

MAPEAMENTO DE ÁREAS COM POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM SANTA CATARINA

MAPPING POTENTIAL AREAS TO GENERATE PHOTOVOLTAIC ENERGY IN SANTA CATARINA'S STATE

Fernanda Simoni Schuch¹

Murilo Souza Averlan²

Fábio Krueger da Silva³

Samuel João da Silveira⁴

Resumo: A necessidade da diversificação da matriz elétrica mundial provocou aumento na demanda por produção de energia limpa, com menores danos ambientais. Com a intensificação de investimentos e incentivos para geração de energia a partir de fontes renováveis, constatou-se a ocorrência de benefícios tanto do ponto de vista elétrico, como socioeconômico e ambiental no desenvolvimento de projetos inovadores. Para contribuir nesta te-

1 Professora Doutora do Departamento Acadêmico da Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

2 Engenheiro Civil da empresa Araxá Energia Solar

3 Professor Doutor do Departamento Acadêmico da Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

4 Professor Doutor do Departamento Acadêmico da Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



mática utilizou-se um Sistema de Informações Geográficas (SIG) em conjunto com uma avaliação Multicriterial Analytic Hierarchy Process (MAHP), a fim de se mapear áreas favoráveis à instalação de sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica. Foram definidos um conjunto de critérios a serem considerados para implementação de usinas solares, nomeadamente: a disponibilidade de radiação solar existente na área, a distância das linhas de transmissão de energia elétrica, a distância de arruamentos, a distâncias de áreas urbanizadas, a declividade do terreno, as unidades de conservação ambiental, a hidrografia, o uso e ocupação do solo. Desta forma, definiu-se as áreas com maior aptidão para implantação de usinas solares, verificando se os critérios adotados forneceram um resultado coerente dadas as característi-

cas geográficas, ocupacionais e, principalmente, de irradiação solar de Santa Catarina. Foi possível também quantificar as áreas identificadas como mais aptas apresentando-as em um mapa de potencial energético solar fotovoltaico para o estado de Santa Catarina.

Palavras chave: Geoprocessamento; Potencial fotovoltaico; Análise Multicritério (AHP)

Abstract: The need for diversification of the world's electricity matrix has led to an increase in the demand for energy production with a focus on reducing environmental impacts. With the intensification of investments and incentives in the development of innovative projects for energy generation, from renewable sources, it was verified the occurrence of benefits from both the electric,



socioeconomic and environmental point of view. This research has as main focus the application of Geographic Information Systems (GIS) in conjunction with the multicriterial Evaluation Analytic Hierarchy Process (AHP), aiming to define the most favorable areas for installation of systems of electric power generation through solar energy photovoltaic, with the state of Santa Catarina being the object of study. A set of criterias were defined regarding the implementation of solar power plants, such as: the availability of the existing solar radiation in the area, the distance of electric power transmission lines, distance from streets, distances from urbanized areas, the declivity of the area, the existence of conservation units, the hydrography and, land use and occupation. After that, it was possible to perform analysis and

considerations on the highlighted areas, with greater aptitude to build solar energy plants, verifying if the adopted criterias provided a coherent result due to the geographic, occupational and solar irradiance characteristics of Santa Catarina State. It was also possible to quantify the areas identified as more proper, by presenting them on a solar photovoltaic potential map and also, to estimate its total solar energy potential.

Keywords: Geoprocessing; Potential photovoltaic; Analytic Hierarchy Process (AHP)

INTRODUÇÃO

A possibilidade da redução da oferta de combustíveis convencionais, em conjunto com o aumento da demanda de energia, e o anseio pelo zelo do meio



ambiente, tem impulsionado a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energias renováveis, que sejam menos poluentes e com o menor impacto ambiental possível (PEREIRA et al., 2006).

Mishra et al. (2020) afirmam que recentemente houve um aumento de 20% no número de países gerando energia com fontes renováveis. Modernas e renováveis fontes de energia como bioenergia, geotérmica e solar, tiveram um crescimento significativo nos anos recentes. A energia solar e a eólica têm se tornado as opções mais viáveis no mercado de energia renovável.

Segundo dados apresentados no relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2018), o sistema elétrico brasileiro apresenta-se como um sistema essencialmente hidrotérmico, de

grande porte, com forte predominância de usinas hidroelétricas. Em 2017, a oferta total de energia atingiu a marca aproximada de 624,3TWh com participação predominante de 407,3TWh de fonte hidráulica.

Conforme Pereira et al. (2006), as fontes renováveis de energia como a eólica e solar são consideradas fontes intermitentes de energia, devido à elevada dependência direta de variáveis temporais associadas a condições meteorológicas do local de instalação. Entretanto, fontes de energia como termoelétricas e hidrelétricas são consideradas firme devido sua capacidade de garantir a demanda de energia. Sendo assim, a vulnerabilidade climática dos recursos hídricos frente ao crescimento da demanda de eletricidade evidencia a necessidade da diversificação das fontes de energia que compõem

a matriz energética brasileira, de modo a usufruir de alternativas que causem baixo impacto ao meio ambiente.

Além da questão relativa ao suprimento da demanda energética sabe-se que da necessidade iminente de se buscar fontes energéticas renováveis e de menor impacto ambiental. O recente relatório do IPCC (2021), no seu capítulo 5, traz dados alarmantes sobre a necessidade de diminuição nas atividades com emissão de dióxido de carbono (CO₂) de modo a se mitigar o aumento da temperatura global do último século. A utilização de combustíveis como petróleo, gás natural e carvão nos países do grupo G7 contendo as 7 maiores economias do mundo é elevada, tendo o petróleo a maior média de consumo entre estes países (aproximadamente o dobro do carvão mineral e gás natural)

(Martins et al., 2021). Portanto, a geração de energia limpa, com menor emissão de carbono é desejada e, neste ponto, deve-se considerar como opção viável a utilização de usinas para geração de energia fotovoltaica.

A utilização da energia fotovoltaica em sistemas de geração distribuída (GD) apresenta características que contribui para a não dependência exclusiva da geração centralizada, pois sua geração acontece em pequenas fontes ao longo do sistema de transmissão ou de distribuição. Isto acarreta também na redução da necessidade de custos extras na ampliação de infraestrutura de transporte desta energia, uma vez que as fontes geradoras estarão mais próximas aos consumidores de energia (SILVEIRA, 2013).

Segundo dados do (MME, 2016), o estado de Santa

Catarina apresenta 83,9% de geração de energias renováveis em sua matriz elétrica. No entanto, apresenta ainda em 2015, 34% de consumo de energia proveniente de fonte poluidora, carvão mineral, para geração de energia elétrica. Isso é preocupante uma vez que o Estado é possuidor de um grande legado de degradação ambiental de décadas de exploração deste mineral como fonte energética e ainda continua a explorá-lo (ANDRADE, 2017).

Este artigo traz uma análise territorial do potencial de geração de energia fotovoltaica no estado de Santa Catarina, apresentando-se as regiões com potencial para instalação e de geração. Recorreu-se às técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica, onde, através da análise de mapas, apresentam-se as regiões mais favoráveis à instalação de

sistemas energéticos renováveis, provenientes do aproveitamento da energia solar fotovoltaica, aplicando-se o método Analytic Hierachy Process (AHP).

MATERIAIS E MÉTODO

Aborda-se aqui os materiais e o método utilizado para se definir um conjunto de fatores que influenciem de forma significativa a viabilidade para implantação de usinas solares fotovoltaicas.

Para se realizar os levantamentos e mapeamentos objetivados neste estudo, realizou-se 4 etapas principais:

1. A primeira etapa dedicou-se à busca por diferentes referenciais bibliográficos quanto a informações dos critérios adotados, relativos à avaliação do potencial de instalação de uma usina solar fotovoltaica

para geração de energia elétrica, de maneira a se compreender os principais fatores utilizados por autores, os quais basearam suas pesquisas no método AHP, para se definir as áreas mais favoráveis para instalação das mesmas.

2. Na etapa 2, coletou-se de documentos digitais georreferenciados do Estado de Santa Catarina. São expressos na Tabela 1 os dados recolhidos e as

respectivas origens para construção deste estudo. Tais dados são digitais e estão georreferenciados, tendo sido obtidos no formato vetorial ou raster e após a obtenção deles, organizou-se em um Sistema de Informações Geográficas, para possibilitar a manipulação e conversão dos mesmos.

Tabela 1 – Dados da pesquisa

Dados	Fonte
Irradiação Solar	LABREN/CCST/INPE
Relevo / Hidrografia	EPAGRI/FATMA
Arruamentos	FATMA
Uso e ocupação do solo	FATMA
Linhas de Transmissão	SIGEL ANEEL
Unidades de conservação	FATMA/IBAMA
Limites de Santa Catarina	SIGSC (SEPLAN 2013)

3. Na terceira etapa deste trabalho, tem-se a realização do pré-processamento dos dados dentro do software utilizado no estudo, Quantum GIS, o que inclui a criação e organiza-

ção da Base de Dados Georreferenciados (Criação do SIG).

4. Na quarta e última etapa, a partir dos critérios definidos para localização de áreas mais favoráveis para insta-



lação de usinas solares e análise dos resultados por ele gerados com a sobreposição dos dados de entrada.

Software SIG e as variáveis de análise

A manipulação de dados espaciais neste estudo deu-se a partir do software Quantum Gis (QGIS), o qual é gratuito, licenciado pela GNU (General Public License). A interface do software oferta várias ferramentas que possibilitam a criação e organização de Base de Dados Georreferenciados, bem como geoprocessamento de diferentes formatos de dados digitais. O software usa a biblioteca de código aberto OGR, para ler e gravar formatos de dados vetoriais, incluindo shapefiles ESRI, formatos de arquivo MapInfo e MicroStation, bancos de dados

AutoCAD DXF, PostGIS, SpatialLite, Oracle Spatial, MSSQL Spatial, e muitos mais.

Durante a revisão bibliográfica sobre a aplicação da análise multicritério AHP em conjunto às ferramentas SIG, avaliou-se diferentes estudos para definir os critérios que influenciam na viabilidade técnica e econômica para instalação de empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica. Isto é de extrema relevância para se compreender quais ferramentas do software são necessárias e, portanto, devem estar disponíveis.

Observou-se, por exemplo que, Janke (2010) define as variáveis como critérios que influenciam diretamente na aptidão de uma área para instalação de um empreendimento solar/eólico: o uso do solo, existência/distância de linhas de transmissão,



radiação solar, terras federais, existência rede viária, densidade populacional. Izeiroski et al. (2018) utiliza critérios preliminares, onde inicialmente tem-se a aplicação dos seguintes parâmetros para o geoprocessamento dos dados topológicos:

a) Localizações com pequenas inclinações (Menores que 5%);

b) Localizações com relação ao aspecto, ou seja, orientação e direção da encosta (sudeste sudoeste).

No que tange a fatores de natureza ecológica de maior influência na escolha dos locais mais propícios a instalação de usinas solares, Izeiroski et al. (2018) inseriu em seus critérios a infraestrutura rodoviária, rede de drenagem, uso do solo e áreas de assentamento.

Já Alves (2013) define

um conjunto de fatores de maior influência na análise da localização das áreas com maior aptidão a instalação de usinas solares na ilha de São Vicente em Cabo Verde, sendo seus critérios:

I. Potencial solar do lugar

II. Proximidade as linhas de transmissão

III. Proximidade a rede viária

IV. Uso do solo e ocupação do solo

V. Declive

VI. Hidrologia

Garni e Awasthi (2017) também apresentam em seu estudo critérios, tais como: irradiação solar, temperatura do ar, declividade do terreno, aspecto do terreno, proximidades de áreas urbanas, proximidade rodovia, proximidades a linhas de transmissão, áreas de proteção am-



biental e lugares sagrados.

Uyan (2013) abordou em sua pesquisa dois tipos de critérios na seleção das áreas mais aptas a instalação de usinas solares. Tendo como parâmetros os fatores ambientais e fatores econômicos. Nos fatores ambientais têm-se o uso do solo e a distância de áreas residenciais cujas regiões com distâncias menores que 500 metros de centros residenciais apresentam aspecto negativo, pois dificultariam o crescimento urbano da população. No entanto, no presente trabalho, serão adotadas as áreas urbanizadas como favoráveis, visando o aproveitamento de zonas industriais próximas a centros urbanos. Quanto ao uso do solo, Uyan (2013) tem a visão como um dos fatores ambientais mais importantes a serem considerados, as áreas de uso para agricultura e solos expostos (áreas estéreis)

como as mais adequadas para implantação de uma usina solar.

No que tange os aspectos econômicos, tem-se a topologia do terreno. Onde Uyan (2013) apresenta o critério declividade e aspecto do terreno como um fator único, definindo uma declividade limite de 3% para todas as direções do aspecto do terreno. Outro critério também utilizado foi a distância de rodovias onde se limitou a uma distância de 5,0 quilômetros. Por último, o critério de proximidade de linhas de transmissão foi apresentado como fator de grande importância econômica, limitando a uma distância de 10,0 quilômetros. Da mesma forma, a proximidade com linhas de transmissão de energia é um dos critérios abordados no presente trabalho pensando-se na possibilidade de não haver uma linha de transmissão próxima a uma área, tendo-se



então, a necessidade de proximidade à uma rede que comporte a geração de um sistema de geração solar fotovoltaica. Ressalta-se que a distância máxima analisada é dada de acordo com as dimensões da área estudada, Alves (2013) optou por adotar uma distância máxima de 2,50 quilômetros em uma área de estudo de aproximadamente 220,0 quilômetros quadrados.

A partir dos referenciais analisados, optou-se pela adoção dos seguintes critérios: irradiação solar, declividade, proximidade de linhas de transmissão, proximidade a áreas urbanizadas e arruamentos, unidades de conservação, uso e ocupação do solo e hidrografia.

Matriz de pesos dos critérios adotados

A utilização da análise

multicritério apresentou-se como um fator comum para avaliação do potencial de instalação de empreendimentos fotovoltaicos durante a revisão bibliográfica, apresentando a capacidade de agrupar diferentes critérios (C1, C2, C3 e C4) em uma mesma análise. Faz-se necessário, para tanto, a elaboração de uma matriz de atribuição de pesos aos critérios para utilização do método AHP, como proposto por Saaty (1977). Inicialmente decomps-se os problemas em níveis hierárquicos e comparou-se par a par a fim de atribuir seus pesos conforme suas características favoráveis ou desfavoráveis. Logo, tem-se definição do grau de importância entre os fatores estudados (Tabela 2), definidos através da escala fundamental de pesos proposta por Saaty (1977).



Tabela 2 - Matriz de atribuição do grau de importância par a par dos critérios

		Critério	Absolut	Muito Grande	Grande	Pequen	Igual	Pequen	Grande	Muito Grande	Absolut	Critério	
1	C1	Irradiação				3						C2	Declividade
2	C1	Irradiação				3						C3	Dist Linhas de transmissão
3	C1	Irradiação				3						C4	Dist de áreas urbanizadas
4	C1	Irradiação				3						C5	Dist de arruamentos
5	C2	Declividade						1/3				C3	Dist Linhas de transmissão
6	C2	Declividade						1/3				C4	Dist de áreas urbanizadas
7	C2	Declividadc						1/3				C5	Dist de arruamentos
8	C3	Dist Linhas de transmissão					1					C4	Dist de áreas urbanizadas
9	C3	Dist Linhas de transmissão				3						C5	Dist de arruamentos
10	C4	Dist de áreas urbanizadas				3						C5	Dist de arruamentos

A interpretação dos dados da matriz de julgamento é realizada comparando os elementos par a par através da escala de grau de importância. Na matriz acima a primeira comparação considera que a irradiação possui uma pequena importância em relação a declividade, na quinta comparação a distância de linhas de transmissão possui pequena importância sobre a declividade e na oitava linha a distâncias a linhas de transmissão e distância de arruamentos possuem mesmo

grau de importância. Segundo (OLIVEIRA e BELDERRAIN, 2008) os valores da escala de importância, citado acima, são dados a serem utilizados para compor a matriz de comparação, a qual se diz: A matriz é recíproca e positiva quando $a_{ij} = 1/a_{ji}$ para todo $a_{ij} > 0$; e $a_{ii} = 1$ para todo i . O que significa que qualquer critério comparado a ele mesmo possui igual importância na escala fundamenta de Saaty.

A partir das regras apresentadas, construiu-se a matriz



de decisão, quadrada, recíproca e positiva, conforme apresentada na tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de comparação

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁ - Irradiação	1	3	3	3	3
C ₂ - Declividade	1/3	1	1/3	1/3	1/3
C ₃ - Distância de linhas de transmissão	1/3	3	1	1	3
C ₄ - Distância áreas urbanizadas	1/3	3	1	1	3
C ₅ - Distância de arruamentos	1/3	3	1/3	1/3	1

Por seguinte, para verificar a consistência de uma matriz de decisão é necessário obter o autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) da matriz de decisão (A) e seu autovetor associado (w). Logo, o pro-

cesso algébrico para determinação de tais valores e vetores será realizado conforme apresentado abaixo:

$$W = \overline{\sigma_{i=1}^n a} \quad i=1, \dots, n \quad \text{Eq. 1}$$

$$\lambda_{\text{áx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A W}{W} \quad \text{Eq. 2}$$

$$I C = \frac{\lambda_{\text{áx}} - n}{-1} \quad \text{Eq. 3}$$

$$R C = \frac{I C}{n} \quad \text{Eq. 4}$$

- i. IC = índice de consistência;
- ii. RC = razão de consistência;
- iii. IR = índice aleatório extraído da Tabela 4;
- iv. n = número de fatores em análise na matriz (ordem da matriz);



- v. $[AW]_i$ = matriz resultante do produto da matriz comparação $[AW]_i$ pelos pesos W_i ;
vi. W = pesos calculados.

Saaty (1991) propôs a Tabela 4 com os índices aleatórios para matrizes de onde 1 a 10, conforme expressos abaixo:

Tabela 4 – Índice aleatório

n (Ordem da matriz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Da matriz apresentada na Tabela 3 resultam os pesos estatísticos para cada fator, os quais a partir dos cálculos apresentados acima avaliou-se a veracidade dos mesmos por meio da razão de consistência (RC), a qual almeja-se um valor abaixo de 0,10, o que significa que pelo menos 90% de veracidade dos julgamentos dos pesos dos fatores estão coerentes.

Outra análise necessária para se obter o mapa final é a combinação linear ponderada. O procedimento mais prevalen-

te para avaliação multicritério é a combinação linear ponderada (VOOGD, 1983, p. 120). Com uma combinação linear ponderada, fatores são combinados pela aplicação de um peso para cada critério seguido por uma soma dos resultados para produzir um mapa de adequação, conforme a equação 5.



$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

- a) S: valor final de adequação;
- b) W_i : peso do critério fator i;
- c) X_i : valor normalizado do mesmo fator i.

Como no caso do presente estudo, em que o problema da localização de usinas solares fotovoltaicas apresenta critérios do tipo fator e exclusão, tem-se a necessidade de incorporar a Equação 5 as restrições Booleanas com demais fatores, conforme a seguinte expressão:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \prod_{j=1}^k C_j \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

- i. S: valor final de adequação (valor final do score);
- ii. W_i : peso do critério fator i (com $i=1, \dots, n$);
- iii. n: número de critérios fator;
- iv. X_i : valor normalizado para o mesmo fator;
- v. C_j : score (0 ou 1) do critério de exclusão (com $j=1, \dots, k$);
- vi. K: número de critérios de exclusão.

Ressalta-se que os critérios C_j que compõem a Equação 6 são: as unidades de conservação (UC's), rede hidrográfica, declividade e uso e ocupação do solo. de potencial solar fotovoltaico de santa Catarina, cujos pesos adotados para cada critério encontram-se na Tabela 5:

Seguidos os procedimentos matemáticos abordados nos itens anteriores obtém-se a equação final utilizada para o geoprocessamento do mapa final



Tabela 5 -Peso dos critérios adotados

Critério	Autovetor	Autovetor normalizado
Irradiação	2,41	0,40
Declividade	0,42	0,07
Distância linhas de transmissão	1,25	0,21
Distância de áreas urbanizadas	1,25	0,21
Distância de arruamentos	0,64	0,11

Logo a equação a ser aplicada na ferramenta Calculadora Raster em ambiente QGIS será:

$$P S \times 0,40 + I S \times 0,21 + L T \times 0,21 + A U \times 0,11 + A \times 0,07 + D \times 0,07 + U C \times 0,21 + H \times 0,11 + U S \times 0,11 \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. PS – Potencial solar fotovoltaico | 5. LT - Linhas de transmissão |
| 2. IS - Irradiação solar | 6. AU – Distância de áreas urbanizadas |
| 3. D – Declividade | 7. UC - Unidades de conservação |
| 4. A - Arruamentos | 8. H - Hidrografia |
| | 9. US - Uso e ocupação do solo |

A razão de consistência (RC) obtida é de 0,075, o que significa que os julgamentos realizados possuem 92,5% de consistência, ou seja, apenas 7,5% de inconsistência. Segundo Voogd (1983), devido as diferentes escalas sobre as quais os critérios são medidos, torna-se necessário que os fatores sejam padronizados a

uma escala comum, tal transformação é conhecida como normalização. Logo, para tomar vários critérios comparáveis, será realizada a aplicação de procedimentos matemáticos como conforme apresentados por Voogd (1983), páginas 77 a 84. Tais procedimentos, também utilizado por Vicari (2012), vem sendo típica-



mente usada pela sua simplicidade, conforme expressão matemática seguir:

$$X = \frac{R}{R} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

1. Xi: novo valor padronizado do critério i;
2. Ri: é o valor original do critério i;
3. Rmax: valor máximo observada no conjunto de dados do critério i.

Este tipo de transformação é muito útil para padronizar uma matriz de avaliação que será analisada por uma técnica de soma de peso ou qualquer outra técnica que utilize a magnitude das pontuações individuais (VOOGD, 1983).
estão representados no fluxograma na Figura 1.

Geoprocessamento dos Dados

Depois de realizado o pré-processamento e a definição dos critérios realizou-se o geoprocessamento dos dados no Software QGIS, com finalidade de se obter as áreas mais favoráveis para instalação de sistemas solares fotovoltaicos. Os procedimentos metodológicos das etapas



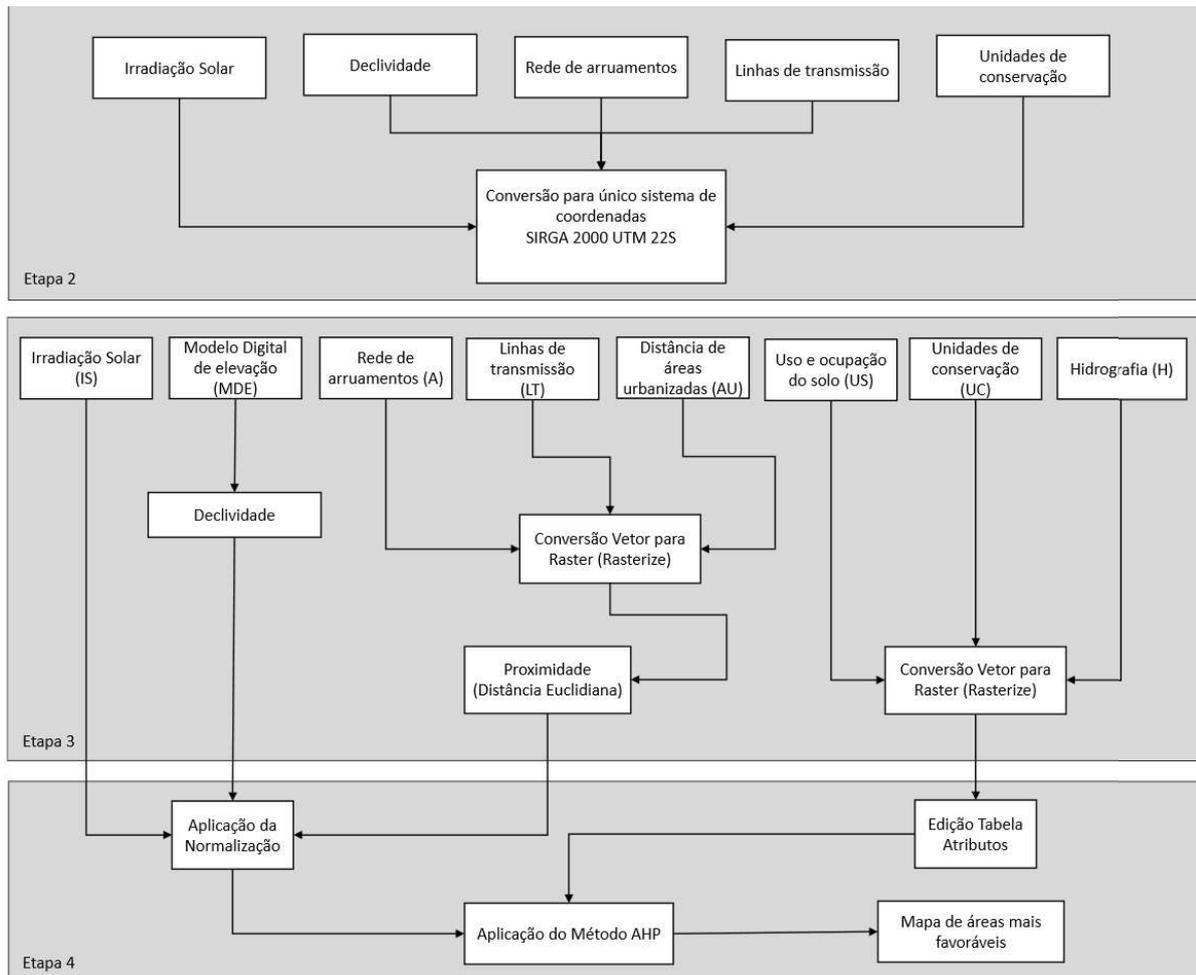


Figura 1 – Fluxograma do processamento dos dados

Os geoprocessamentos necessários para os dados de irradiação solar em ambiente QGIS consistiram em delimitação dos dados (recorte da área), normalização e atribuição de uma rampa de cores para visualização dos dados.

Na geração do mapa de

distância das linhas de transmissão, Uyan (2013) utilizou uma distância limite de 10,0 quilômetros na região de Konya na Turquia, com área de 6.035,0 quilômetros quadrados, Garni e Awasthi (2017) adotaram o valor limite de 50,0 quilômetros para o

estado do Rio Grande do Sul, lo-

calizado ao sul do Brasil, o mesmo adotado nesta pesquisa, em buffer.

Para o mapa do critério arruamentos, realizou-se procedimentos verificando-se a distância às de linhas de transmissão, diferindo apenas o valor máximo dado a ferramenta Proximidade Raster, que neste quesito é adotado ao valor máximo de 2,50 quilômetros apresentada por Alves (2013), pois como citado pelo mesmo, a distância onde se pretende instalar uma usina solar e a rede viária possui influência direta no custo de instalação e manutenção do empreendimento. Feito isso, foi possível realizar a normalização das distâncias, onde a maior distância de arruamentos representa o valor 0, que corresponde a menor aptidão e a menor distância valor 1, maior aptidão.

No que toca o critério

de hidrografia realizou-se a aplicação da ferramenta Buffer, a fim de delimitar as áreas com distâncias de até 30 metros da rede hidrográfica, que por sua vez terá a sua tabela de atributos alterada de maneira que regiões situadas até 30 metros receberam atributo 0 e demais áreas atributo 1. Feito isso, tem-se a transformação para o formato Raster respeitando os valores atribuídos anteriormente. Ressalta-se que o valor de 30 metros adotado atende aos requisitos legais ambientais dispostos no código florestal, lei nº 12.727/2012.

A obtenção do mapa de declividades no estado de Santa Catarina teve início no ambiente do QGIS com a importação do arquivo Modelo Digital de Elevação (MDE) as áreas mais favoráveis são aquelas que apresentam declividades pequenas, devido aos custos de movimentação de



terra e limitação da resistência das estruturas de suporte dos painéis solares. Logo, definiu-se que as áreas planas e suavemente onduladas ajudarão a evitar o alto custo de construção exigido em áreas mais íngremes, estabeleceu-se por limitar a inclinação para 5% em todas as direções do aspecto do terreno. Na etapa de geoprocessamento do MDE, tem-se a utilização da ferramenta Declividade no software QGIS, a qual gera como produto uma grade (raster) de declividade para toda área contemplada no estudo. O produto gerado é um mapa temático de declividade com representação gráfica em cores expressos em classes. Feito isso, a ferramenta de Reclassificação em ambiente QGIS foi utilizada para delimitar o intervalo de declividade a ser utilizado no estudo e por seguinte a realização da normalização desse critério de modo

a variar de 0 a 1. Também nesta etapa, foi elaborado um Raster de declividade contendo valores 1 para declividades até 5% e 0 para demais declividades, com intuito de criar um Raster restritivo, o qual é utilizado para multiplicar a soma ponderada do potencial solar fotovoltaico.

Visto que o uso e ocupação do solo apresenta um dos fatores mais importantes a serem computados no estudo conforme apresentado por Uyan (2013). Em que as áreas mais favoráveis para instalações de usinas solares fotovoltaicas têm-se em áreas agrícolas e solos expostos bem como a relação com a proximidade de centros urbanos. Porém, diferente de Uyan (2013), as áreas urbanizadas neste estudo serão computadas como critério favorável, com valor 1, com intuito de incluir áreas de industriais urbanizadas. Desta forma, a partir



de dados disponibilizados pela FATMA e já pré-processados tem-se a edição das tabelas de atributos e definição das ponderações das classes a serem usadas no presente estudo apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Ponderação do uso e ocupação do solo na tabela de atributos

Classe	Ponderação
Agricultura	1
Área de Mineração	1
Área Urbanizada e/ou construída	1
Corpos d'água	0
Florestas em estágio inicial	0
Florestas em estágio médio ou avançado	0
Mangues	0
Pastagem e campos naturais	1
Reflorestamentos	0
Solo exposto	1
Vegetação de várzea e restinga	0

Os dados para geração do mapa de unidades de conservação, foram submetidos apenas a conversão dos dados do tipo vetor para raster, através da ferramenta “Rasterize” do QGIS. Por seguinte foi realizado a edição da tabela de atributo do mesmo, onde foi definido valor 0 para áreas contidas nas unidades de conservação e valor 1 para as de-

mais áreas.

Seguidos os procedimentos matemáticos abordados nos itens anteriores foi possível obter os pesos de cada critério (Tabela 7) e, portanto, a equação final que será utilizada para o geoprocessamento do mapa final de potencial solar fotovoltaico de santa Catarina. Têm-se os seguintes valores:



Tabela 7 – Pesos dos critérios adotados

Critério	Autovetor	Autovetor normalizado
Irradiação	2,41	0,40
Declividade	0,42	0,07
Distância linhas de transmissão	1,25	0,21
Distância de áreas urbanizadas	1,25	0,21
Distância de arruamentos	0,64	0,11

Fonte: Do autor

Logo a equação a ser será:
 aplicada na ferramenta Calcula-
 dora Raster em ambiente QGIS

$$P S [0,40x IS + 0,21x LT + 0,21x AU + 0,11x A + 0,07x D](UC + H + US + D)$$

Equação 1

Onde:

- PS – Potencial solar fotovoltaico
- IS - Irradiação solar
- D – Declividade
- A - Arruamentos
- LT - Linhas de transmissão
- AU – Distância de áreas urbanizadas
- UC - Unidades de conservação
- H - Hidrografia
- US - Uso e ocupação do solo

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aplicando-se o método anteriormente descrito, obteve-se as seguintes camadas de informação: irradiação solar, distância de linhas de transmissão, distân-

cia de áreas urbanizadas, distância de arruamentos e declividade, os quais seguem descritos:

A irradiação solar no estado de Santa Catarina apresenta maiores índices na região oeste do estado, com pode ser verificado no mapa apresentado na figu-



ra 2, o qual contém os dados de médias anuais da irradiação solar no plano inclinado na latitude em Wh/m²/dia normalizados. Por esta razão, os valores mais favoráveis estão em tons de verde

e, à medida que a escala de cor passa ao bege e vermelho, significa que, neste quesito, a área não favorece a implantação de usinas solares.

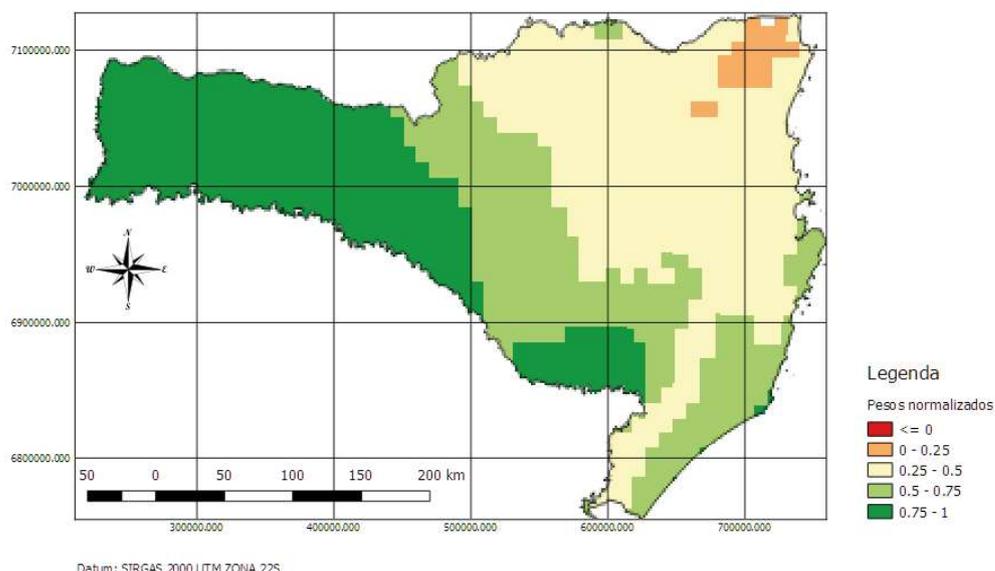


Figura 2 -Irradiação Solar de SC

As distâncias de linhas de transmissão de energia, ver figura 3, apontaram algumas regiões fora do alcance máximo de 50Km definido no método, ressalte-se que distâncias superiores a 50Km foram consideradas inadequadas, devido ao alto custo de

implantação de linhas de transmissão com conexão às redes básicas através de uma subestação, caso as usinas possuíssem uma potência instalada superior a 5MW.



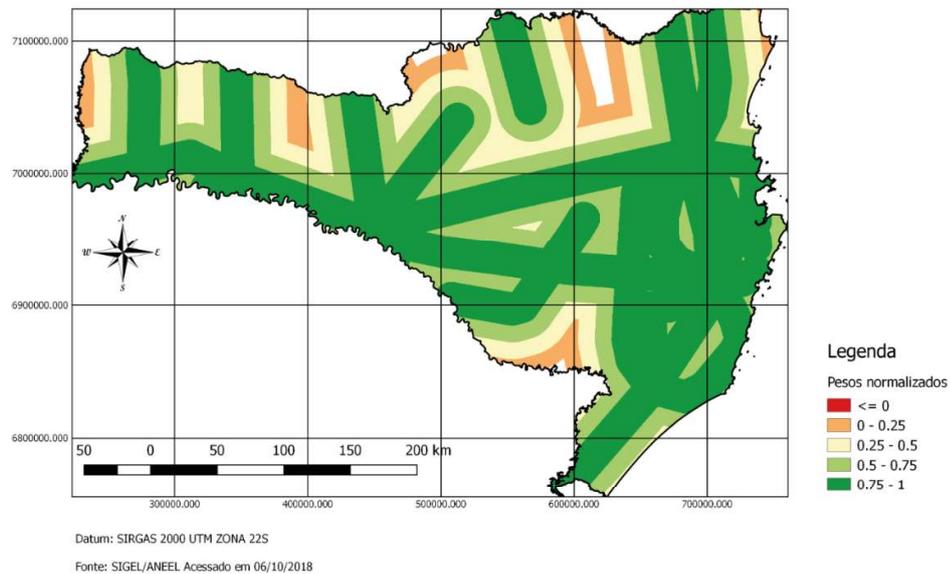


Figura 3 -Distância de linhas de transmissão

A camada das distância de áreas urbanizadas apresentou como uma grande constância de aptidão, visto que 91,48% da área do estado está dentro do intervalo de maior aptidão e apenas 0,29% no de menor, conforme ilustrado na figura 4.

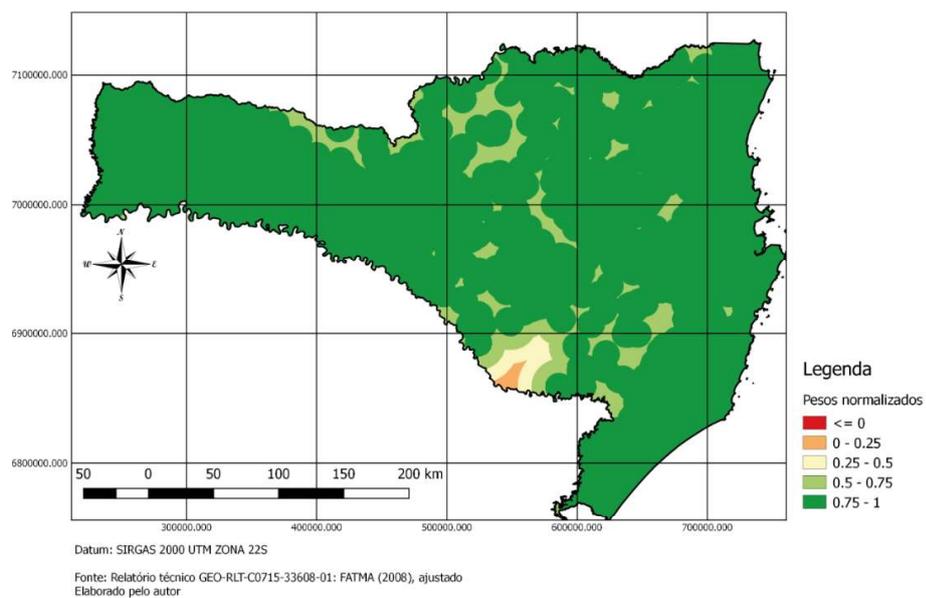


Figura 4 – Distância de linhas de transmissão



O critério de distância de arruamentos apresenta em quase na sua totalidade pesos entre 0,75 e 1,00, conforme relatório obtido através da ferramenta “R.report” do QGIS e ilustrado na figura 5. Isso fez com que o

critério, ao final, apresentasse pouca relevância no grau de aptidão para definição do potencial de geração de energia solar fotovoltaica no estado de Santa Catarina.

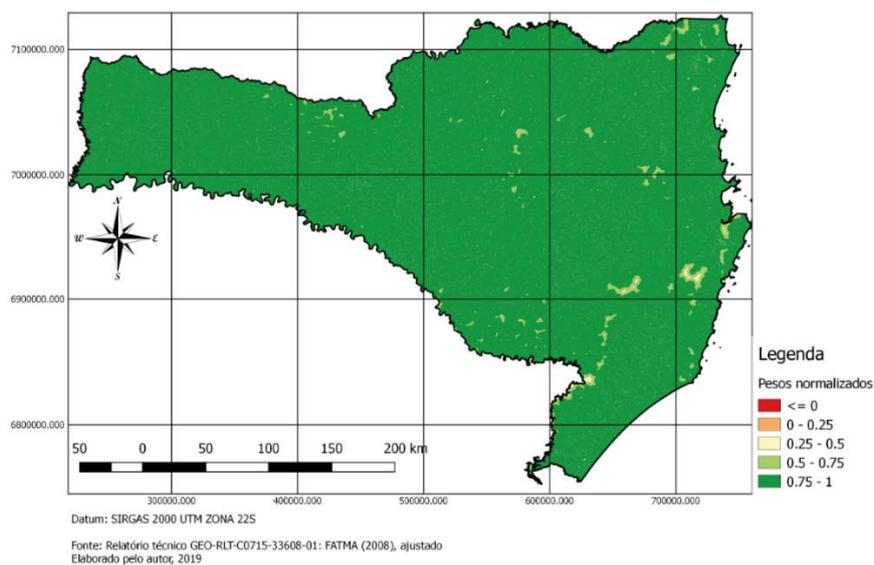


Figura 5 – Distância de arruamentos

Através da camada de informação de declividade do Estado de Santa Catarina normalizado, verifica-se que as regiões mais aptas se concentram no litoral Catarinense, considerando o critério de declividade limite

para instalações de usinas fotovoltaicas de 5%, ver figura 6.



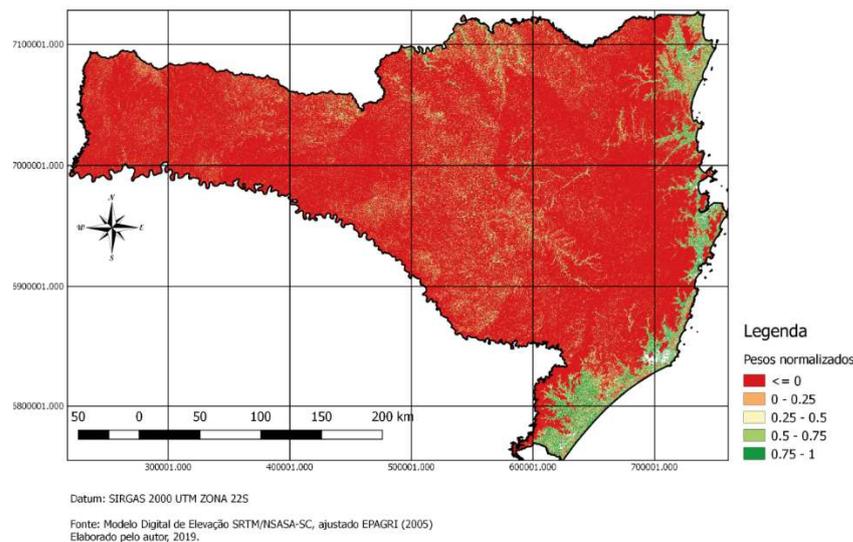


Figura 6 – Mapa de declividade de SC

A sobreposição das camadas realizada com a aplicação da equação 7 (anteriormente apresentada) mostrou como resultado o delineamento do Potencial de Geração de Energia Solar em Santa Catarina. A Figura 7 mostra classes de aptidão que variam de 0 a 0,97, ou seja, não foi obtido nenhuma área que apresentasse aptidão de 100%. O mapa gerado apresentou a quantidade de áreas aptas e seu grau de aptidão conforme apresentado na Tabela 7, sendo que, o intervalo de potencialidade entre

0 e 0,39 não se apresentou em nenhuma região do mapa. Pois como visto nos mapas anteriores, grande parte do estado teve os pesos normalizados os critérios com valores próximos de 1.

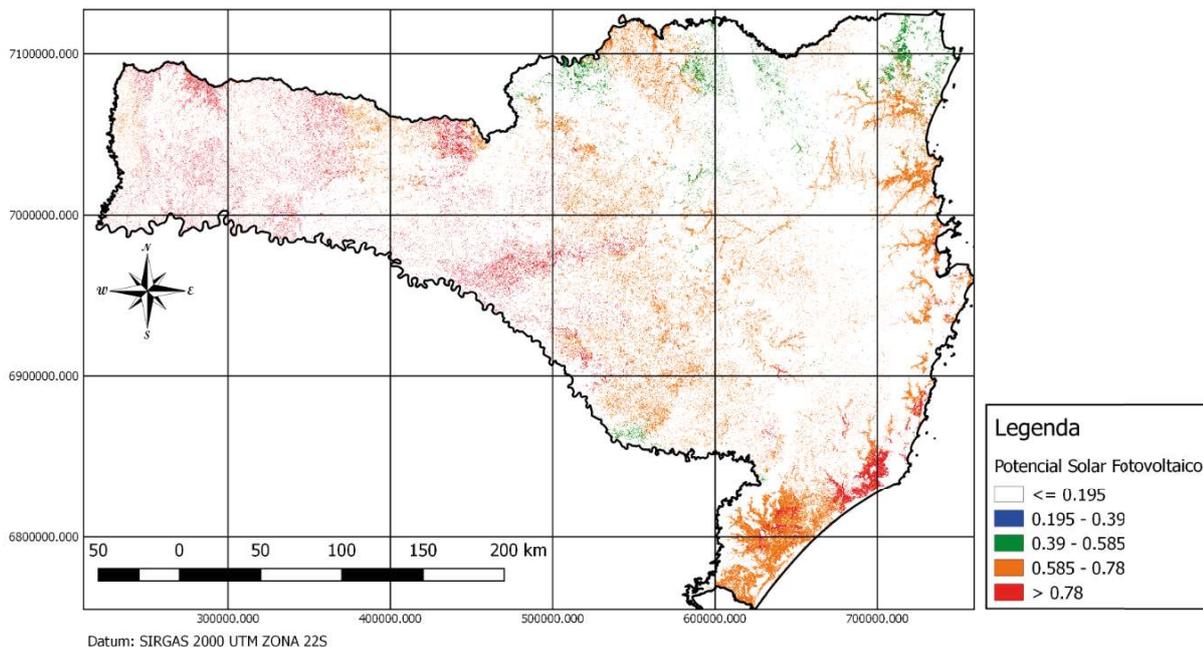


Figura 7 -Mapa do potencial de geração de energia fotovoltaica de SC

Neste estudo, muitas regiões apresentaram potencial alto ou muito alto, como pode ser visto na Figura 7. Em especial, observa-se a região sul do Estado, no Sopé da Serra Geral, para instalação de usinas solares fotovoltaicas quando se aplica os critérios definidos na metodologia deste estudo.

Verificou-se que apesar da irradiação solar apresentar 40% do peso na definição dos locais aptos, foi o mapa de restrição

que fez um maior direcionamento as regiões de maiores potencial a instalação de usinas.

Tabela 7 – Potencial Solar Fotovoltaico de Santa Catarina

Intervalo	Potencial	Área (hectares)	Percentual da área (%)
0	Inexistente	8.188.954	88,84
0,19-0,38	Baixo	0	0
0,38-0,58	Médio	83.424	0,91
0,58-0,78	Alto	682.761	7,41
0,78-1,00	Muito alto	262.346	2,85

A região do extremo oeste do estado apresenta potencial elevado, porém em áreas menores e mais espaçadas. Ao observar a região norte, nota-se que o potencial dessa região está entre os mais baixos do estado, o que pode ser explicado devido a esta região ter os valores de irradiação baixos e o peso adotado para esse critério ser alto.

Na Mesorregião Serrana é possível visualizar um corredor de altos índices de potencial solar, localizados entre os municípios de Campos Novos e Curitibanos, devido ao fato de o Planalto de Lages possuir o relevo menos acidentado com forte

predominância de áreas agrícolas e de pastagem.

As planícies litorâneas do Estado apresentam grandes áreas com elevada aptidão. Identifica-se que, especialmente a região sul apresenta os maiores índices de potenciais à instalações de usinas solares fotovoltaicas, região esta, detentora da Usina Fotovoltaica Nova Aurora no município de Tubarão, próxima a rodovia BR-101 e a linha de transmissão “J.LACERDA-B / SIDEROPOL.ESU C 1 SC”.

Verifica-se que a região sul quando comparada a região oeste do estado, obteve a maior parte da diferenciação do peso fi-



nal de potencialidade no quesito de irradiação solar.

Em resumo, o Estado de Santa Catarina, dispõe de aproximadamente um milhão de hectares com maior potencial de geração energia proveniente do aproveitamento solar fotovoltaico, o que representa algo próximo de 11% do total da área do estado em regiões com aptidão a instalação de usinas solares, sendo capazes de gerar 1.702.790,21 GWh por ano, fazendo uma estimativa simplificada de produtividade anual de energia elétrica por área através dos resultados das simulações apresentadas por Dolla et al. (2018) na capital Florianópolis, se aplicada ao estado inteiro.

Considerando o consumo anual de energia elétrica em Santa Catarina de 2017 em 24.344 GWh (BRASIL, 2017), estima-se que a geração de ener-

gia apresentada anteriormente seria capaz para atender a energia elétrica consumida no Estado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Gilson Jorge. Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica nas energias renováveis: o potencial da energia solar na ilha de São Vicente – Cabo Verde. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de [s.l.], Universidade do Porto, [s.l.], 2013.

ANDRADE, Gilmar. Geração de energia elétrica sustentável e seu estímulo em Santa Catarina. 2017. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Departamento de Ciências da Administração, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.



BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. . Anuário Estatístico de Energia Elétrica Interativo: Panorama do Consumo (GWh). 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/Paginas/Anuario-Estatistico.aspx>>. Acesso em: 05 maio 2019.

DOLLA, Ruany et al. Estimativa da Produção Energética e de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Integrado ao Anteprojeto do Aeroporto Internacional de Florianópolis. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. Arquitetura e Energia Solar - Aspectos arquitetônicos do uso de instalações fotovoltaicas. Gramado: Cbens, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese ano base 2017. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

GARNI, Hassan Z. Al; AWASTHI, Anjali. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. Applied Energy, [s.l.], v. 206, p.1225-1240, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>.

IPCC, Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, 221 p., disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_05.



pdf, acessado em: 11/11/2021.

vpol.2021.118093 .

IZEIROSKI, Subija et al. GIS-based multi criteria analysis of site suitability for exploitation of renewable energy resources. 7 Icc&gis Proceedings, Sozopol, Bulgaria, v. 1, p.653-665, 18 ago. 2018. (ISSN 1314-0604).

JANKE, Jason R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. Renewable Energy, Denver, v. 35, 2010. p.2228-2234.

MARTINS, Tailon; BARRETO, Alisson Castro; SOUZA, Francisca Mendonça; SOUZA, Adriano Mendonça Souza; Fossil fuels consumption and carbon dioxide emissions in G7 countries: Empirical evidence from ARDL bounds testing approach; Environmental Pollution, Elsevier Ltda., 2021, <https://doi.org/10.1016/j.en>

MISHRA, Tripti; RABHA, Amit; KUMAR, Ujjwal; ARUNACHALAM, Kusum; SRIDHAR Vijay; Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and Geographic Information System; Remote Sensing Applications: Society and Environment, Elsevier Ltda.; 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100370> .

MME. Matrizes Elétricas Estaduais Ano de referência: 2015. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia>>. Acesso em: 15 set. 2018.

OLIVEIRA, C. A.; BELDERAIN, M. C. N. . Considerações sobre a Obtenção de Vetores de prioridade no AHP. In: Encuen-



tro Nacional de Docentes, 2008, Posadas. Anales do EPIO, 2008. v. 1.

PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Inpe, 2006. 60 p. (ISBN 85-17-00030-7 ISBN 978-85-17-00030-0). Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal Of Mathematical Psychology*, [s.l.], v. 15, n. 3. 1977. p.234-281. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).

_____. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

SILVEIRA, Miguel Francisco da. Análise do impacto da geração distribuída sobre a rede elétrica de distribuição devido à utilização de geradores fotovoltaicos. 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

UYAN, Mevlut. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 28, p.11-17, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>.

VOOGD, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. ISBN 085086 1063. Pion Limited, London.

