

Seleção de áreas aptas para implantação de usinas fotovoltaicas baseada em modelo de lógica Booleana-Fuzzy

Angela Gabrielly Pires Silva
Instituto Federal de Goiás - IFG/Campus Goiânia
Rua 75, nº46. Centro - CEP: 74055-110. Goiânia – GO, Brasil
angela.gabrielly@academico.ifg.edu.br

Abstract. Selecting suitable locations for installing a solar plant requires knowledge of economic, environmental and technical variables. In this sense, the present study used data of slope, drainage, urban area, elevation, highways, land use in specific forest and agriculture and conservation units. As a method, Boolean logic and fuzzy logic were used to identify suitable areas and, among them, satisfactory regions. The research is applied in the state of Goiás, and resulted in the selection of approximately 4027262.453 hectares, about 11.84% of the state territory is suitable for the installation of photovoltaic plants.

Palavras-chave: geographic information system, energies, solar plant, boolean logic, fuzzy logic, sistema de informação geográfica, energias, usina fotovoltaica, lógica booleana, lógica fuzzy.

1. Introdução

A demanda crescente por energia de qualidade para o desenvolvimento das atividades humanas desencadeou o consumo desordenado de recursos naturais, muitos deles não renováveis. Os principais recursos explorados e utilizados como fonte de energia no mundo são os derivados de petróleo. No Brasil, igualmente, os combustíveis fósseis representam a parcela mais significativa de fonte de energia primária. Apesar disso, o modelo elétrico nacional, baseado, na sua parcela mais significativa, em recursos hídricos, é considerado um dos mais limpos e renováveis do mundo (Suzigan, 2015).

No Brasil, grande parte da energia elétrica produzida no Brasil é gerada por usinas hidrelétricas isso se deve a abundância de rios em todo território. Segundo Silva (2006), cerca de 90% de toda energia gerada no país é fornecida por usinas hidrelétricas. Essa dependência do país nesse tipo de energia é preocupante, pois toda a economia e funcionamento dependem de eletricidade que está confiada a apenas um meio de produção. Alternativas renováveis e que podem complementar essa distribuição são as energias solares, eólicas e as de biomassa. Nesse tocante, a energia solar fotovoltaica possui papel significativo, visto que o Brasil possui condições climáticas favoráveis para a inserção desta fonte na sua matriz elétrica. Outro fator considerável é o fato de o País dispor de uma complexa e robusta rede de transmissão e distribuição, facilitando o intercâmbio de energia elétrica entre as regiões, onde as usinas hidrelétricas, térmicas, eólicas e solar se complementam (Peraza, 2013).

Para selecionar os locais ideais para novos planos de desenvolvimento, incluindo usinas de energia solar, é necessário desenvolver um conjunto de critérios e fatores para facilitar o processo de tomada de decisão. Para avaliar a adequação do uso e cobertura solo para a construção de campos fotovoltaicos são necessários dados climáticos, disponibilidade de linhas de transmissão, proximidade com rodovias e centros urbanos, entre outros.

A utilização de geotecnologias, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados aos dados climáticos locais, facilitam na escolha das áreas mais adequadas, mapeando os locais com maior potencial para implantação das usinas. Além disso, essas tecnologias de informações espaciais georreferenciadas podem ajudar a descartar locais restritos, com baixa aptidão climática ou que, por conta da falta de infraestrutura básica, torne o custo de geração de energia elétrica inviável (Carrión , 2008 ; Uyan , 2013; Sánchez-Lozano, et al., 2013).

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo identificar melhores áreas para a instalação de usinas fotovoltaicas no Estado de Goiás utilizando lógica booleana para remoção de regiões inaptas e lógica fuzzy para identificar quais áreas tem maior aptidão.

1.1 Área de estudo

Localizado na região Centro-Oeste do Brasil, Goiás é um Estado privilegiado em extensão territorial e recursos hídricos. Com uma área de 340.111,78 km², representando 4,0% do território nacional (Figura 1). Relacionando os aspectos físicos de Goiás, o clima do Estado é predominantemente tropical, com duas estações bem definidas, um período chuvoso e outro seco. No que concerne ao relevo, suas terras apresentam baixas amplitudes altimétricas em maior parte de seu território.

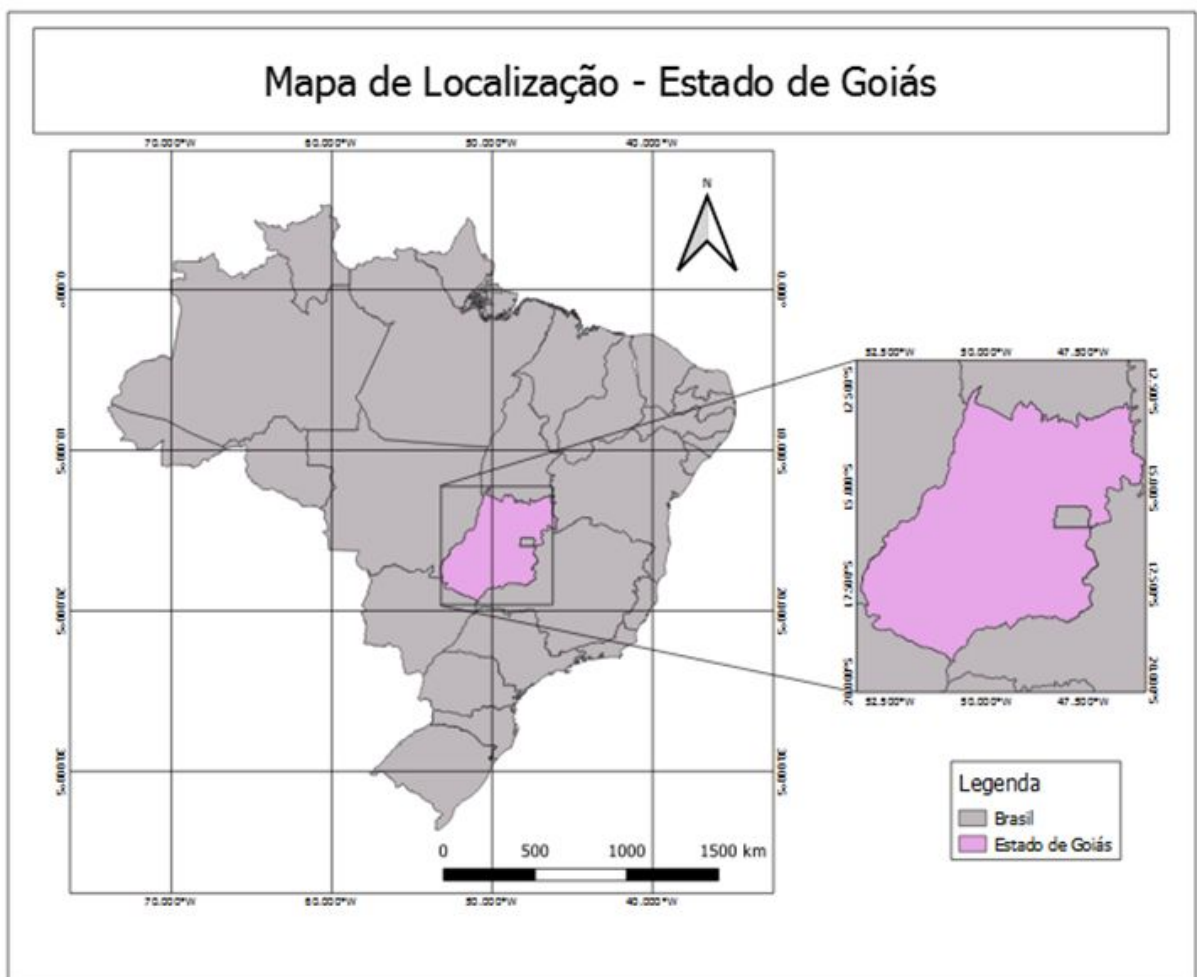


Figura 1. Localização do Estado de Goiás

2. Metodologia de Trabalho

Para o estudo de seleção de áreas adequadas para a instalação de usinas fotovoltaicas foram utilizados vários dados e critérios que farão parte do processo de decisão. Esses dados

estão divididos em três segmentos: fatores econômicos, fatores ambientais e fatores técnicos. Será utilizada a lógica booleana como forma de restringir locais considerados inapropriados segundo os critérios estabelecidos e posteriormente as áreas restritas serão removidas, as áreas aptas serão avaliadas pela lógica fuzzy para analisar quais regiões têm maior adequabilidade (Figura 2).

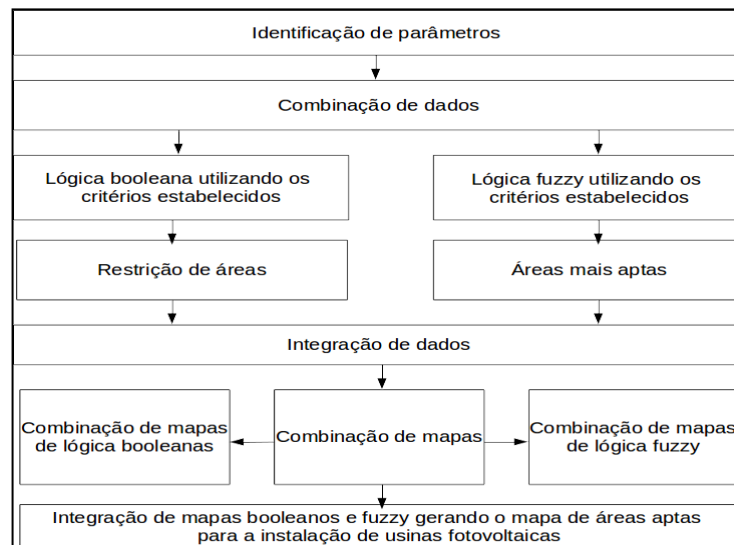


Figura 2. Fluxograma dos processos

2.1 Fatores Econômicos

Os dados contidos em fatores econômicos são distância de rodovias, distância das linhas de transmissão, distância de áreas urbanas, declividade e elevação. Os dados de rodovias, linhas de transmissão e áreas urbanas foram adquiridos em arquivo vetorial disponibilizados pelo Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás - SIEG (<http://www.sieg.go.gov.br/>), já a declividade foi gerada a partir do modelo digital de elevação em arquivo matricial disponibilizado pelo Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>).

É essencial que a usina esteja próxima das áreas residenciais e rodovias para que os gastos com transporte e distribuição de energia seja o menor possível. Outro fator importante é que quanto maior a proximidade das rodovias e dos centros urbanos mais provável a existência de uma rede de linha de transmissão reduzindo assim o custo para construção das mesmas além de existir menos perdas de energia no processo de distribuição. A elevação e declividade são outros fatores econômicos de grande relevância, dado que a construção em regiões montanhosas tem um custo maior de construção.

2.2 Fatores Ambientais

Os fatores ambientais são a distância de hidrografias, distância de unidades de conservação, distância de florestas e de plantações agrícolas. Os dados de hidrografia e unidades de conservação são disponibilizados em arquivos vetoriais pelo SIEG, enquanto a cobertura do solo foram adquiridas pela classificação feita pelo Projeto MapBiomass. Para o presente estudo levou-se em consideração apenas florestas e agricultura, foi feita a reclassificação do dado sendo que floresta (ID 1-9) e agricultura (ID 18-20) receberam o valor 1 e o restante das classes valor 0.

2.3 Fatores Técnicos

As condições climáticas são fatores técnicos que estão diretamente ligados à eficiência energética das usinas. Para isso foi calculada a radiação solar diária durante um ano no software SAGA utilizando como dado de entrada o modelo digital de elevação (MDE), disponibilizado pelo Topodata com resolução de 1 segundo de arco, reprojetoado para a Projeção cônica de Albers. O resultado gerado no SAGA é a radiação solar em $\text{KWh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, posteriormente convertido para $\text{Kwh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

2.4. Identificação das áreas restritas

Para a elaboração dos mapas de restrição foi utilizada a lógica booleana que Camara et al (2001) explicam que, a partir de uma finalidade definida, os mapas, compreendidos como planos de informação (evidências), são agrupados e o resultado é expresso de modo binário e dicotômico: “0” (hipótese não satisfeita) e “1” (hipótese satisfeita), não sendo possível a circunstância talvez. Os critérios utilizados estão descritos na Tabela 1, as áreas com alguma restrição serão eliminadas do processo, ou seja estarão inaptas para a instalação da usina.

A lógica booleana converte as informações em um raster binário com valores 0 e 1. Áreas restritas recebem o valor 0 enquanto áreas aptas para a instalação recebem o valor 1. A lógica booleana é aplicada para cada dado informado na Tabela 1 gerando como resultado vários mapas indicando os locais satisfatórios e não satisfatórios. Ao final, esses mapas são combinados com a operação lógica AND, que considera sempre o menor valor, gerando um mapa de áreas restritas e áreas adequadas para a implantação da usina elétrica fotovoltaica.

Tabela 1. Critérios estabelecidos para a lógica booleana

Parâmetros	Áreas não satisfatórias (valor=0)	Áreas satisfatórias (valor=1)
Distância de rodovias (m)	$1 \text{ km} > x > 10 \text{ km}$	$1 \text{ km} < x < 10 \text{ km}$
Distância de centros urbanos (m)	$2 \text{ km} > x > 20 \text{ km}$	$2 \text{ km} < x < 20 \text{ km}$
Declividade (%)	$X > 10\%$	$X < 10\%$
Elevação (m)	$X > 2000\text{m}$	$X < 2000\text{m}$
Distância de florestas e agricultura (m)	$X < 20 \text{ m}$	$X > 20 \text{ m}$
Distância de unidades de conservação (m)	$X < 300 \text{ m}$	$X < 300 \text{ m}$
Distância de hidrografia (m)	$500 \text{ m} > x > 20 \text{ km}$	$500 \text{ m} < x < 20 \text{ km}$

2.5 Identificação de locais com maior aptidão

Para avaliar as melhores áreas tidas como adequadas na lógica booleana foi utilizada a lógica fuzzy. A lógica fuzzy permite especificar o quanto um objeto satisfaz os critérios estabelecidos que diferentemente da lógica booleana, onde uma função é definida como verdadeira ou falsa, 0 e 1, o conjunto fuzzy é dado em um intervalo que varia entre 0 e 1. Para Burrough et al. (1992), a aproximação fuzzy é claramente mais flexível que os métodos booleanos para análise de aptidão das terras, porque a interseção booleana aceita apenas intervalos rígidos e muitas áreas são rejeitadas. A classificação fuzzy de uma variável contínua é claramente a melhor aproximação da realidade que a classificação booleana rígida. Os critérios e os tipos de gráficos utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na lógica fuzzy

Parâmetros	a	b	c	d	Tipo de gráfico
Distância de rodovias (m)	1000	3000	5000	288000	Trapezoidal
Distância de centros urbanos (m)	2000	6000	1000	323000	Trapezoidal
Declividade (%)	10	10	0	0	Linear descendente
Elevação (m)	1600	1600	200	200	Linear descendente
Distância de florestas e agricultura (m)	500	500	2000	2000	Linear ascendente
Distância de hidrografia (m)	500	2000	10000	281000	Trapezoidal
Radiação Solar (kWh.m ⁻² .dia ⁻¹)	3,2	3,2	7,5	7,5	Linear ascendente

A lógica fuzzy, a partir dos critérios estabelecidos, converteu as informações em um arquivo matricial com valores que variam entre 0 e 1, valores estes que significam o grau de aptidão da região em receber uma usina fotovoltaica em relação a sua condição. O processo resumido na Figura 3 terá como resultado um único raster que posteriormente será combinado com o resultado final obtido pela lógica booleana.

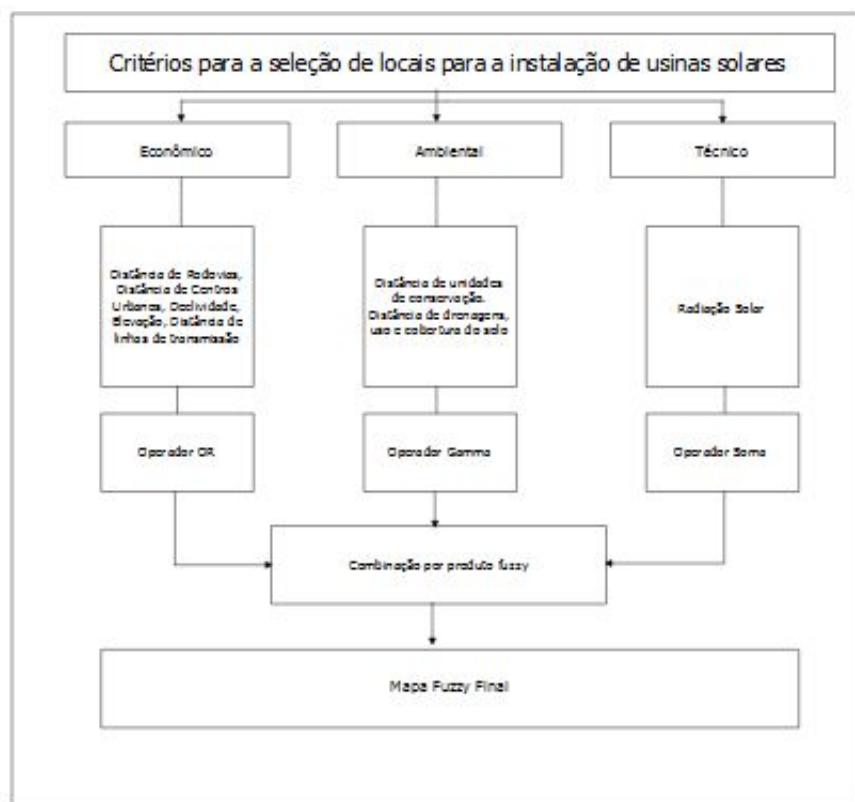


Figura 3. Fluxograma do modelo fuzzy

3. Resultados e Discussões

3.1. Lógica Booleana

O mapa de uso do solo é composto pelas florestas naturais e áreas de cultura anual e perene. Pela Figura 4 é possível notar uma grande área classificada como restrita na região sul do estado, onde o agronegócio é predominante. No norte goiano também há uma relevante área classificada como inapta, região correspondente ao Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros com fauna e flora pertencente ao bioma cerrado. A drenagem por ser ramificada e estar presente em todo o Estado foi também um agravante para a restrição de áreas. Já os mapas de unidade de conservação, elevação e linhas de transmissão apresentaram pouca ou nenhuma restrição. Os elementos que compõem o mapa de unidade de conservação são parques, unidades de uso sustentável e reservas particulares do patrimônio nacional, que no Estado são poucas.

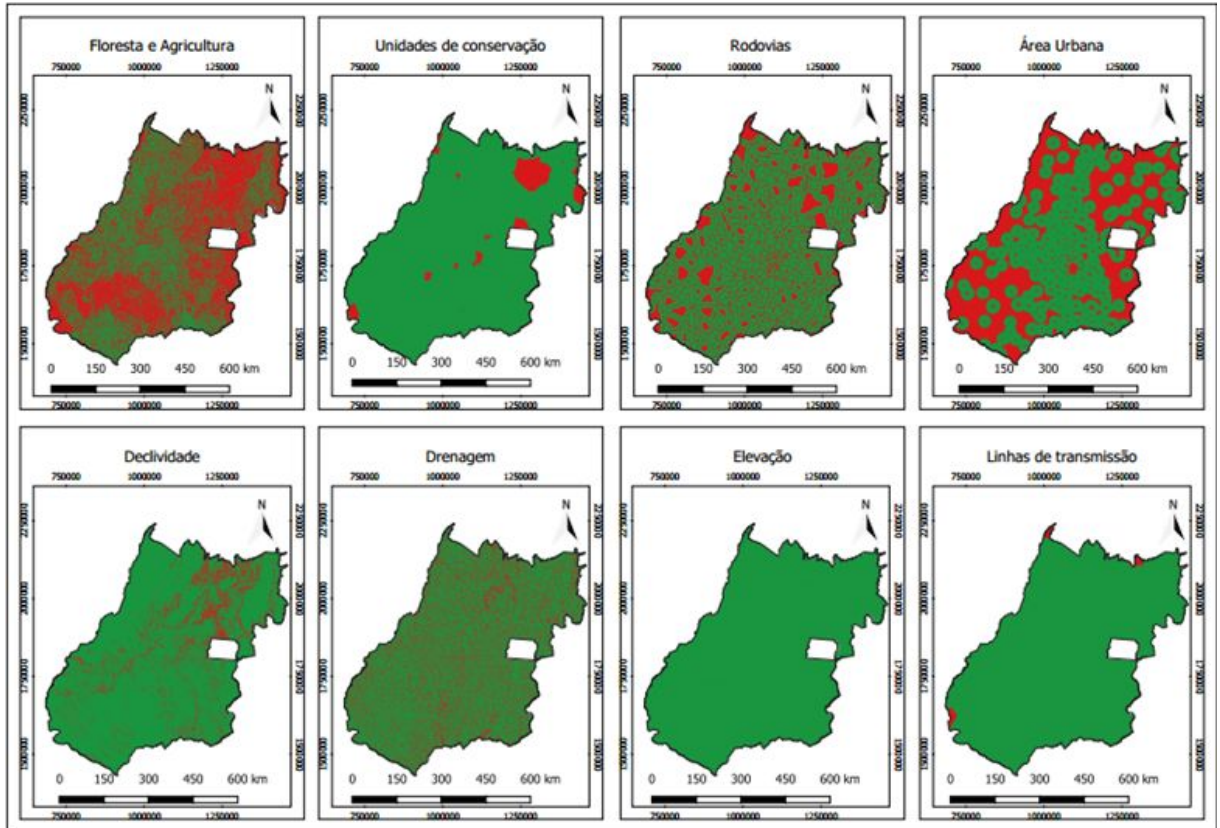


Figura 4. Mapas com restrições de área

3.2 Lógica Fuzzy

Baseado nos critérios dispostos na Tabela 2, os resultados gerados pela lógica fuzzy tiveram valores entre 0 e 1, indicando o quanto o objeto satisfaz as condições estabelecidas. Comparando a Figura 3 (resultado booleano) com a Figura 5 (resultado fuzzy) é possível perceber uma similaridade, pois onde a lógica booleana classificou como não satisfatório a lógica fuzzy classificou como menos satisfatório e, entre as áreas indicadas como aptas pelo booleano, o fuzzy apontou dentre as aptas quais as melhores.

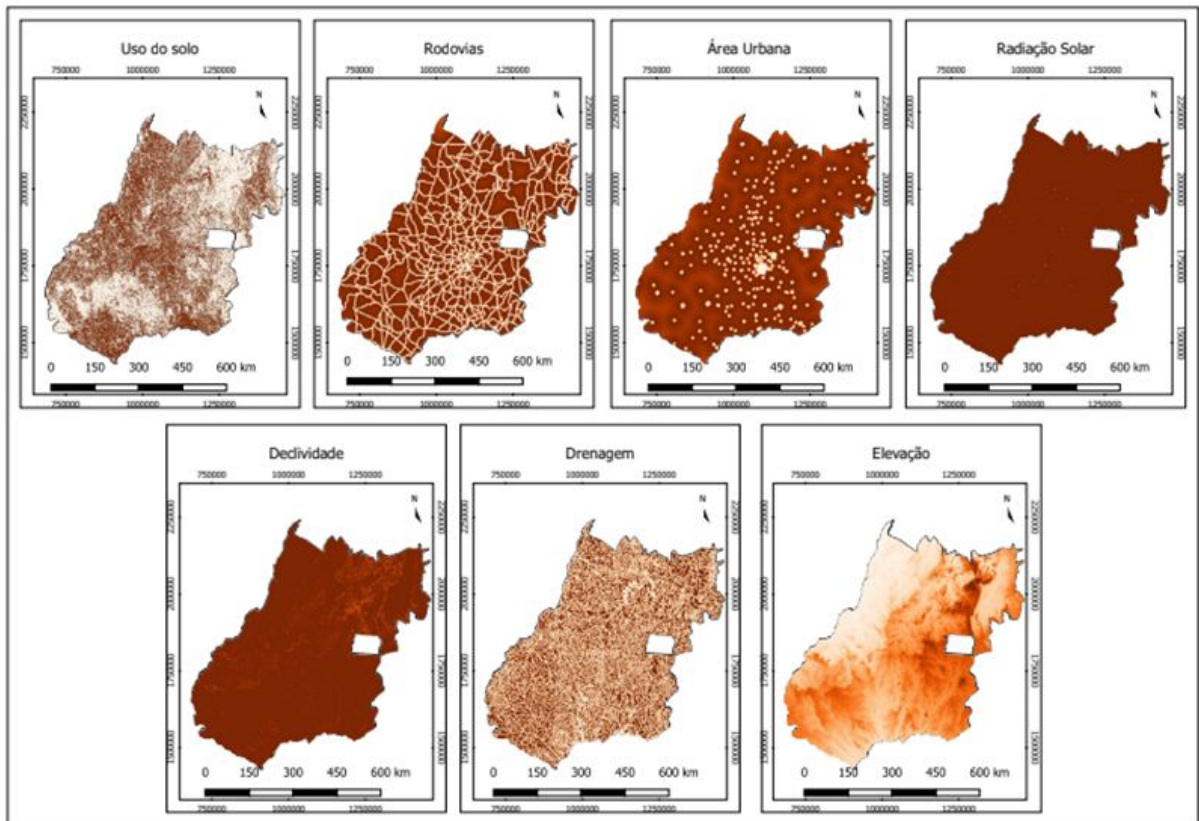


Figura 5. Representação dos locais mais adequados para instalação de usinas fotovoltaicas indicados pela lógica fuzzy

Assim como na lógica booleana, os mapas de uso e cobertura do solo e drenagem foram os que tiveram maiores áreas que apresentaram menos aptidão para a instalação da usina, enquanto os valores de radiação solar em todo o Estado foi satisfatória de acordo com os critérios estabelecidos. Os outros mapas apresentaram um grau de aptidão de grande relevância em todo o território estadual.

3.3. Integração Booleano-Fuzzy

As áreas adequadas extraídas da combinação de mapas booleanos foram integradas nas camadas rasterizadas dos mapas fuzzy pelo operador AND. O mapa final é apresentado na Figura 6. O mapa sugere melhores locais dentro das áreas aptas. A maioria das áreas satisfatórias estão localizadas no centro do Estado, em virtude da maior proximidade dos centros urbanos e rodovias e maior distância das restrições do uso e cobertura do solo e declividade, fatores estes que restringiram grandes áreas na região norte e sul do estado.

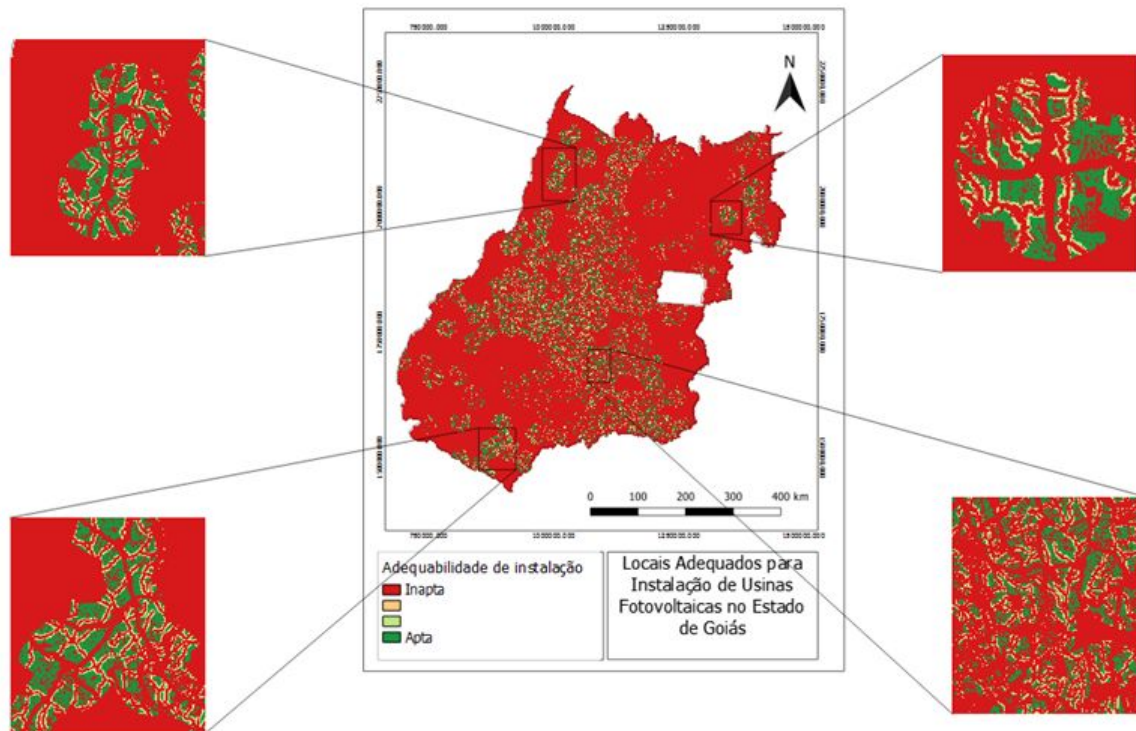


Figura 6. Locais adequados para a instalação de usinas fotovoltaicas resultantes da integração da lógica fuzzy e booleana

4. Conclusão

Para relacionar as investigações às situações da vida real, considerou-se as limitações climáticas, ambientais e técnicas na modelagem da adequação da terra nas análises. Embora grande parte das regiões Norte e Sul não tenham condições satisfatórias, o centro do Estado tem grande potencial para o uso da energia solar com a implantação de usinas fotovoltaicas.

Goiás possui aproximadamente 4.027.262,453 hectares aptos para a instalação desse tipo de usina, cerca de 11,84% da área total de seu território. Por ser privilegiado geograficamente, Goiás tem grande capacidade para a geração de energia solar, consequentemente, potencial para a instalação de usinas fotovoltaicas.

A lógica fuzzy para essa finalidade mostrou-se eficiente para a avaliação dos locais mais apropriados com base nos critérios selecionados. Outro diferencial foi o uso dos diferentes tipos de gráficos e operadores para a análise, tornando o resultado mais coerente e confiável. Obteve-se como resultado final regiões consideradas adequadas, porém não foi avaliado o potencial de produção de energia dessas regiões ou se é viável a implantação considerando a demanda de consumo.

Referências

Burrough, P. A., Macmillan, P. A., Van Deursen, W. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observation and topography. **Journal of Soil Science**, 43 (2), 193-210, 1992.

Câmara, G.; Moreira, F. R.; Barbosa, C.; Almeida Filho, R.; Bönisch, As técnicas de inferência geográfica. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos campos: INPE, 2001. P. 241-288.

Carrión, J. Arán. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 12, n. 9, p. 2358-2380, 2008.

Peraza, Danielle Goulart. **Estudo de viabilidade da instalação de usinas solares fotovoltaicas no estado do Rio Grande do Sul**. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2013

Projeto MapBiomas - Coleção 4 versão 1.3.4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 30 out. 2019 através do link:
<https://code.earthengine.google.com/ccf189be0d35d2c4e0e783575f4f05b3>

Sánchez-Lozano, Juan M. Geographical information systems (GIS) and multi-criteria decision making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: case study in south-eastern Spain. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 24, p. 544-556, 2013.

Silva, Neilton Fidelis. 1. **Aproveitamento do Potencial Eólico Brasileiro I**. COPPE/UFRJ II. Título (série). 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal Do Rio De Janeiro.

Suzigan, Kelly Rosana. **A transição para uma matriz energética limpa: os avanços na tecnologia solar**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2015.

Uyan, Mevlut. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.28, p. 11-17,2013.