este estudo é particularmente importante para balizar políticas públicas de estímulo à instalação de módulos fotovoltaicos. Uma vez que as cidades começam a oferecer estímulos para o uso de energia solar, a falta de uma interface que utilize dados morfológicos detalhados tais como os apresentados aqui pode resultar em políticas públicas ineficazes e deficitárias se, por exemplo, subsídios públicos forem direcionados à instalação de painéis ineficientes.

Por fim, modelar cenários é de suma importância para verificar a real aptidão de determinados eventos que fomentam decisões que podem acarretar a melhoria da qualidade de vida da sociedade e a economia de recursos financeiros. Este trabalho demonstrou que a metodologia proposta possui uma elevada aderência às cidades inteligentes, que podem ser capazes de empregar simulações de irradiação de energia solar em diversos níveis de escala, baseadas em modelagens oriundas de *Lidar ou Structure From Motion*. O estudo também comprovou que a análise espacial deve ser executada de maneira sistêmica, de modo que integre elementos da superfície para melhores resultados.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações de Geração da ANEEL
Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>

BROSE, M. E. et al. Inovação Social da Geração Distribuída de Energia.: O Caso de Santa Cruz do Sul, RS. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental v. 9, n. 3, 2020. Disponível em:
<http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8344>

Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Sundata. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. 2020. Disponível em:
<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>

COLEHO C. A. S; CARDOSO D. H. F.; FIRPO M. A. F. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. Boletim Climanálise, INPE. São José dos Campos, 2015. Disponível em:
<<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Coelhoetal.pdf>>

ESRI. ArcGIS Pro Tool Reference, 2020. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>>

NAYAK, P. et al. Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. Nature Reviews Materials. Springer Science and Business Media, Vol. 4, 2019. Disponível em:
<<https://www.nature.com/articles/s41578-019-0097-0>>

PEREIRA, E. B. et. al. Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) / Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST), INPE. São José dos Campos, 2017. Disponível em:
<http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>

PINHO, J. T. & GALDINO. M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaics Report. 2020. Disponível em:
<<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>

REGINATO, V. S.; JULIÃO, R. P. Geographic Modelling of Wind and Solar Energy Potential. Bulletin of Geodetic Sciences, 25(3): e2019019, 2019. Disponível em:
<<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/71712/40355>>

SHEILA, A. B. et al. Validação do modelo de transferência radiativa Brasil-SR para as estimativas da radiação fotossinteticamente ativa. INPE, São José dos Campos, 2019. Disponível em:
<<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm15@80/2006/11.17.17.32/doc/Silva.Valida%e7%e3o.pdf>>

SZABÓ, L. The History of Using Solar Energy. International Conference on Modern Power Systems (MPS). IEEE, Romania, 2017. Disponível em:

<<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7974451>>

TARANTINO, R. A. et al. Proposta de mapeamento do potencial de radiação solar em edificações com o uso de drone. Brazilian Journal of Development. Vol 5, No 11, 2019. Disponível em:
<<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/4529/4780>>

WOODHOUSE, M. et al. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. National Renewable Energy Laboratory. United States, 2020. Disponível em:
<<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72134.pdf>>