

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS LAMARE MOREIRA ALVES

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS PARA USINAS FOTOVOLTAICAS  
CENTRALIZADAS EM GOIÁS: UMA ABORDAGEM ANALYTIC HIERARCHY  
PROCESS (AHP) INTEGRADA AO ARCGIS

CURITIBA

2023

LUCAS LAMARE MOREIRA ALVES

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS PARA USINAS FOTOVOLTAICAS  
CENTRALIZADAS EM GOIÁS: UMA ABORDAGEM ANALYTIC HIERARCHY  
PROCESS (AHP) INTEGRADA AO ARCGIS

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de MBA em Gestão Ambiental, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora/Professora: Profa. Msc. Michela Rossane Cavilha Scupino

CURITIBA

2023

## Identificação de Áreas Potenciais para Usinas Fotovoltaicas Centralizadas Em Goiás: uma abordagem *Analytic Hierarchy Process* (AHP) integrada ao Arcgis

Lucas Lamare Moreira Alves

### RESUMO

Este estudo apresenta uma análise detalhada do potencial para desenvolvimento de usinas fotovoltaicas (UFVs) no Estado de Goiás, Brasil. Utilizando uma abordagem multicritério combinada com processamento geoespacial, avaliou-se áreas adequadas para a instalação de UFVs, considerando aspectos geográficos, infraestruturais e ambientais. A variação do Índice de Irradiância Solar Global Horizontal (GHI) revelou um potencial significativo no nordeste de Goiás, embora a atual falta de infraestrutura de subestações na região destaque a necessidade de planejamento estratégico. A análise topográfica mostrou que 47,69% do território de Goiás é favorável para instalações fotovoltaicas, com áreas de baixa declividade e uso do solo predominantemente agrícola. Critérios de exclusão foram aplicados, respeitando unidades de conservação, terras indígenas e quilombolas. Os resultados, obtidos através da aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e mapeamento geoespacial no ArcGIS, indicam locais específicos que atendem a todos os critérios necessários para o desenvolvimento eficaz de UFVs. Este estudo não apenas identifica áreas promissoras para instalação de UFVs, mas também ressalta a importância de um planejamento energético que considere tanto o potencial técnico quanto os aspectos sociais e ambientais, fornecendo uma base para futuras decisões de planejamento e investimento no setor de energia renovável em Goiás.

Palavras-chave: 1. Sistemas de Informações Geográficas (SIG) 2. Usinas Fotovoltaicas 3. Análise multicritério 4. Planejamento energético 5. AHP

## **Identification of Potential Areas for Centralized Photovoltaic Plants in Goiás: an Analytic Hierarchy Process (AHP) Approach Integrated with ArcGIS**

Lucas Lamare Moreira Alves

### **ABSTRACT**

This study presents a detailed analysis of the potential for the development of photovoltaic power plants (PV plants) in the State of Goiás, Brazil. Using a multi-criteria approach combined with geospatial processing, suitable areas for the installation of PV plants were evaluated, considering geographical, infrastructural, and environmental aspects. The variation of the Global Horizontal Solar Irradiance (GHI) index revealed significant potential in the northeast of Goiás, although the current lack of substation infrastructure in the region highlights the need for strategic planning. The topographic analysis showed that 47.69% of the territory of Goiás is favorable for photovoltaic installations, with areas of low slope and predominantly agricultural land use. Exclusion criteria were applied, respecting conservation units, indigenous lands, and quilombola territories. The results, obtained through the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and geospatial mapping in ArcGIS, indicate specific locations that meet all the necessary criteria for the effective development of PV plants. This study not only identifies promising areas for the installation of PV plants but also emphasizes the importance of an energy planning that considers both technical potential and social and environmental aspects, providing a basis for future planning and investment decisions in the renewable energy sector in Goiás.

Keywords: 1. Geographic Information Systems (GIS) 2. Photovoltaic Power Plants 3. Multi-criteria Analysis 4. Energy Planning 5. AHP

## 1 INTRODUÇÃO

Em um cenário global, a demanda por energia vem crescendo exponencialmente, impulsionada por fatores como a urbanização, a industrialização e o crescimento populacional (Noorollahi et al., 2022). Esta tendência intensifica a necessidade de alternativas energéticas sustentáveis, e a energia renovável, que engloba fontes como solar, eólica e hidrelétrica, é considerada a principal fonte de energia sustentável do mundo (Alhammad et al., 2022).

Em 2015, as Nações Unidas reconheceram a importância da energia renovável ao adotar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visam, entre outros objetivos, erradicar a pobreza e proteger o planeta das mudanças climáticas (Alhammad et al., 2022). Este reconhecimento global reforça a urgência de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

Neste cenário, Goiás emerge como um território de potencial inestimável para a exploração da energia renovável, com um destaque particular para a energia solar. Este estudo concentra-se especificamente no potencial para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas centralizadas, em contraste com sistemas de geração distribuída, pois representam uma abordagem de larga escala.

Caracterizado por uma topografia predominantemente plana, onde 65% da superfície exibe uma baixa declividade e altitudes que não excedem 1.676 metros, Goiás se configura como um cenário ideal para a implantação de usinas fotovoltaicas (Goiás, 2019). Esta combinação de vastas áreas planas com excepcionais índices de irradiação solar estabelece Goiás como uma área estratégica para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas centralizadas.

No entanto, a seleção de locais adequados para instalação de UFV não é uma tarefa trivial, requer uma análise detalhada e abrangente das condições locais, considerando fatores geográficos, ambientais, meteorológicos e climatológicos. Por meio do uso de GIS e AHP, este estudo detalha critérios de inclusão e exclusão rigorosos, baseando-se em fatores geográficos, ambientais, e outros, para assegurar que os locais identificados como potenciais para instalação de UFVs atendam a padrões estritos de viabilidade e sustentabilidade. Ferramentas avançadas, como o sistema de informações geográficas (GIS) e abordagens de tomada de decisão multicritério, como o Processo Hierárquico Analítico (AHP), têm sido amplamente utilizadas para identificar e priorizar locais adequados para a instalação de novos empreendimentos (Elboshy et al., 2022; (Noorollahi et al., 2022).

Este estudo busca, portanto, desenvolver uma estrutura abrangente para determinar potenciais locais para instalação de UFV em Goiás, utilizando técnicas avançadas de GIS e AHP. Através desta abordagem, espera-se não apenas identificar locais ideais para a instalação de fazendas solares, mas também contribuir para a promoção da energia solar em Goiás e, por extensão, para o avanço das metas de sustentabilidade energética no Brasil. Adicionalmente, nas considerações finais deste estudo, será discutida a possibilidade de integrar novos parâmetros e critérios, demonstrando a adaptabilidade da nossa metodologia frente a diferentes objetivos e contextos de pesquisa futuros.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

O mercado fotovoltaico demonstrou um avanço notável entre 2011 e 2021, evidenciado por uma Taxa de Crescimento Anual Composta de 30% nas instalações acumuladas de Usinas Fotovoltaicas (UFV) (Phillips et al., 2017). Este crescimento no Brasil ganha destaque principalmente após a energia solar ser incorporada na matriz energética nacional e com o início dos leilões de energia solar, sinalizando uma mudança significativa no setor energético (Sampaio & González, 2017).

Os módulos fotovoltaicos, compostos por semicondutores, transformam luz solar em eletricidade, e ao serem conectados em larga escala, formam usinas fotovoltaicas com capacidades que variam significativamente (Martín-Martínez et al., 2019). Uma vantagem importante da tecnologia fotovoltaica é a menor geração de problemas ambientais em comparação com fontes convencionais, como as que utilizam combustíveis fósseis (Sampaio & González, 2017).

Recentemente, as usinas solares flutuantes têm emergido como uma inovação notável no campo da energia fotovoltaica, mas ainda não é popularizado no Brasil. Mas já é de conhecimento que a instalação desses painéis traz benefícios como a preservação de terras valiosas e uma eficiência energética ampliada devido à menor temperatura sob os painéis, em comparação com sistemas instalados em terra (Sampaio & González, 2017).

O processo de avaliação de locais para usinas fotovoltaicas envolve uma análise complexa de vários fatores. Esses incluem irradiação solar, valor do terreno, inclinação, aspecto e sombreamento, os quais variam conforme a localização geográfica e a infraestrutura técnico-econômica da área (Habib et al., 2020). Usar dados de irradiação Solar (RS) na escolha de locais para grandes projetos

fotovoltaicos é um passo crucial para identificar locais adequados, economizando tempo, dinheiro e esforços, além de aumentar a eficiência da energia solar e promover desenvolvimentos futuros de infraestrutura (Habib et al., 2020).

Nesse contexto, o Processo Hierárquico Analítico (AHP) é uma ferramenta matemática essencial para a análise de decisões complexas envolvendo múltiplos critérios. Este método permite a consideração tanto de atributos qualitativos quanto quantitativos, fundamentais no contexto da seleção de locais para UFVs (Kurttila et al., 2000).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

Goiás é o sétimo maior estado do Brasil, localizado na região Centro-Oeste, com vegetação predominante do Cerrado, clima tropical, caracterizado por verões bem chuvosos e invernos secos (Goiás, 2019). O seu território apresenta baixa declividade, 65% da superfície é considerada plana, são os chamados chapadões com elevações que não ultrapassam 1676 metros acima do nível do mar, o que favorece a agricultura e pecuária (Goiás, 2019).

Em relação aos recursos solares, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2017) indica que o estado possui um GHI médio de 1935,56 kWh/m<sup>2</sup>/ano, com a menor média mensal no mês de junho, equivalente a 1679,47 kWh/m<sup>2</sup>/ano e a maior no mês de fevereiro, equivalente a 2075,89 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A definição clara dos critérios de inclusão e exclusão é essencial para identificar áreas potenciais para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas centralizadas. Este enfoque permite uma análise direcionada que reflete as especificidades das usinas de grande escala, diferenciando-as da geração distribuída, que envolve a instalação de sistemas fotovoltaicos em pequena escala em residências ou negócios.

Em relação à estrutura de energia, os dados extraídos de WEBMAP EPE (EPE, n.d.) apontam que o estado de Goiás conta atualmente com aproximadamente 12.382 km de linhas de transmissão que variam entre 230 kV e 800 kV, além disso estão previstos mais 994 km para entrar em operação até 2030. Em relação às Subestações de Energia em operação no Sistema Interligado Nacional, o estado conta atualmente com 35, com mais 4 previstas para entrar em operação até 2028.

Dentro desse contexto geográfico, climático, e infraestrutura existente e planejada, o estado possui amplas áreas aptas para instalação de UFV's,

consolidando-se como um local estratégico para novos investimentos no setor energético.

### 3.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Vários critérios foram estabelecidos para determinar a viabilidade e localização de potenciais áreas para instalação de UFVs, considerando a realidade do estado de Goiás. Estes critérios ajudam não só a garantir a eficiência energética dos equipamentos, mas também a sustentabilidade e viabilidade econômica dos projetos.

#### **Irradiação solar**

A irradiação solar é considerada o parâmetro mais importante na previsão do desempenho de sistemas de energia renovável, particularmente no dimensionamento de sistemas de energia fotovoltaica (UFV) (Sabziparvar & Shetaee, 2007). Para projetar e avaliar economicamente a instalação de uma UFV, é crucial medir a irradiação solar na área, pois seu aumento melhora a performance da usina, e com base nesse valor, o local ideal pode ser determinado usando o GHI anual (Elboshy et al., 2022).

#### **Distância para subestação de energia**

A proximidade a serviços públicos e linhas de transmissão elétrica reduz custos de infraestrutura e impactos ambientais, além de diminuir os elevados gastos com linhas e minimizar perdas de potência na transmissão (Al Garni & Awasthi, 2017). A distância ótima das subestações de energia para esse estudo será considerada entre 0 e 15 km.

#### **Distância para linhas de transmissão**

Em muitos casos, o seccionamento de uma linha existente pode ser mais econômico do que a construção de uma nova linha de transmissão, especialmente se a distância da nova área à linha existente for curta. Diante disso, a distância ótima das linhas de transmissão de energia para esse estudo será considerada entre 0 e 10 km.

#### **Uso e cobertura do solo**

A escolha do uso e cobertura do solo influencia diretamente os custos de implantação de usinas fotovoltaicas, onde terrenos com vegetação densa ou características especiais podem demandar maior supressão e preparo do solo, elevando os custos de construção e licenciamento ambiental. Por outro lado, áreas com uso do solo menos complexo podem facilitar o processo de licenciamento e reduzir despesas, tornando a instalação mais econômica. Para esse estudo foram

considerados três classes da melhor para a pior, agrícola, pecuária, silvicultura e todas as outras.

### **Declividade**

A inclinação do terreno é um parâmetro crucial na avaliação da viabilidade e dos custos de projetos solares, afetando significativamente tanto as usinas solares de concentração, que exigem terrenos planos, quanto os parques fotovoltaicos (Alami Merrouni et al., 2016). Portanto, todos os estudos de viabilidade para instalações solares devem considerar cuidadosamente a inclinação do terreno. Para esse estudo foi considerado áreas com declividade menor que 12%

### **3.3 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO**

Para garantir a viabilidade e sustentabilidade dos projetos de energia solar, determinadas áreas são designadas como inadequadas por razões legais e técnicas. Foram utilizados os seguintes critérios de exclusão:

#### **Unidades de Conservação – UC**

Unidades de Conservação são espaços territoriais que têm como objetivo a conservação dos recursos ambientais, compreendendo a preservação, manutenção, utilização sustentável, a restauração e a recuperação do ambiente natural, para gerar benefícios sustentáveis para às atuais gerações, (Brasil, 2000). Conforme a Resolução CONAMA 428/2010, para UCs sem um Plano de Manejo instituído, é necessário considerar uma zona de amortecimento de 3 km para o licenciamento ambiental. Embora não proíba explicitamente empreendimento nesse raio, ela pode criar obstáculos que podem dificultar o andamento do projeto, assim, para esse estudo, as UCs e seus buffers de 3 km serão excluídos.

#### **Terras Indígenas e Quilombolas**

Territórios Indígenas e Quilombolas são reconhecidos pelo Decreto nº 6.040/2007 como espaços necessários a reprodução cultural, social e econômica desses povos e comunidades tradicionais. A Portaria Interministerial nº 60/2015 estabeleceu procedimentos específicos nos processos de licenciamento ambiental de atividade ou empreendimento que estejam dentro dos seguintes limites:

TABELA 1 – LIMITES ESTABELECIDOS PARA INTERVENÇÕES EM TERRAS INDÍGENAS E TERRAS QUILOMBOLAS DURANTE O LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Tipologia	Distância (km)	
	Amazônia Legal	Demais Regiões
Ferrovias	10	5
Dutos	5	3
Linhas de Transmissão	8	5
Rodovias	40	10
Empreendimentos pontuais	10	8
Aproveitamento hidrelétricos	40 km ou reservatório acrescido de 20 km à jusante	15 km ou reservatório acrescido de 20 km à jusante

FONTE: BRASIL (2015)

Dado que o estado de Goiás não pertence à Amazônia Legal e UFVs são consideradas “empreendimentos pontuais”, é necessário considerar um raio de impacto de 8 km. Mais uma vez, embora a portaria não proíba empreendimento nesse raio, o processo de licenciamento ambiental exige uma abordagem detalhada, incluindo estudos específicos e consultas prévias, livres e informadas com as comunidades afetadas, conforme estipulado na Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT). Por essas razões, as terras indígenas e quilombolas, junto com seus raios de 8 km, serão excluídas deste estudo.

### 3.4 COLETA DE DADOS

A coleta de dados é fundamental para a condução e validade da pesquisa. Os padrões estabelecidos neste estudo exigem a coleta de informações de diversas fontes para garantir uma abordagem abrangente e precisa.

QUADRO 1 – FONTES DE DADO POR CRITÉRIO/SUBCRITÉRIO

CrITÉrio/SubcrITÉrio	Fonte	Tipo	Ano
Iradiação Solar	INPE	Vetor	2017
Linha de Transmissão	EPE	Vetor	2023
Subestação de Energia	EPE	Vetor	2023
Uso do Solo	MapBiomias	Raster	2022
Altimetria	SIGA - GO	Raster	2022
Unidades de Conservação Federais	MMA	Vetor	2020
Unidades de Conservação Estaduais	SIGA – GO	Vetor	2020
Terras Indígenas	FUNAI	Vetor	2023
Territórios Quilombolas	INCRA	Vetor	2023

FONTE: Elaboração própria (2023)

Os dados coletados passaram por um processo de revisão e processamento no ambiente ArcGIS. Esta etapa inclui verificar a consistência das informações, ajustar projeções e *datum* e fazer quaisquer outras correções necessárias para garantir precisão e aplicabilidade à pesquisa.

### 3.5 ANÁLISE MULTICRITÉRIO COM AHP

A análise multicritério com o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) constitui uma etapa fundamental do estudo, permitindo uma organização lógica e sistemática dos critérios e subcritérios no contexto do desenvolvimento do trabalho no estado de Goiás. A hierarquia foi estabelecida partindo do objetivo principal, progredindo para os critérios e subcritérios, garantindo uma análise estruturada e coesa.

Primeiramente, definimos a hierarquia dos critérios e subcritérios relevantes ao estudo. Esta estruturação foi baseada em uma análise detalhada do objetivo principal do projeto, desdobrando-se nos critérios e subcritérios pertinentes.

QUADRO 2 – ESTRUTURAÇÃO HIERÁRQUICA DOS CRITÉRIOS/SUBCRITÉRIOS

Critério	Subcritério	P	Classificação	Parâmetro
Irradiação Solar	Faixas de irradiação solar	3	Alta	>2000 kWh/m2.ano
		2	Média	1950 – 2000 kWh/m2.ano
		1	Baixa	1900 – 1950 kWh/m2.ano
		0	Muito Baixa	< 1900 kWh/m2.ano
Declividade	Faixas de declividade	3	Plana	< 3%
		2	Suave ondulado	3% - 8%
		1	Ondulado	8% - 12%
		0	Áreas impróprias	>12%
Linhas de Transmissão	Distância para linhas de transmissão	3	Próximo	< 2km
		2	Média distância	2 – 5 km
		1	Distante	5 – 10 km
		0	Muito distante	> 10 km
Subestação de Energia	Distância para subestação de energia	3	Próximo	< 5km
		2	Média distância	5 – 10 km
		1	Distante	10 – 15 km
		0	Muito distante	> 15 km
Uso e cobertura do solo	Categorias	3	Agricultura	
		2	Pasto	
		1	Silvicultura	
		0	Demais áreas	

FONTE: Elaboração própria (2023)

A atribuição dos pesos dos critérios é uma etapa crucial para definir a importância de cada um no mapeamento final. Especialistas do mercado de energia foram convidados a participar de um questionário, onde lhes foi solicitado comparar os critérios em pares, avaliando a importância relativa de um em relação ao outro. Para isso foi utilizado a escala fundamental de Saaty para avaliar essas importâncias relativas.

QUADRO 3 – ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY

1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância essencial ou forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra
7	Importância muito forte ou demonstrada	A evidência favorece uma atividade em relação à outra
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os acima	Quando se procura uma condição de compromisso entre as duas definições

FONTE: Saaty (1980)

Conforme a metodologia de (Saaty, 1980), foi elaborada uma matriz de comparação par-a-par com base nas respostas do questionário aplicado aos especialistas. Cada elemento desta matriz representa a relação de importância entre dois critérios específicos.

TABELA 2 – ESTRUTURA DE COMPARAÇÕES PARITÁRIAS USANDO A ESCALA DE SAATY

<b>Critérios</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>A</b>	1	A/B	A/C	A/D	A/E
<b>B</b>	B/A	1	B/C	B/D	B/E
<b>C</b>	C/A	C/B	1	C/D	C/E
<b>D</b>	D/A	D/B	D/C	1	D/E
<b>E</b>	E/A	E/B	E/C	E/D	1

Após a elaboração da matriz, foi realizada sua normalização, onde cada elemento da matriz foi dividido pela soma dos valores de sua respectiva coluna, garantindo que a soma de cada coluna seja igual a 1. Em seguida, calculou-se a média dos valores normalizados para cada linha da matriz, resultando em uma representação numérica do peso de cada critério em relação aos outros.

Avaliar a consistência dos julgamentos é essencial para assegurar a lógica e a coerência das decisões tomadas durante a comparação dos pares. Utilizou-se a Razão de Consistência (RC) para esta avaliação e ela sendo menor que 0,1 (10%) indica que os cálculos estão consistentes. As fórmulas para o cálculo da RC são:

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

Onde:

- $\lambda_{max}$  é o maior autovalor da matriz, obtido pela média das divisões entre média da nova matriz e a média da matriz normalizada.
- $n$  é a ordem da matriz
- *ICA* – Índice de Consistência Aleatória

Este processo, seguindo os princípios estabelecidos por Saaty, assegura uma análise multicritério confiável, adequada ao contexto do estudo realizado no estado de Goiás

### 3.6 PROCESSAMENTO GEOESPACIAL

A etapa subsequente ao cálculo dos pesos dos critérios pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) envolveu o processamento desses dados no *software* ArcGIS. Este software é uma ferramenta avançada de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que oferece funcionalidades para a análise espacial, incluindo a ferramenta "*Weighted Overlay*", essencial para este estudo.

Os dados geoespaciais correspondentes a cada critério e subcritério foram preparados, incluindo as informações citadas na seção anterior. Cada conjunto de dados foi convertido em camadas raster dentro do ArcGIS, formatadas para a análise de sobreposição ponderada.

A ferramenta permitiu combinar as múltiplas camadas *raster*, cada um referente a um critério, com pesos atribuídos conforme a sua importância atribuída de acordo com a Análise Multicritério com AHP. Esta abordagem permitiu uma análise espacial detalhada gerando o mapeamento de áreas adequadas, levando em conta múltiplos critérios e variáveis.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

A análise revelou uma leve variação no Índice de Irradiação Solar Global (GHI) em Goiás, com média mínima de 1836,68 kWh/m<sup>2</sup> e máxima de 2065,17 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que a região que apresenta os melhores valores é o nordeste de Goiás, sugerindo um potencial elevado para a geração de energia solar nessas áreas. Os critérios de inclusão, tais como a média do GHI e a declividade do terreno, foram definidos com o objetivo de garantir que apenas as áreas com maior potencial solar e menor impacto ambiental fossem consideradas adequadas. Esta seleção criteriosa,

baseada em pesos e tratativas metodológicas específicas, assegura que os resultados obtidos refletem exclusivamente as condições estabelecidas.

De forma geral, a região central concentra a maior parte das SEs, fato que pode ser justificado pela presença do maior centro consumidor do estado, a capital, Goiânia. Cabe destacar também que a região oeste não possui SE vinculadas ao SIN, portanto atualmente não representam boas áreas para investimento.

Ainda falando das infraestruturas de energia, o estudo constatou a presença de aproximadamente 12.422,8 em operação atualmente, variando entre 230 kV e 800 kV. Além disso, estão previstos mais 440 km de novas linhas de transmissão até 2030, o que indica novas áreas de prospecção para empreendimentos que podem fazer seccionamento em LTs.

A análise topográfica indicou que 47,69% do território de Goiás apresenta uma declividade mínima favorável para a instalação de usinas fotovoltaicas, até 8%. As áreas com declividade mais adequada estão predominantemente localizadas nas regiões sul, sudoeste e nordeste, além da divisa com Mato Grosso, oferecendo condições ideais para o desenvolvimento de projetos de energia solar.

Foi observado também que 16,08% da cobertura do solo em Goiás é classificada como área de uso agrícola, enquanto 37,98% são cobertos por pecuária. As áreas destinadas à agricultura, especialmente nas regiões sul e sudoeste, mostraram-se particularmente propícias para o desenvolvimento de projetos de energia solar, considerando a dualidade de uso do solo para agricultura e geração de energia.

A Figura 4.1 apresenta o resultado final de todos os critérios de seleção, classificados de acordo com o seu peso

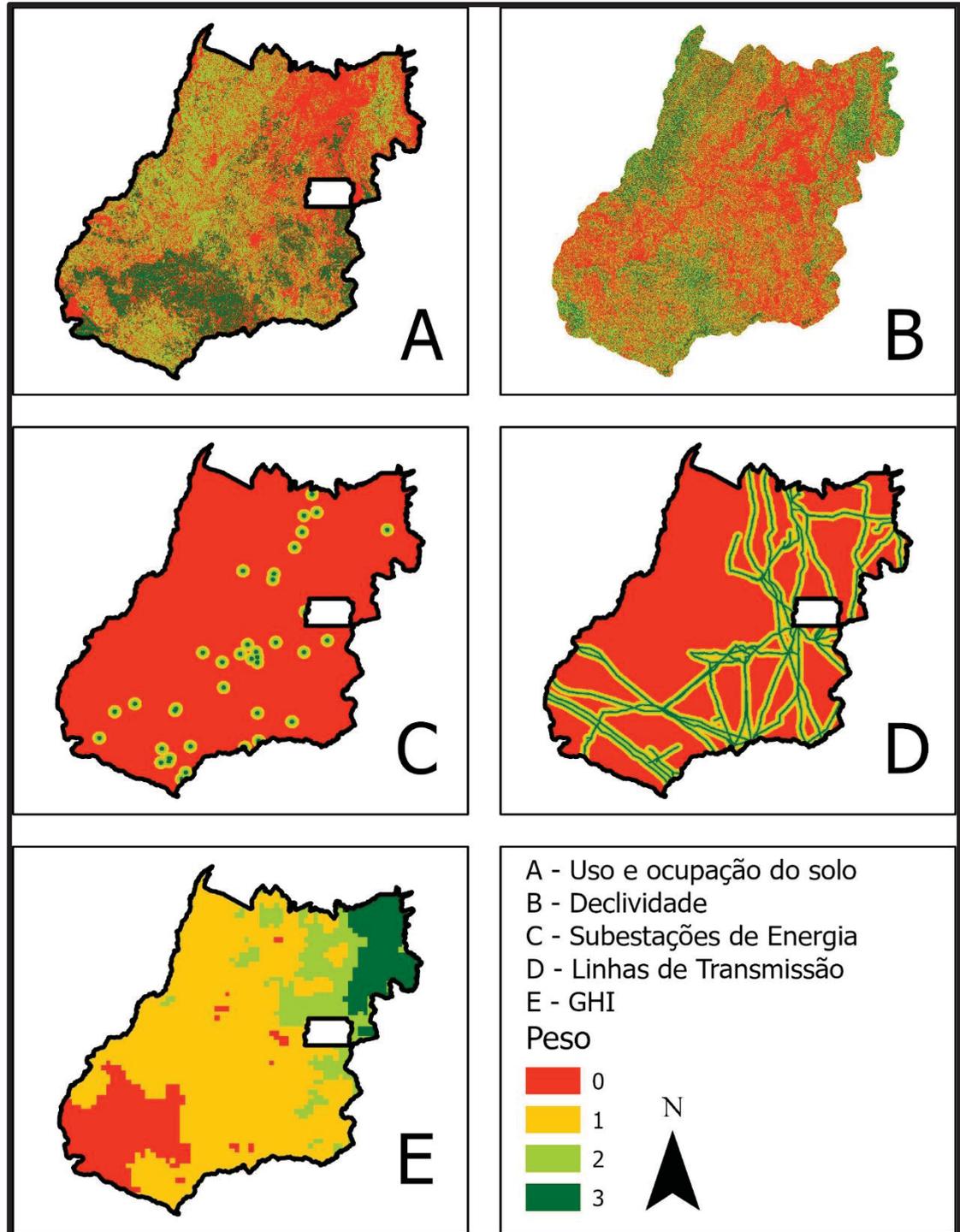


Figura 4.1 - Mapas dos critérios de seleção.

#### 4.2 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Os critérios de exclusão aqui detalhados incluem áreas quilombolas, terras indígenas e unidades de conservação, estas áreas são protegidas por legislações específicas conforme apresentado na seção de metodologia. A seguir, é apresentado

os resultados encontrados para cada um desses critérios de exclusão, baseados na análise realizada.

No contexto do estudo, análise identificou um total de 08 áreas quilombolas em Goiás, sendo o maior localizado no nordeste do estado, na divisa com Tocantins, o Kalunga. Já em relação às Terras Indígenas, foram identificadas seis, totalizando 37.829,6 ha, sendo a maior localizada no norte do estado, nos municípios de Colinas do Sul e Minaçu, a Avá-Canoeiro. Para ambos os critérios foram desconsiderados o buffer de 8 km.

As Unidades de Conservação, que incluem as federais, estaduais e municipais, foram igualmente consideradas como critérios de exclusão. O estudo apontou a existência de 90 unidades de conservação em Goiás, abrangendo uma área total de 2.079.295,2 hectares. Para esse critério, foi desconsiderado 3 km ao redor.

A Figura 4.2 apresenta o mapa com os três critérios de exclusão, além dos limites desconsiderados.

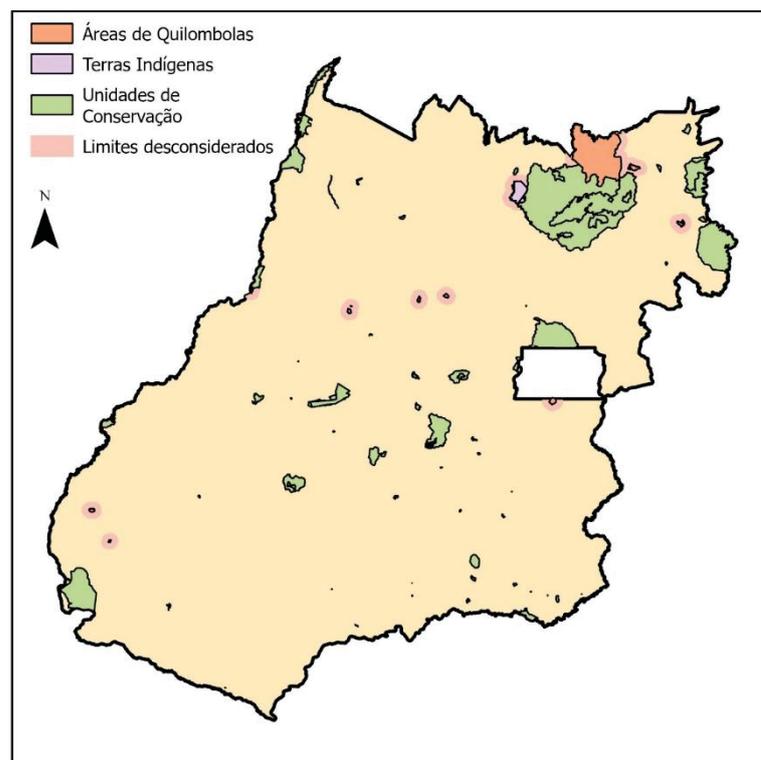


Figura 4.2 - Mapa com as áreas de exclusão.

### 4.3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Após a aplicação de um questionário com 10 especialistas da área, chegamos aos seguintes resultados cruciais para a avaliação da consistência da matriz de comparação par-a-par utilizada no estudo.

CRITÉRIOS	RS	DSE	DLT	UCS	D
Irradiação Solar (RS)	1,00	3,05	3,05	5,20	3,12
Distância para Subestação de Energia (DSE)	0,33	1,00	3,60	4,72	2,77
Distância para Linha de Transmissão (DLT)	0,33	0,28	1,00	3,52	2,25
Uso e Cobertura do Solo (UCS)	0,19	0,21	0,28	1,00	0,49
Declividade (D)	0,32	0,36	0,44	2,05	1,00
<b>SOMA DAS COLUNAS</b>	<b>2,17</b>	<b>4,90</b>	<b>8,38</b>	<b>16,49</b>	<b>9,63</b>

Em seguida a matriz foi normalizada dividindo cada elemento pela soma total da coluna correspondente, e já foi feito o cálculo da média dos valores em cada linha da matriz normalizada para obter o vetor de peso: A matriz normalizada com os correspondentes pesos se encontra abaixo:

CRITÉRIOS	RS	DSE	DLT	UCS	D	PESO
Irradiação Solar (RS)	0,461	0,623	0,364	0,315	0,324	<b>41,75%</b>
Distância para Subestação de Energia (DSE)	0,151	0,204	0,430	0,286	0,288	<b>27,17%</b>
Distância para Linha de Transmissão (DLT)	0,151	0,057	0,119	0,213	0,234	<b>15,49%</b>
Uso e Cobertura do Solo (UCS)	0,089	0,043	0,034	0,061	0,051	<b>5,54%</b>
Declividade (D)	0,148	0,074	0,053	0,124	0,104	<b>10,05%</b>

De posse desses resultados, foi calculado a estimativa do maior autovalor ( $\lambda_{\max}$ ) através da média dos quocientes dos elementos do vetor resultante da multiplicação da matriz original pelo vetor peso

$$\lambda_{\max} = 5,29$$

Já os valores calculados para Índice de Consistência (CI) e Razão de Consistência (CR) foram:

$$CI = 0,072$$

$$CR = 0,065$$

Com um CR de 0,065, que é inferior ao limite de aceitabilidade de 0,1, a matriz é considerada consistente. Este resultado valida as comparações relativas feitas entre os critérios, assegurando a confiabilidade das análises e conclusões derivadas deste estudo.

#### 4.4 PROCESSAMENTO GEOSPACIAL

No processamento geospacial, cada camada foi ponderada de acordo com os pesos obtidos pela análise multicritério, refletindo a importância relativa de cada critério na determinação das áreas mais adequadas para a instalação de usinas fotovoltaicas.

Posteriormente, as áreas identificadas como inapropriadas, incluindo áreas quilombolas, terras indígenas e unidades de conservação foram excluídas da análise. Este passo assegura que o desenvolvimento proposto esteja alinhado com a legislação vigente.

O mapa final apresenta uma classificação das áreas em Goiás, variando de impróprias, média, boas até muito boas. As áreas com maior adequação são indicadas em verde e estão representadas por pequenas manchas no mapa, enquanto as áreas impróprias são mostradas em rosa. As áreas excluídas da análise estão claramente demarcadas, proporcionando uma visualização imediata das regiões que não são viáveis para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas (Figura 4.3).

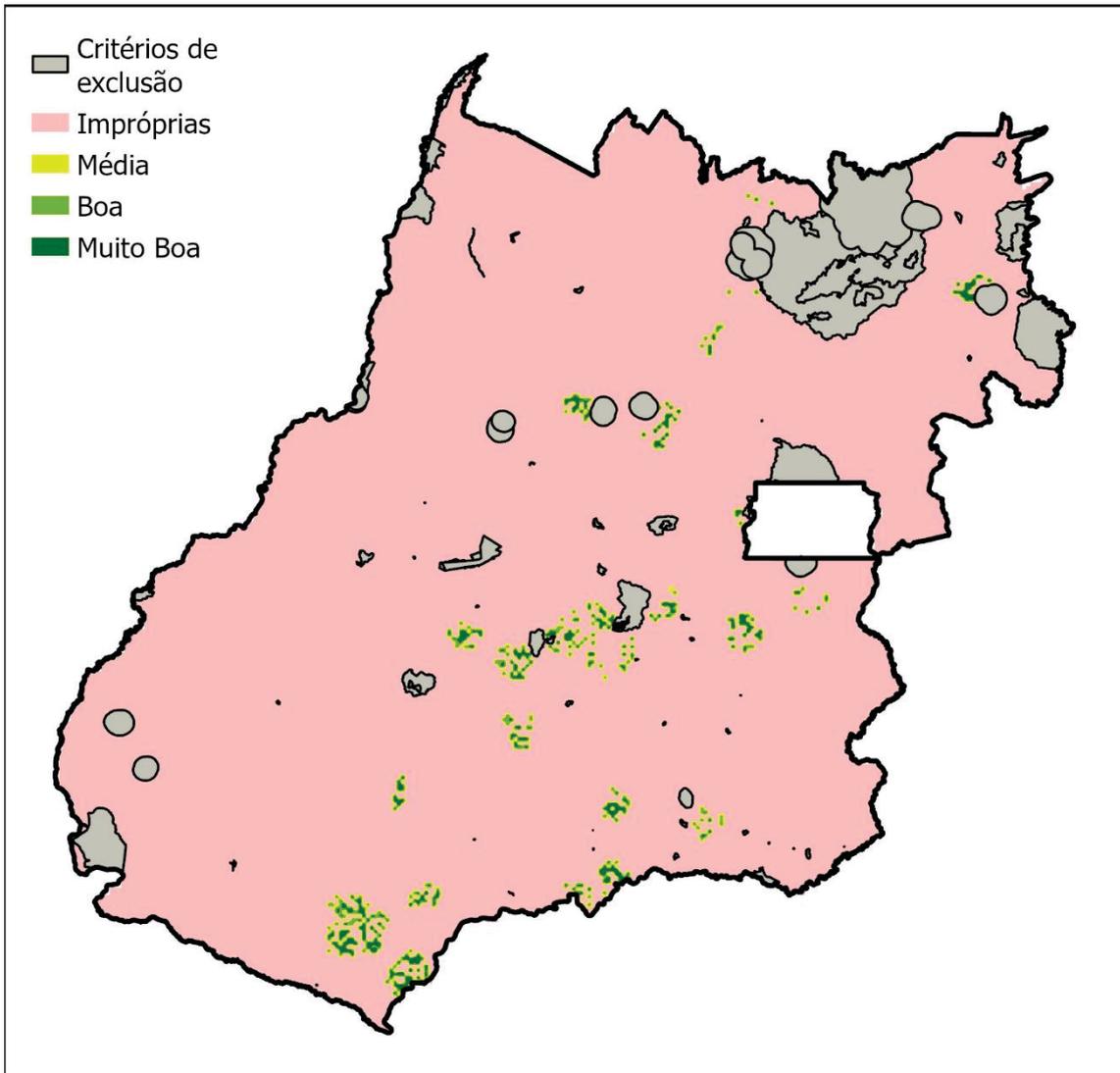


Figura 4.3 - Mapa final.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo oferecem uma visão abrangente sobre o potencial de desenvolvimento de usinas fotovoltaicas em Goiás. É importante salientar que, embora este estudo tenha adotado critérios específicos de avaliação e exclusão, a inclusão de outros parâmetros, conforme a finalidade e o contexto do estudo, pode

levar a diferentes conclusões. Tal flexibilidade na metodologia permite a adaptação do modelo de análise a diversas necessidades e objetivos de pesquisa, ampliando assim o espectro de possibilidades para o planejamento energético em Goiás e outras regiões.

A variação do Índice de Irradiância Solar Global Horizontal (GHI, do inglês *Global Horizontal Irradiance*) em Goiás indica que, especialmente no nordeste do estado, existe um potencial significativo para a geração de energia solar. Este trabalho concentrou-se no potencial para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas centralizadas, distinguindo-se deliberadamente da geração distribuída, para explorar a viabilidade de instalações em larga escala que possam contribuir de forma substancial para a matriz energética renovável do estado.

A metodologia aplicada, envolvendo critérios de inclusão e exclusão detalhadamente definidos, oferece uma base sólida para futuras decisões de planejamento e investimento no setor de energia renovável, promovendo uma abordagem sustentável e responsável para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas.

É importante destacar que, embora a análise de critérios isolados possa sugerir várias áreas como potencialmente adequadas, a realidade é que a combinação de fatores que determina o verdadeiro potencial de uma área para a instalação de UFVs. Esta complexidade é refletida no mapa final, onde as áreas com maior adequação são representadas por pequenas manchas, indicando que apenas locais específicos atendem a todos os critérios necessários para o desenvolvimento eficaz de usinas fotovoltaicas.

Além disso, é crucial reconhecer que os critérios de avaliação e exclusão utilizados nesta análise podem variar de acordo com os objetivos de diferentes pesquisas. O essencial é que a metodologia adotada esteja alinhada com as estratégias empresariais para a prospecção de novas áreas para instalação de UFVs. Esta abordagem direcionada não apenas aumenta a eficácia do processo, mas também economiza tempo e recursos financeiros, garantindo que os investimentos em energia solar sejam feitos nas áreas mais promissoras.

O mapa final ilustra as áreas classificadas de acordo com sua adequação para o desenvolvimento de UFVs. As áreas com maior potencial estão dispersas em pequenas manchas verdes, enquanto as áreas impróprias e excluídas são facilmente

identificáveis, garantindo uma visualização eficaz do potencial de energia solar em Goiás.

Embora a análise tenha adotado critérios específicos de avaliação e exclusão, é fundamental reconhecer a possibilidade de integrar novos parâmetros conforme as necessidades específicas de futuras investigações, adaptando-se assim às variáveis que podem influenciar tanto em projetos de usinas centralizadas quanto em iniciativas de geração distribuída. Este estudo, portanto, não apenas identifica as áreas mais promissoras para a instalação de UFVs em Goiás, mas também destaca a importância de um planejamento energético que considere tanto o potencial técnico quanto os aspectos sociais e ambientais. Os resultados aqui apresentados podem servir como base para futuras decisões de planejamento e investimento no setor de energia renovável do estado.

## REFERÊNCIAS

- Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Alami Merrouni, A., Mezrhab, A., & Mezrhab, A. (2016). PV sites suitability analysis in the Eastern region of Morocco. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 18, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.09.006>
- Alhammad, A., Sun, Q. (Chayn), & Tao, Y. (2022). Optimal Solar Plant Site Identification Using GIS and Remote Sensing: Framework and Case Study. *Energies*, 15(1), 312. <https://doi.org/10.3390/en15010312>
- Brasil. (2000). *Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000*.
- Brasil. (2007). *Decreto nº 6.040, de 7 de fevereiro de 2007*.
- Brasil. (2015). *Portaria Interministerial n.º 60, de 24 de março de 2015*. Ministério do Meio Ambiente; Ministério da Justiça; Ministério da Cultura; Ministério da Saúde.
- Elboshy, B., Alwetaishi, M., M. H. Aly, R., & Zalhaf, A. S. (2022). A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101618. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.013>
- EPE. (n.d.). *WEBMAP EPE*. Retrieved October 4, 2023, from <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE>
- Goiás. (2019). *Geografia*. <https://goias.gov.br/geografia/#>
- Habib, S. M., El-Raie Emam Suliman, A., Al Nahry, A. H., & Abd El Rahman, E. N. (2020). Spatial modeling for the optimum site selection of solar photovoltaics power plant in the northwest coast of Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100313>
- INPE. (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. <http://labren.ccst.inpe.br/>
- Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis — a hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest Policy and Economics*, 1(1), 41–52. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(99)00004-0)
- Martín-Martínez, S., Cañas-Carretón, M., Honrubia-Escribano, A., & Gómez-Lázaro, E. (2019). Performance evaluation of large solar photovoltaic power plants in Spain. *Energy Conversion and Management*, 183, 515–528. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.116>
- Noorollahi, Y., Ghenaatpisheh Senani, A., Fadaei, A., Simaee, M., & Moltames, R. (2022). A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach. *Renewable Energy*, 186, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.124>
- Phillips, O. L., Brienen, R. J. W., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A.,

Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., Aymard, G. A., ... Ricardo, J. (2017). Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance and Management*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0069-2>

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.

Sabziparvar, A., & Shetaee, H. (2007). Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. *Energy*, 32(5), 649–655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.05.005>

Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>

## APÊNDICES

### MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A MATRIZ DE COMPARAÇÃO

Matriz de Comparação Par-a-Par Original:

CRITÉRIOS	RS	DSE	DLT	UCS	D
Irradiação Solar (RS)	1,00	3,05	3,05	5,20	3,12
Distância para Subestação de Energia (DSE)	0,33	1,00	3,60	4,72	2,77
Distância para Linha de Transmissão (DLT)	0,33	0,28	1,00	3,52	2,25
Uso e Cobertura do Solo (UCS)	0,19	0,21	0,28	1,00	0,49
Declividade (D)	0,32	0,36	0,44	2,05	1,00
<b>SOMA DAS COLUNAS</b>	<b>2,17</b>	<b>4,90</b>	<b>8,38</b>	<b>16,49</b>	<b>9,63</b>

Primeiro, foi calculado a soma de cada coluna da matriz original. Em seguida, cada elemento da matriz é dividido pela soma da sua coluna correspondente, formando a Matriz Normalizada a seguir:

CRITÉRIOS	RS	DSE	DLT	UCS	D	PESO
Irradiação Solar (RS)	0,461	0,623	0,364	0,315	0,324	<b>41,75%</b>
Distância para Subestação de Energia (DSE)	0,151	0,204	0,430	0,286	0,288	<b>27,17%</b>
Distância para Linha de Transmissão (DLT)	0,151	0,057	0,119	0,213	0,234	<b>15,49%</b>
Uso e Cobertura do Solo (UCS)	0,089	0,043	0,034	0,061	0,051	<b>5,54%</b>
Declividade (D)	0,148	0,074	0,053	0,124	0,104	<b>10,05%</b>

Então foi calculado a média dos valores em cada linha da matriz normalizada.

Este vetor representa a importância relativa de cada critério.

Vetor de Peso:

- RS = 0,417
- DSE = 0,272
- DLT = 0,155
- UCS = 0,055
- D = 0,100

Multiplicou-se cada linha da matriz original pelo vetor de peso e somamos os valores de cada linha para obter um novo vetor (AW):

Cálculos:

- Para RS = 2,320

$$(1 \times 0,417) + (3,05 \times 0,272) + (3,05 \times 0,155) + (5,20 \times 0,055) + (3,12 \times 0,100)$$

- Para DSE = 1,506

$$(0,33 \times 0,417) + (1 \times 0,272) + (3,60 \times 0,155) + (4,72 \times 0,055) + (2,77 \times 0,100)$$

- Para DLT = 0,789

$$(0,33 \times 0,417) + (0,28 \times 0,272) + (1 \times 0,155) + (3,52 \times 0,055) + (2,25 \times 0,100)$$

- Para UCS = 0,284

$$(0,19 \times 0,417) + (0,21 \times 0,272) + (0,28 \times 0,155) + (1 \times 0,055) + (0,49 \times 0,100)$$

- Para D = 0,513

$$(0,32 \times 0,417) + (0,36 \times 0,272) + (0,44 \times 0,155) + (2,05 \times 0,055) + (1 \times 0,100)$$

Para a estimativa do Maior Autovalor ( $\lambda_{\max}$ ) dividimos cada elemento do vetor resultante (AW) pelo seu peso correspondente do vetor de peso e calculamos a média desses quocientes:

- Para RS:  $5,56 = 2,320 / 0,417$
- Para DSE:  $5,54 = 1,506 / 0,272$
- Para DLT:  $5,08 = 0,789 / 0,155$
- Para UCS:  $5,16 = 0,284 / 0,055$
- Para D:  $5,11 = 0,513 / 0,100$

$\lambda_{\max}$  estimado: Média dos quocientes = 5,29

O Cálculo do Índice de Consistência (CI) e da Razão de Consistência (CR) foi feito da seguinte forma:

- $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ , onde n é o número de critérios (5 neste caso)
- CI:  $(5,29 - 5) / (5 - 1) = 0,072$
- $CR = CI/RI$ , onde RI para uma matriz 5x5 é 1,12.
- CR:  $0,072 / 1,12 = 0,065$

Uma CR abaixo de 0,1 indica que a matriz é consistente. Neste caso, com um CR de 0,065, a matriz é considerada consistente.