

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO ESTADO DE MATO GROSSO

Ana Cristina Kubo Almada¹
Jonathan Willian Zangeski Novais¹
Amanda Alves Rocha¹
Naara Soares dos Santos Brito¹
Dahiane dos Santos Oliveira Zangeski¹
Izaura de Oliveira Roberto¹

¹Universidade de Cuiabá

DOI: 10.47168/rbe.v28i1.611

RESUMO

Com o intuito de analisar o potencial de geração de energia elétrica fotovoltaica no estado de Mato Grosso, foram analisados os dados de radiação solar de 20 cidades no período de 2012 a 2014, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Com esses resultados foi possível calcular a geração de energia fotovoltaica por uma placa fictícia de 1m² e 15% de eficiência. De forma a se fazer uma análise espacial, utilizou-se da geoestatística para se fazer um semivariograma e um mapa de krigagem. A média do potencial geração de energia fotovoltaica do estado é aproximadamente 0,73 kWh por dia para cada m². O maior potencial de geração de energia ocorre no nordeste do estado, na cidade de Carlinda, com aproximadamente 0,815 kWh por dia para cada m², e em Cuiabá é verificado o menor potencial de geração, 0,46 kWh por dia para cada m², 37% menor que a média do estado. Fatores como poluição, queimadas e relevo podem diminuir o potencial de geração de energia fotovoltaica da capital de Mato Grosso.

Palavras-chave: Placa solar; Energia elétrica; Radiação solar; Eficiência energética.

ABSTRACT

In order to analyze the potential for photovoltaic electricity generation in Mato Grosso state, the solar radiation data of 20 cities from 2012 to 2014, provided by the National Meteorological Institute (INMET), were analyzed. It was possible to calculate the generation of photovoltaic energy by a fictitious solar plate of 1m² and 15% efficiency. In order to make a spatial analysis, geostatistics was used to make a semivariogram

and a kriging map. The potential state's average photovoltaic energy generation is approximately 0.73 kWh per day for each m². The greatest potential for power generation occurs in the northeast of the state, in the city of Carlinda, with approximately 0.815 kWh per day for each m², and in Cuiabá it is estimated the lowest potential generation, 0.46 kWh per day for each m², 37% lower than the state average. Factors such as pollution, burning and topography may reduce the potential for photovoltaic energy generation in the capital of Mato Grosso.

Keywords: Solar plate; Electricity; Solar radiation; Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de fontes renováveis para a geração de energia elétrica vem se apresentando como uma alternativa concreta ao uso dos combustíveis fósseis. A necessidade de diversificar a forma como a eletricidade é gerada, distribuída e utilizada é essencial para um processo de descarbonização da economia (DA CUNHA et al., 2018).

O uso da energia solar conectada à rede elétrica pública está crescendo no mundo todo, de forma distribuída e próxima aos pontos de consumo (TIEPOLO, 2015). Com a geração distribuída há atendimento da demanda própria ou injeção do excedente na rede pública (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Políticas públicas de incentivo e a regulação da inserção de fontes alternativas de energia nas redes do sistema interligado (SI) foram propostas e implementadas (BASTOS, 2016; SILVA 2019; CARMO 2019; PAIVA et al., 2020). Também há esforços para disseminar a geração solar em regiões remotas e para o mapeamento do potencial energético solar.

Nesse contexto, e com a elevada procura pela geração fotovoltaica, e também em função das características do estado, como clima, vegetação, relevo e posição geográfica, propõe-se um estudo utilizando dados de radiação solar de vários municípios do estado de Mato Grosso com o intuito de analisar o potencial de geração elétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados de radiação solar, cálculo de geração de energia e período de análise

Os dados de radiação global são aqueles coletados pelas estações do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A estação é composta por uma unidade de memória central (datalogger), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, di-

reção e velocidade do vento, velocidade de rajada de vento). Os dados são coletados de minuto a minuto e disponibilizados automaticamente a cada hora, estando disponíveis no site www.inmet.gov.br (INMET, 2019).

O período escolhido para a análise foi dos anos de 2012 a 2014, totalizando três anos. Este período foi selecionado devido a ser o com menos falhas nos dados.

Para a avaliação do maior potencial de geração no estado de Mato Grosso, além da escolha por período com menos falhas em dados, foram selecionadas 20 cidades, o que corresponde a 14,89% dos municípios mato-grossenses, abrangendo as cinco grandes áreas do estado (Mesorregião Norte, Nordeste, Sudoeste, Centro sul e Sudeste).

Foi feito o somatório da radiação solar horária para avaliar a disponibilidade total de radiação para cada localidade no período de um dia. Também foi feito um novo somatório para avaliar a radiação solar total anual.

Foi utilizado o método de preenchimento da média móvel para eliminar falhas de até uma semana, conforme proposto por Gençay (1996) e Ventura et al. (2016).

Para o cálculo da geração de energia elétrica, considerando uma eficiência média de placa de 15%, para 1 m² de placa solar, foram transformados os dados de J/ano/m² para kWh/dia/m², conforme as equações 1 e 2, abaixo:

$$Energia \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia.m}^2} \right) = \frac{\left(Radiação \left(\frac{\text{J}}{\text{ano.m}^2} \right) \right) * (15\%)}{(365 \text{ dias}) * 1000 * 60 \text{ min} * 60 \text{ s}} \quad (1)$$

$$Energia \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia.m}^2} \right) = Radiação * 1,1416 * 10^{-10} \quad (2)$$

2.2 Cidades selecionadas

Foram escolhidas 20 cidades do estado de Mato Grosso, de acordo com a disponibilidade de dados para o período analisado (2012 a 2014). Informações são apresentadas na Tabela 1 e as localizações são apresentadas na Figura 1.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das cidades de Mato Grosso selecionadas para a pesquisa

Nº	Cidades	Latitude	Longitude				
1	Alta Floresta	09°50'S	56°06'W				
2	Alto Araguaia	17°33'S	53°22'W				
3	Alto Taquari	17°48'S	53°17'W				
4	Apiacás	09°33'S	57°23'W				
5	Campo Verde	15°31'S	55°08'W				
6	Carlinda	10°00'S	55°47'W				
7	Comodoro	13°42'S	59°45'W				
8	Confresa	10°39'S	51°34'W				
9	Cotriguaçu	09°54'S	58°34'W				
10	Cuiabá	15°37'S	56°06'W				
11	Gaúcha do Norte	13°11'S	53°15'W				
12	Juína	11°22'S	58°43'W				
13	Nova Maringá	13°02'S	57°05'W				
14	Pontes e Lacerda	15°15'S	59°20'W				
15	Porto Estrela	15°21'S	57°13'W				
16	Rondonópolis	16°27'S	54°34'W				
17	Salto do Céu	15°08'S	58°06'W				
18	Santo Antônio do Leste	14°55'S	53°53'W				
19	Sorriso	12°33'S	55°43'W	20	Tangará da Serra	14°39'S	57°25'W
20	Tangará da Serra	14°39'S	57°25'W				

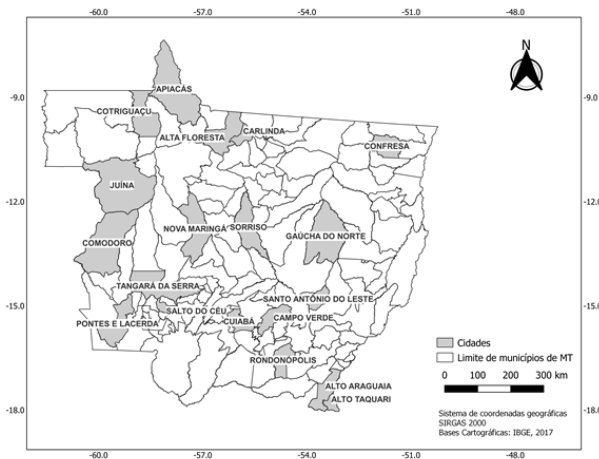


Figura 1 - Cidades de Mato Grosso selecionadas para a pesquisa

2.3 Geoestatística

Para as estimativas das semivariâncias, para quaisquer distâncias entre as amostras, foram ajustados os modelos de semivariogramas teóricos: esférico, exponencial e gaussiano, descritos por An-driotti (2003) e Yamamoto e Landim (2013). Isso foi feito com o auxílio do programa computacional GS+, desenvolvido por *Gamma Design Software*®, e de planilhas eletrônicas.

A avaliação e a seleção dos melhores ajustes dos semivariogramas experimentais foram baseadas na menor soma de quadrados dos desvios ponderados (SQDP), e no maior coeficiente de determinação (R^2) (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; PELISSARI, 2014).

Posteriormente, foi realizada a interpolação e espacialização das variáveis, por meio da krigagem ordinária pontual e, então, foi analisada a distribuição espacial utilizando o *software Golden Surfer*®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise da radiação solar do estado de Mato Grosso

Na Figura 2 é apresentada a média de radiação solar por metro quadrado dos três anos analisados (de 2012 a 2014), para as 20 cidades em estudo.

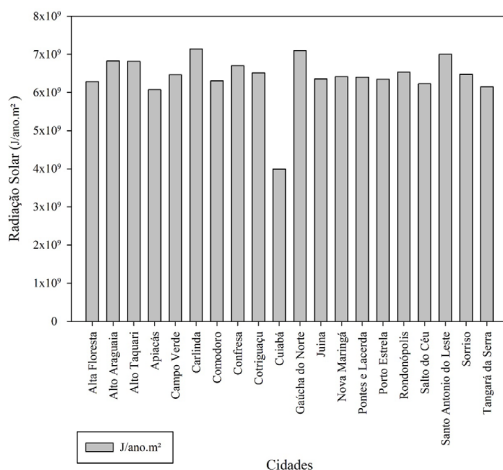


Figura 2 – Média da radiação solar (J/ano/m²) para os anos de 2012 a 2014, para 20 cidades de Mato Grosso

A média de radiação solar no estado de Mato Grosso foi estimada em $6,4 \text{ GJ/m}^2/\text{ano}$, como maior radiação nas cidades de Carlinda e Gaúcha do Norte, com $7,14 \text{ GJ/m}^2/\text{ano}$ e $7,1 \text{ GJ/m}^2/\text{ano}$, respectivamente. Ao analisar as posições geográficas, ambas as cidades estão na região nordeste de Mato Grosso.

A cidade com a menor média de radiação solar é Cuiabá, com aproximadamente $4 \text{ GJ/m}^2/\text{ano}$, representando apenas 62% da média do estado. Fatores como topografia e nebulosidade, principalmente devido à poluição e queimadas, podem estar dificultando a incidência de radiação solar na capital de Mato Grosso. O uso de queimadas como um recurso agropecuário é observado na Amazônia e no Centro-Oeste (FEARNSIDE, 2005), mas a prática tem sido levada do campo para a cidade com o intuito de eliminar lixo e/ou biomassa vegetal. Machado et al. (2014) afirmam que a velocidade dos ventos apresenta valores baixos, impedindo o transporte e a diluição dos poluentes, resultando maior concentração dos poluentes na atmosfera.

Observam-se na Figura 3 os resultados da estimativa de geração de energia elétrica, em $\text{kWh}/\text{dia}/\text{m}^2$, para 1 m^2 de placa solar com eficiência média de 15%, para os anos de 2012 a 2014, para cidades do Mato Grosso

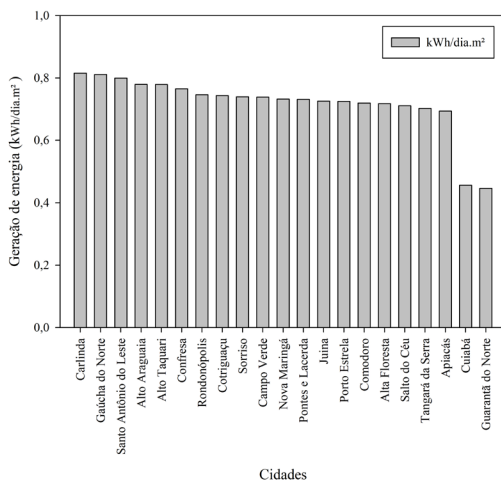


Figura 3 - Média da geração de energia elétrica ($\text{kWh}/\text{dia}/\text{m}^2$)

Na Figura 2 são apresentados resultados da estimativa, do maior potencial de geração de energia elétrica para o menor. Carlinda e Gaúcha do Norte são as cidades com maior potencial de geração, com

0,815 e 0,810 kWh por dia para cada m², respectivamente. Em Carlin-da a geração média seria 5,67 kWh por dia por m², abaixo do potencial máximo estimado por Pereira et al. (2006), que identificou 6,5 kWh/m²/dia no norte da Bahia.

Tem-se em Cuiabá o pior potencial de geração de energia elétrica entre as cidades analisadas, 0,46 kWh por dia para cada m², sendo 37% menor do que a média do estado, que é aproximadamente 0,73 kWh por dia para cada m². Em Cuiabá a média para o período seria 3,07 kWh/m²/dia, abaixo do valor mínimo encontrado por Pereira et al. (2006) para o litoral de Santa Catarina, que foi 4,25 kWh/m²/dia.

Atribui-se os menores valores à poluição atmosférica, principalmente por causa das queimadas, problema que se agrava quando chega o inverno na região, pois a umidade do ar cai a níveis preocupantes e diminuem as chuvas (DE MOURA et al. 2012). Boletins emitidos pela SEMA – MT classificam a qualidade do ar para o período como inadequada, uma vez que os valores da concentração de material particulado extrapolam em muito a concentração de 25ppm, limite tolerável estabelecido pela Organização Mundial de Saúde para que a poluição atmosférica não prejudique a saúde da população (ANDRADE et al. 2020). Valores acima deste limite podem afetar a saúde da população, causando doenças respiratórias e cardiovasculares (DANNI-OLIVEIRA, 2000).

3.2 Análise geoestatística da radiação solar

Na Figura 4 é representado o semivariograma gerado para determinar a geração de energia em kWh/dia/m² para 1 m² de placa solar, com eficiência média de 15%, para os anos de 2012 a 2014, para as 20 cidades analisadas.

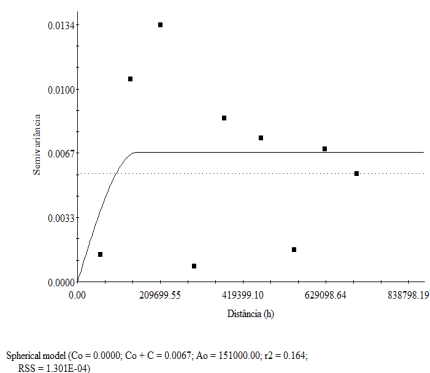


Figura 4 – Semivariograma da geração de energia elétrica (kWh/dia/m²)

De acordo com a Figura 4, o melhor modelo encontrado foi o modelo esférico, com efeito pepita igual (C_0) a 0,000 e contribuição (C) 0,0067. Pequenos valores de efeito pepita indicam pequenos erros nas medidas (DAFONTE et al., 2010). O efeito pepita é menos de 1% do patamar e, conforme classificação de Cambardella et al. (1994), só existe dependência espacial forte quando se verifica no semivariograma efeito pepita de até 25% do patamar.

O alcance estimado é de 151000 m de latitude e longitude. O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas, indicando a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (CARVALHO et al., 2002).

O coeficiente de determinação (R^2) foi 0,164 e a soma do quadrado dos resíduos (RSS) foi $1,301 \cdot 10^{-4}$. Devido a RSS ser uma medida de discrepância entre os dados reais e os modelados, um pequeno valor indica um ajuste apertado do modelo aos dados (DRAPER; SMITH, 1998), sugerindo que apesar de um R^2 não tão alto o modelo é satisfatório para o que foi proposto.

Apresenta-se na Figura 5 o mapa de krigagem para a geração de energia elétrica ($\text{kWh}/\text{dia}/\text{m}^2$), para 1 m^2 de placa solar, com eficiência média de 15%, para os anos de 2012 a 2014, a partir de registros de 20 cidades de Mato Grosso.

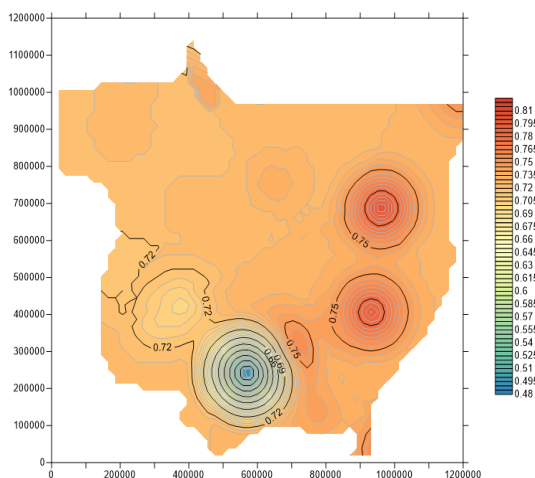


Figura 5 – Mapa de krigagem para a geração de energia elétrica ($\text{kWh}/\text{dia}/\text{m}^2$)

Observa-se especialmente o potencial estimado de geração solar fotovoltaica em Mato Grosso, destacando-se a região nordeste na Figura 5 com os maiores potenciais de geração. Nota-se também a grande influência dos baixos valores de geração em Cuiabá, destacando-se a região mais azulada do mapa.

Os maiores valores para a região nordeste são corroborados por Pereira (2006), Martins et al. (2008) e Viana (2010), que em suas análises também identificaram essa região com a de maior incidência de radiação solar.

4. CONCLUSÕES

Aspectos ambientais podem levar a resultados de geração solar fotovoltaica diferentes daqueles esperados, reforçando a importância da análise de séries temporais de radiação. Assim, na análise de registros de três anos foram observadas diferenças entre os municípios, inclusive para os de mesma latitude. Cuiabá teve a pior estimativa de geração neste estudo, com 37% menos que a média do estado, e fatores como a poluição decorrente de queimadas podem explicar o resultado.

Levando-se em consideração os resultados da análise espacial, conclui-se como satisfatórios os resultados geoestatísticos. A região nordeste do estado de Mato Grosso é a com maior potencial de geração de energia elétrica, com destaque para a cidade de Carlinda, em que o resultado seria 0,815 kWh por dia para cada m².

Espera-se que esta publicação incentive a pesquisa e o desenvolvimento da energia solar, não só em Mato Grosso como no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. P.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S.; SANTOS, F. M.; MUSIS, C. R.; NOVAIS, J. W. Z. A poluição atmosférica e os parâmetros meteorológicos na cidade de Cuiabá-MT. As Engenharias e seu papel no desenvolvimento autossustentado. Editora Atena, p. 147-159, 2020.

ANDRIOTTI, J. L.S. Fundamentos de estatística e geoestatística. São Leopoldo: UNISINOS, 2003.

BASTOS, L. M. G. Estudo de viabilidade técnica, ambiental e econômica para utilização de energia solar fotovoltaica em construções no estado de Mato Grosso. Monografia da Especialização em Construções Sustentáveis da Universidade Tecnológica do Paraná, 2016.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARMO, I. F. Análise de viabilidade financeira da energia solar fotovoltaica: um estudo de caso em uma empresa de assistência técnica de motores WEG em Rondonópolis-MT. Monografia em Bacharel em Administração da Universidade Federal de Mato Grosso, 2019.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

DA CUNHA, F. M. C.; DE MACEDO, R. P.; ARAÚJO, E. C. M. Energia solar–sistema transiente de energia solar: estudo da utilização de energia solar para o abastecimento do plano piloto. Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de Pesquisa, v. 1, n. 1, 2018.

DAFONTE, J. M.; GUITIÁN, M. U.; PAZ-FERREIRO, J.; SIQUEIRA, G. M.; VÁZQUEZ, E. V. Mapping of soil micronutrients in an European Atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. *Bragantia*, Campinas, v. 69, supl, 2010.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. A Cidade de Curitiba e a Poluição do Ar. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DE MOURA, JAMES MORAES; FERNANDES, ALAN TOCANTINS; DA SILVA, JORDÂNIA CHAGAS. Utilização de Líquens como bioindicadores de poluição atmosférica na cidade de Cuiabá–MT. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiânia-GO, 2012.

DRAPER, NR; SMITH, H. Análise Aplicada de regressão (3ª ed.). John Wiley. 1998.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conservation Biology*, v. 19, p. 680-688, 2005.

GENÇAY, R. Non-linear prediction of security returns with moving average rules. *Journal of Forecasting*, John Wiley and Sons, Ltd., v. 15, n. 3, p. 165–174, 1996.

INMET, I. (2019). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Estações Convencionais. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesconvencionais>>. Acesso em: 07 de nov. 2019.

MACHADO, N. G.; DA SILVA, F. C. P.; BIUDES, M. S. Efeito das condições meteorológicas sobre o risco de incêndio e o número de queimadas urbanas e focos de calor em Cuiabá-MT, Brasil. *Ciência e Natura*, v. 36, n. 3, p. 459-469, 2014.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; DE ABREU, S. L.; COLLE, S. Brazilian atlas for solar energy resource: Swera results. In *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V)* (pp. 2651-2655). Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

PAIVA, M. L.; DE AZEVEDO, J. C. R.; JÚNIOR, J. U. Avaliação da aplicabilidade de sistema fotovoltaico conectado à rede em uma granja no Mato Grosso. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 1, p. 274-288, 2020.

PELLISSARI, A.L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CALDEIRA, S. F., & MACHADO, S. D. A. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do mato grosso. *Revista Brasileira Biometria*, v.32, n.3, p.74-85, p 2014.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos, 1ª Edição, p. 34. 2006.

SILVA, L. F. M. D. A viabilidade da geração de energia solar em residências no município de Cuiabá-MT. Monografia em Bacharel de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Mato Grosso, 2019.

TIEPOLO, G. M.. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015.

URBANETZ JUNIOR, J. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VENTURA, T. M.; SANTANA, L. L. R.; MARTINS, C. A.; DE FIGUEIREDO, J. M. Análise da aplicabilidade de métodos estatísticos para preenchimento de falhas em dados meteorológicos (analysis methods of application for statistical data in meteorology). *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 19, 2016.

VIANA, TRAJANO DE SOUZA. Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.