

# Cenário de expansão do parque eólico Morro de Chapéu em Bahia, Brasil, a partir da modelagem multicritério

Expansion Scenario for Morro de Chapéu Wind Farm, Bahia, Brazil, Based on Multi-Criteria Modeling

## Historial del Artículo

### Recibido:

15 de septiembre de 2023

### Revisado:

28 de mayo de 2024

### Aceptado:

24 de julio de 2024

Alexis Fernández Sarabia<sup>a</sup>, Kevin Antonio Tomalá Pérez<sup>b</sup>, Taymi Cantillo Pérez<sup>c</sup>, Rodrigo Nogueira de Vasconcelos<sup>d</sup>, Deorgia Tayane Mendes de Souza<sup>e</sup>, Washington De Jesus Sant'anna Franca Rocha<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: alexis30fdz@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9869-1476>

<sup>b</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: kewiintomy18@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6918-6817>

<sup>c</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: taycantillo@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7861-0990>

<sup>d</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: mvuefsppgm@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1368-6721>

<sup>e</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: dtmsouza@uefs.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6791-3611>

<sup>f</sup>Filiación: Universidade Estadual Feira de Santana. Correo electrónico: wrocha@uefs.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2175-2792>

## Palavras-chave

Análises de Processos  
Hierárquicos, lógica Fuzzy,  
Sistemas de informação  
Geográfica

## RESUMO

O consumo de energia elétrica no Brasil tem aumentado 1,5% em 2022 na comparação com 2021. O uso da energia eólica é uma solução baseada no uso de recursos naturais para geração de energia limpa que tem ido em aumento no estado da Bahia, minimizando simultaneamente os impactos negativos do uso de combustíveis fósseis. Apesar da boa acolhida em geral, encontrar cenários de expansão para implementação de parques eólicos demanda da existência de um zoneamento ambiental e estudos que caracterizem a região. Admitindo a importância econômica da implantação desses parques geradores de energia, este trabalho buscou identificar e aplicar uma análise multicritério para identificação dos sítios potenciais para a expansão do parque eólico dentro do município Morro de Chapéu, Bahia, obtendo como resultado um mapa de idoneidade capaz de identificar os sítios potenciais para ampliação do parque eólico já existente.

## Keywords

Hierarchical Process Analysis,  
Fuzzy logic, Geographic  
Information Systems

## ABSTRACT

Electricity consumption in Brazil increased by 1.5% in 2022 when compared to 2021. The application of wind energy is a potential solution that utilizes natural resources to generate clean energy and has been increasingly adopted in Bahia, while minimizing the negative impacts of the use of fossil fuels. However, expansion scenarios for implementing wind farms require environmental zoning and region characterization studies. Given the economic significance of constructing these energy-generating farms, this study aimed to conduct a multi-criteria analysis to pinpoint potential locations for wind farm expansion in Morro de Chapéu, Bahia. This led to the creation of a suitability map that identifies appropriate sites for the expansion of existing wind farms.

## Introdução

A oferta e demanda energética tem aumentado nos últimos anos; só no Brasil o consumo de energia elétrica aumentou 1,5% em 2022 na comparação com 2021 e alcançou 67.275 megawatts médios (CCEE, 2023). A geração de energia eólica no Brasil foi superior a 57 TWh/ano, o que representou 9% da eletricidade do país (EPE, 2023). Em 2022 alcançou 81,6 TWh, um equivalente de 13% comparado ao ano anterior. Esse mesmo ano, a potência instalada para geração eólica se expandiu um 14.3%. Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) estimaram uma projeção das capacidades de projeção por matriz energética entre 2010 até 2030 onde a energia eólica vai passar de produzir 187 TWh a 642 TWh, ou seja, um aumento de 244%. Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica estima que em 2030, o consumo total de energia elétrica esteja entre 950 e 1250 TWh/ano, tendo como consideração um consumo de 405 TWh a mais desde 2006 (EPE, 2022).

A necessidade de suprir a demanda da população através da produção de energia limpa e sustentável, fizeram com que se produzissem novos projetos energéticos, tendo em conta as políticas e leis governamentais (Ayodele et al., 2018). Assim, a utilização da energia limpa é uma das opções energéticas empregadas na atualidade para a mobilização industrial, social, econômica de um país, onde o impacto ambiental é reduzido por ser uma fonte de energia renovável (Janke, 2010).

O vento, como fonte de energia renovável, tem mostrado resultados favoráveis em comparação com outros médios de energia convencionais (Janke, 2010). É por isso que implementação de parques eólicos tem aumentado e espera-se no futuro que o emprego de fontes eólicas cresça em relação a outras fontes, especialmente em países com maior desenvolvimento. Mas existem alguns desafios para a implementação de locais eólicos, associados a custos de implementação, restrições e conflitos socioambientais (Ayodele et al., 2018).

Um dos desafios nos projetos de implementação de energia eólica é localizar lugares ótimos para montar esses projetos, já que isso determina a viabilidade do mesmo, trazendo potenciais inversores para sua implementação, porém, resulta desafiante em termos de aceitação por parte da sociedade (Santos et al., 2013). Além disso, é importante ter em conta o impacto ambiental; a criação de esses projetos e a presença de turbinas eólicas pode ser percebida como uma intrusão visual, especialmente em áreas naturais ou paisagens rurais preservadas. Muitas

comunidades valorizam a estética de sua paisagem e veem as turbinas como uma perturbação pelo som gerado pelas turbinas eólicas, especialmente o som de baixa frequência, que pode ser uma fonte de desconforto para as pessoas que vivem próximas aos parques eólicos. Isso pode levar a queixas e preocupações sobre a qualidade de vida. Em relação ao impacto sobre a fauna, os parques eólicos têm sido associados a colisões fatais para aves e morcegos, o que preocupa ambientalistas e conservacionistas; e o impacto socioeconômico sobre as propriedades também é um fator a considerar, já que há preocupações de que a proximidade de um parque eólico possa desvalorizar propriedades residenciais, devido ao impacto visual e ao ruído (Carvalho et al., 2023; da Silva e Galvão, 2022; USAID, 2009). Assim mesmo, em termos econômicos se deve ter em conta a viabilidade, considerando a proximidade de rede elétrica, disponibilidade dos recursos eólicos, proximidades das estradas e outros aspectos que tentem minimizar os impactos previstos na implementação do projeto (Santos et al., 2013).

A planificação ambiental em projetos de energia eólica é crucial para garantir sua sustentabilidade e a aceitação pública (Alameda County Community Development Agency, 2014; Díaz-Cuevas et al., 2021; USAID, 2009). A abordagem dos possíveis impactos negativos desde a fase de planificação permite desenhar e implementar soluções que protejam o meio ambiente e maximizem os benefícios da energia eólica. Como exemplo pode se citar o parque eólico Altamont Pass, em Estados Unidos, que enfrentava problemas com a alta taxa de mortalidade de aves rapazes devido ao desenho e localização das turbinas, tomando medidas de repotenciação com turbinas mais seguras, criação de zonas de amortiguamento e monitorio constante para reduzir o impacto sobre a fauna. Outros parques como o parque eólico Gansu, na China, a partir dos desafios ambientais e o impacto sobre o deserto de Gobi, incluindo a alteração do habitat de espécies autóctones, aplicaram estratégias de mitigação como plantar vegetação para prevenção da erosão do solo, e o desenho de turbinas que minimizam o impacto visual e acústico (Smallwood e Bell, 2020).

É nesta fase que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análises de decisões multicritério são amplamente utilizadas na planificação espacial dos projetos de energia renovável (Badi et al, 2021; Gonçalves Júnior et al., 2020; Liu et al., 2017; Liu et al., 2021; Rekik e El Alimi, 2024). Existem várias funções multicritério que ajudam avaliar fatores com influência na tomada de decisões espaciais, entre elas a lógica Fuzzy (agrupamento difuso). O agrupamento difuso é usado para agrupar recursos com base em critérios

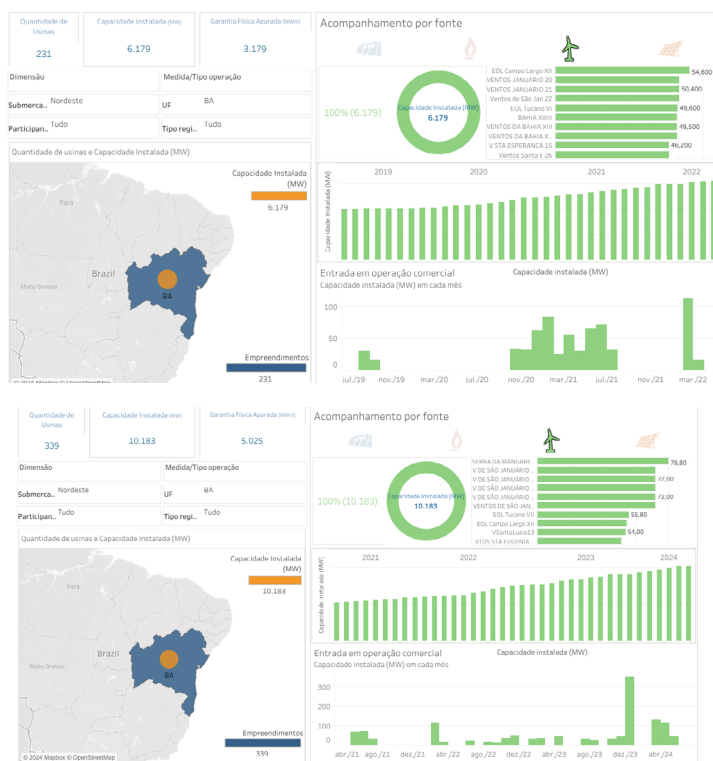
selecionados que combinados a métodos como por exemplo métodos do processo analítico hierárquico (AHP, acrônimo em inglês) e processo analítico de rede (ANP), que permitem criar modelos baseados em análise multicritério na hora da seleção de sítios idôneos de parques eólicos.

A lógica difusa lida com o conceito de valor da verdade que varia entre completamente verdadeiro e completamente falso (0-1) e é definido matematicamente como  $Z:S=(z,f(z))$ . Junto a ele são usadas funções de pertinência difusa encarregadas de associar elementos de um determinado conjunto, e um valor de pertinência que representa o grau de compatibilidade de um elemento (Saaty, 2005, 1990). A combinação de modelos SIG associados às funções de pertinência e as decisões multicritério possibilita a identificação de áreas com potencialidade para instalação de turbinas eólicas (Asadi et al., 2023; Bennui et al., 2007; Moradi et al., 2020). Um exemplo disto foi a escolha de possíveis áreas potencializadoras na Polônia em função dos fatores econômicos, ecológicos e técnicos, utilizando critérios como altitude, áreas urbanas, florestais e protegidas, além da declividade e linhas de transição energética (Malczewski, 2006).

O Brasil está entre os países com maior potencialidade de energia eólica, sendo a região nordeste do país a mais destacada. O estado da Bahia tem sido objeto de estudos de pesquisa e desenvolvimento com vistas ao planejamento e à implantação de fontes alternativas de energia em seu sistema gerador elétrico desde o ano de 1994. Ao longo dos últimos anos, a Bahia vem se consolidando na posição de líder brasileiro nos investimentos em energia eólica: exemplo disso é que em maio de 2022 a capacidade instalada era 6,179 MW com 231 usinas, e um ano depois, em maio de 2024, teve um aumento na capacidade instalada de 10183 MW, com 339 usinas (Figura 1).

O Estado da Bahia apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento neste ramo energético. Conta com 87 projetos de energia eólica previstos para instalação e é o único estado do nordeste que teve energia de origem eólica comercializada em todos os leilões abertos a esta fonte (Santos et al., 2013). Os empreendimentos somam, aproximadamente, R\$8,5 bilhões (Santos et al., 2013). Além dos parques de geração de energia espalhados pelo sertão, onde se localiza grande parte do potencial do estado, está se organizando um parque industrial voltado para a produção de equipamentos, consolidando a Bahia como

Figura 1. Fontes de geração de energia no estado de Bahia, Brasil



Fonte: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/dados-e-analises/dados-geracao>

principal pólo nacional na fabricação de componentes. Por tanto, resulta essencial a identificação dos melhores cenários para construção de parques eólicos que tenham um menor impacto no ambiente para que o rendimento seja ainda maior. Diante do elevado potencial eólico da Bahia, foi necessário estudar o município Morro de Chapéu, para realizar a determinação dos cenários de expansão do parque eólico de Morro de Chapéu, a partir de uma modelagem multicritério, com o objetivo de localizar os cenários mais favoráveis para a implementação de turbinas eólicas com a utilização do método Fuzzy-AHP. O mapeamento dessas áreas promissoras e encorajadoras visa atuar como instrumento de planejamento energético e de atração de investimentos para o setor eólico. Em especial, para contribuir com desenvolvimento social e econômico em regiões menos privilegiadas, em grande parte das quais o recurso eólico mostra-se o mais generoso.

## Materiais e métodos

### Área de estudo

Localizado na região nordeste, entre os paralelos  $08^{\circ} 31' 58''$  S e  $18^{\circ} 20' 55''$  S e os meridianos  $46^{\circ} 37' 02''$  W e  $37^{\circ} 20' 28''$  W, o estado da Bahia é formado por 417 municípios, ocupando uma área total de 564.733 km<sup>2</sup> (6,63% do território nacional). Seus limites são formados pelo oceano Atlântico ao leste, os estados de Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Piauí ao norte, Tocantins e Goiás a oeste, Minas Gerais e Espírito Santo ao sul. O relevo é caracterizado por planícies, planaltos e depressões em formas tabulares e planas. Cerca de 90% do território situa-se acima dos 200 m de altitude, com as maiores elevações na região central do estado, ao longo da Serra do Espinhaço e da Chapada Diamantina (Santos et al., 2013).

O município Morro de Chapéu localiza-se a 384 km a noroeste da capital do estado da Bahia, na zona oriental da Chapada Diamantina e possui altitude média de 1.100 m. Os pontos de maior altitude chegam a 1.350 m, sendo, por isso, uma das cidades mais frias do estado, com temperaturas em torno de 10 °C em algumas épocas do ano, como mostra a Figura 2. O município está coberto principalmente do bioma Caatinga arbustiva e arbórea, campos unidos e floresta estacional. A média anual dos ventos chegam a 9,0 ou 9,5 m/s nos melhores pontos de localização (Santos et al., 2013).

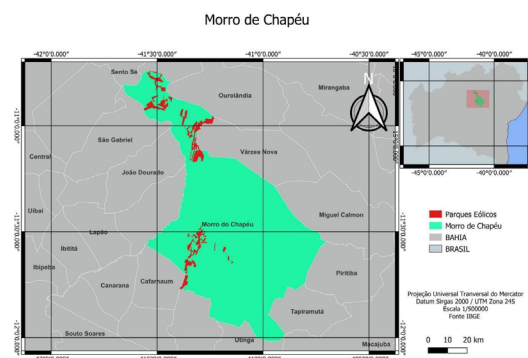
A economia está fortemente baseada na agropecuária de subsistência, porém nos últimos anos vem se desenvolvendo na região investimentos em agricultura empresarial, baseada no tomate, morango e uva, inclusive com instalação de

vinícolas de vinhos. O potencial ecoturístico é uma das características que ressalta na região. Suas principais atrações como a Gruta dos Brejões, Cachoeira do Ferro Doido e o Parque Estadual Morro do Chapéu são as características mais atrativas do município, por ser áreas de preservação e conservação ambiental pouco exploradas. Por último, os investimentos na produção de energia eólica é outro dos pólos econômicos da região, já que recebe investimentos de empresas energéticas estrangeiras (Santos et al., 2013). O fluxograma geral dos processos aplicados a cada variável é o seguinte (Figura 3).

### Fonte de dados dos critérios

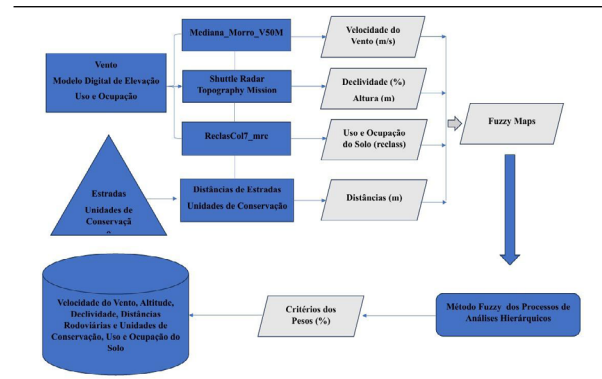
Para a preparação e obtenção dos dados e elaboração da modelagem dos cenários de expansão do parque eólico, primeiramente foram definidos um total de seis critérios ou variáveis, recopiladas de várias fontes de dados. Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados os critérios descritos na Tabela 1, cada um deles fundamentados para estruturar a modelagem.

Figura 2. Mapa da área de estudo



Fonte: elaboração própria.

Figura 3. Fluxograma dos processos realizados



Fonte: elaboração própria.

**Tabela 1**  
Descrição dos critérios utilizados

Descrição dos critérios	
Velocidade do vento (m/s)	A velocidade do vento é uma das variáveis mais importantes a ser tomada em conta na localização idônea dos parques eólicos. Segundo a classificação de NREL velocidades de vento superiores a 4,4 m/s a alturas de 10 m com o anemômetro resultam ser ótimas, por enquanto velocidades menores a 4,4 m/s não chegam cumprir as expectativas para a criação de parques eólicos.
Declividade (%)	Uma alta porcentagem de declividade leva ao aumento de custos de produção (Ayodele, 2018; Borissova, 2024; Mokarram et al., 2022). Recomenda-se declividades menores ao 10% já que declividades baixas são melhores para sua construção; inclinação superiores entre 15 a 30% são impróprios para a construção de usinas e afeta a taxa de vento utilizável causando turbulência dificultando o acesso. Como referência é usado o MDE.
Distância das estradas	A localização das estradas deve estar perto do sítio (Ayodele, 2018; Janke, 2010; Roscher et al., 2020). Áreas fechadas às estradas são melhores para colocar parques eólicos, já que o custo de construção e manutenção serão menores, também para não impossibilitar o desenvolvimento do parque eólico. Porém, se recomenda deixar uma distância de 500 m para evitar o atrapalhamento visual e garantir a segurança. Áreas menores de 500 m e maiores a 10.000 das estradas são classificadas como não aptas.
Distância das Unidades de Conservação	A maior distância das unidades de conservação permite a implementação do parque eólico. A restrição das áreas de conservação como a natureza, sítios arqueológicos e históricos, são excluídos dos estudos para construção do parque eólico. As áreas de conservação dentro dos 500 m da zona de amortecimento se classificam como áreas inadequadas (Ayodele, 2018; Borissova, 2024). As atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições específicas, com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre a Unidade, como definida pelo artigo 2º, inciso XVIII da Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC (Brasil, 2000). Se a unidade foi estabelecida sem a definição de zona de amortecimento, empreendimentos com capacidade de impacto significativo ao ambiente deverão respeitar uma faixa estabelecida de 3 km de distância e serão obrigados a obter o licenciamento
Uso e cobertura de solo	A cobertura e uso da terra desempenham um papel importante na construção dos aerogeradores (Mokarram et al., 2022). São classificadas por categorias a fim de impedir a redução de ventos como por exemplo a vegetação arbórea ou úmida, que impossibilitam acessibilidade ou estabilidade (Janke, 2010; Turkovska et al., 2021), então são excluídas dentro da avaliação dos ventos. Áreas com vegetações mais delgada, como pasturas, tem uma prioridade mais alta. Quando não há cobertura vegetal e a superfície é plana, a velocidade torna-se assintótica a poucos metros acima do terreno, diferentemente de quando há uma floresta ou vegetação densa, sendo, portanto, o perfil de elevação influenciado pela altura da cobertura vegetal e pela sua distribuição espacial. Áreas urbanas dentro de um rango de 2.000 mts, não são ótimas para localizar parques eólicos. Isto se deve a que a estética, ruído e efeitos visuais do desenvolvimento do parque interferem nos habitantes que moram próximos a essas áreas. Para que sejam aptas à localização dos parques eólicos, eles devem ultrapassar distâncias maiores a 2.000 mts.
Altitude	Altitudes inferiores a 1.000 m são adequadas para a construção de usinas. Maior altitude faz o acesso a essas áreas é difícil e o declive acentuado afeta a taxa de vento utilizável (Mokarram et al., 2022). Os resultados da integração cumulativa segundo o Atlas eólico (Santos et al., 2013), indicam que a Bahia possui um potencial eólico de grande magnitude, com capacidade instalável em solo firme ( <i>onshore</i> ) estimada em 70 GW a 100 m de altura, em locais com velocidades médias superiores a 7,0 m/s.

Fonte: As fontes da qual foram obtidos os dados para os critérios é representado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Fonte de dados e formatos de arquivos utilizados para modelagem

Critérios	Fonte de dados	
	Formato	Fonte
Velocidade dos ventos	Raster	MERRA <a href="https://code.earthengine.google.com/NASA/GSFC/MERRA/slv/2">https://code.earthengine.google.com/NASA/GSFC/MERRA/slv/2</a>
Unidade de conservação	Vector	MMA <a href="https://www.gov.br/mma/pt-br/search?SearchableText=unidade%20conservacao">https://www.gov.br/mma/pt-br/search?SearchableText=unidade%20conservacao</a>
Estradas	Vector	IBGE <a href="https://atlasescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_redes_de_transporte">https://atlasescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_redes_de_transporte</a> .
Uso e cobertura do solo	Raster	Coleção MAPBIOMAS 8 <a href="https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura(2023)">https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura(2023)</a>
Altitude e declividade	Raster	SRTM/NASA <a href="https://code.earthengine.google.com/(ee.Image('USGS/SRTMGL1_003'))">https://code.earthengine.google.com/(ee.Image('USGS/SRTMGL1_003'))</a>

Fonte: elaboração própria.

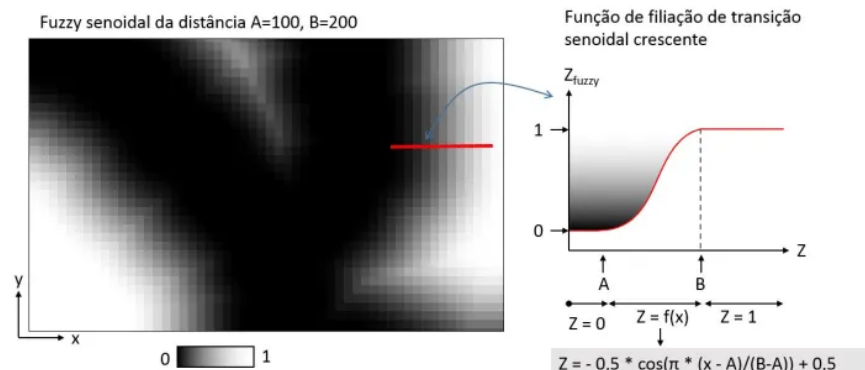
## Método dos modelos difusos

Para a utilização dos conjuntos Fuzzy se usou o conceito de associação de conjuntos, onde os vários tipos de funções de pertinência normalmente usadas na lógica difusa são “ $\Delta$ ” triangular, “ $\square$ ” trapezoidal, função “L”, “I” função, função “S”, e conjunto fuzzy gaussian (Borja et al., 2018). Para a modelagem da lógica Fuzzy foi aplicado a função algorítmica Fuzzify Raster disponibilizadas pelo software Qgis versão 3.28.6, sendo aplicada funções de pertinência de poder, linear e categórica para cada variável. Cada função de pertinência se assemelhou à variável mais adequada, para que os valores de cada Raster sejam transformados em valores de pertinência fuzzy entre (0 e 1) e mapeá-los. Para a variável do vento foi selecionada a função de poder, já que apresenta uma série senoidal crescente e decrescente, trocando os limites de baixos e altos, sendo representada pelo seguinte exemplo (Figura 4):

Essa função é construída usando três valores de varredura de entrada definidos pelo usuário que definem o ponto de associação completa (limite superior, resultados como 1), nenhuma associação (limite inferior, resultados como 0) e expoente da função (somente positivo), respectivamente. O conjunto difuso entre esses valores de limites superior e inferior é então definido como uma função de potência. Para as variáveis com valores crescentes e decrescentes (declividade, altura e distâncias) usou-se a função linear. A equação está definida na Figura 5.

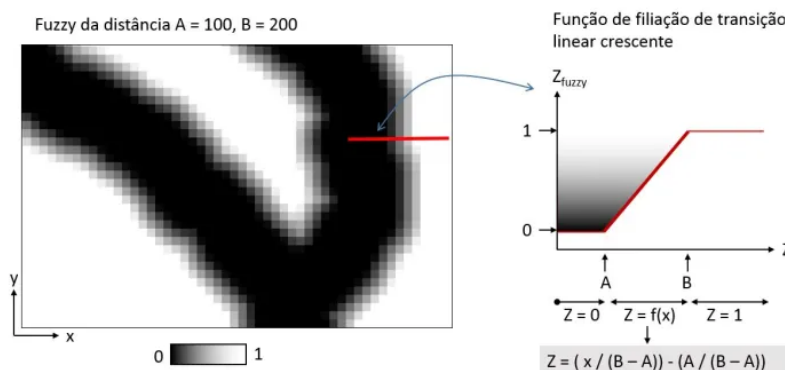
A função de pertinência linear usada no Qgis atribui uma variação linear do grau de pertinência Fuzzy entre 0 e 1 para os valores situados entre os limites mínimo e máximo definidos pelo especialista para a evidência analisada. A função linear é construída usando dois valores de varredura de entrada definidos pelo usuário que definem o ponto de associação completa (limite superior, resultados como 1) e nenhuma associação (limite inferior, resultados como

Figura 4. Fórmula e representação da distância linear crescente



Fonte: Mapasabertos, disponível em <https://mapasabertos.com/2020/12/09/logica-fuzzy-e-os-cinquenta-tons-de-cinza/>

Figura 5. Fórmula e representação da distância senoidal crescente



Fonte: Mapasabertos, disponível em <https://mapasabertos.com/2020/12/09/logica-fuzzy-e-os-cinquenta-tons-de-cinza/>

0) respectivamente. O conjunto difuso entre esses valores dá como resultado uma função linear.

Para critérios que usam dados temáticos, o software Qgis disponibiliza a ferramenta reclassificação por tabela, em quanto este algoritmo reclassifica uma banda Raster atribuindo valores de grau de pertinência fuzzy entre 0 e 1 com base nos intervalos especificados em uma tabela fixa. Os valores são adicionados segundo seu nível de importância conforme os parâmetros definidos pelo especialista.

### Método Processos de Análise Hierárquico (AHP)

O método AHP foi usado para determinar os pesos dos critérios contidos em cada variável, com a finalidade de obter a modelagem Fuzzy AHP para a identificação de sítios idôneos. Para a definição dos pesos usou-se a planilha para cálculo AHP de K.D. Goepel Versão 15.09.2018. O método de processos de análise hierárquico, segundo Franco et al. (2013), utiliza três operações que incluem a construção da hierarquia, análise da prioridade e a verificação da consistência. Foram tomados julgamentos e preferências por parte dos operadores para designar valores e importância para que depois sejam comparados. Mediante o uso da escala absoluta de Saaty (1987) se obtiveram os valores de intensidade (1 a 9), que permitem a definição e a justificativa para cada um dos itens. Dessa forma, os pesos serão atribuídos aos diferentes critérios e alternativas que caracterizam uma decisão, permitindo examinar a consistência dos juízos feitos para logo comparar e determinar os coeficientes de importância para cada critério, possibilitando escolher uma alternativa ao problema (Saaty, 1990, 2005).

Finalmente, após a devida padronização das variáveis em formato Fuzzy, os mapas foram combinados com emprego

de operadores, incluindo os pesos AHP. A modelagem Fuzzy foi feita utilizando a calculadora Raster do software Qgis aplicando o operador de SUMA, que consistiu em escolher o critério Fuzzy e multiplicar para o valor do peso AHP. Após disso se faz uma soma entre todos os critérios junto com AHP para ter como resultado a modelagem Fuzzy AHP que permitem ponderar a importância relativa de cada fator no modelo, concluindo o resultado da modelagem.

### Resultados

#### Crítérios para a determinação dos parques eólicos

Segundo o critério de outros autores e especialistas no tema, parâmetros como a velocidade do vento, declividade, altura, distância das unidades de conservação, uso e cobertura da terra, e distância das estradas, são os parâmetros mais importantes para se ter em conta na planificação de um parque eólico (Borissova, 2024; Liu et al., 2021; Turkovska et al., 2021).

Os critérios utilizados para a definição de áreas apropriadas e inapropriadas para estabelecimento de parque eólico, definidos através de revisão da literatura, foram categorizados como se ilustra na Tabela 3. A variável do vento é muito importante e tem a maior influência; neste estudo foram empregados dados do vento para alturas de 50 m. O mapa eólico da Bahia representa que as zonas com melhores potenciais do Parque Eólico Estadual Morro de Chapéu são para alturas entre 80, 100, 120 e 150 metros (Santos et al., 2013).

Por outro lado, a elevação e a inclinação influenciam diretamente a produção de energia. A alta altitude dificulta o acesso a essas áreas e uma grande inclinação afeta a taxa de vento útil. Ecologicamente, a distância de áreas protegidas e rios é importante ao construir um parque

**Tabela 3.** Áreas restritas e adequadas para implantação de parques eólicos na região

Variáveis	Muito apropriado	Médio apropriado	Inapropriado
Velocidade do vento (m/s)	4 – 7	2 – 4	1,5
Distância rodoviárias (mts)	500	4.000	> 8.000
Distância unidades de conservação (mts)	6.000	3.000 – 6.000	< 3.000
Altitude (mts)	1.000	1.000 – 1.200	> 1.200
Declividade %	< = 5	5 – 15	> 15
Uso e ocupação (categórico)	Pastoras, agropecuária (1)	Não florestal (0,8) arborizada (0,2)	Corpo de águas, áreas urbanas (0)

Fonte: elaboração própria.



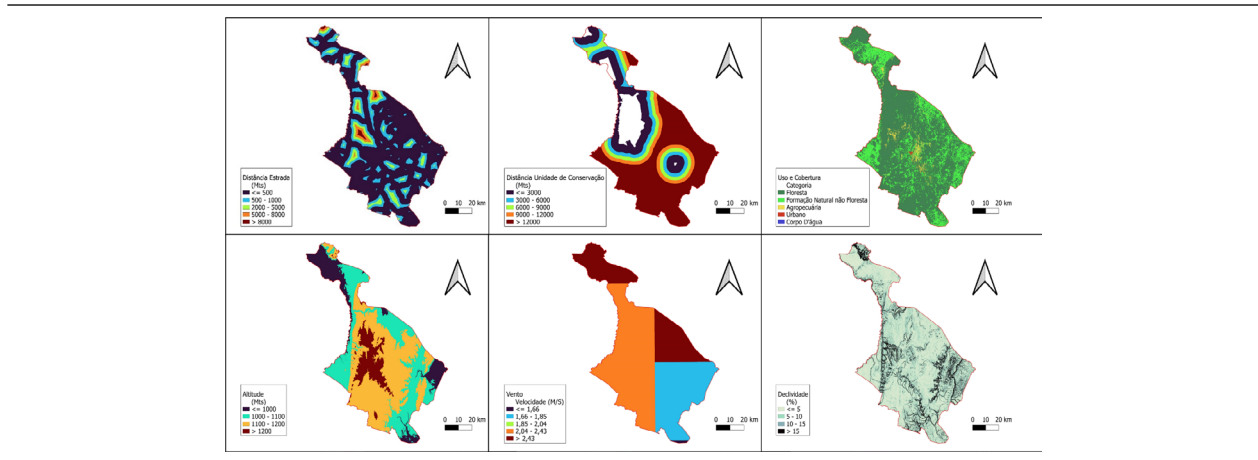
eólico, sendo que a distância mínima desejada tem que ser, pelo menos, de 500 m (Santos et al., 2013). Os critérios socioeconômicos incluem a distância até às vias de comunicação, a distância às zonas rurais, a distância às zonas urbanas e a utilização dos solos.

Cidades e áreas densamente povoadas podem ser afetadas negativamente por parques eólicos em termos de segurança, ruído e paisagem. Vários estudos têm demonstrado que os parques eólicos devem estar a pelo menos 500 m de distância dos centros populacionais (Bennui et al., 2007). Além disso, a distância até às vias de comunicação deve ser de, pelo menos, 500 m. Tendo em consideração as informações supracitadas, foram criados diferentes mapas para cada um dos critérios selecionados (Figura 6).

## Resultado do Método Difuso

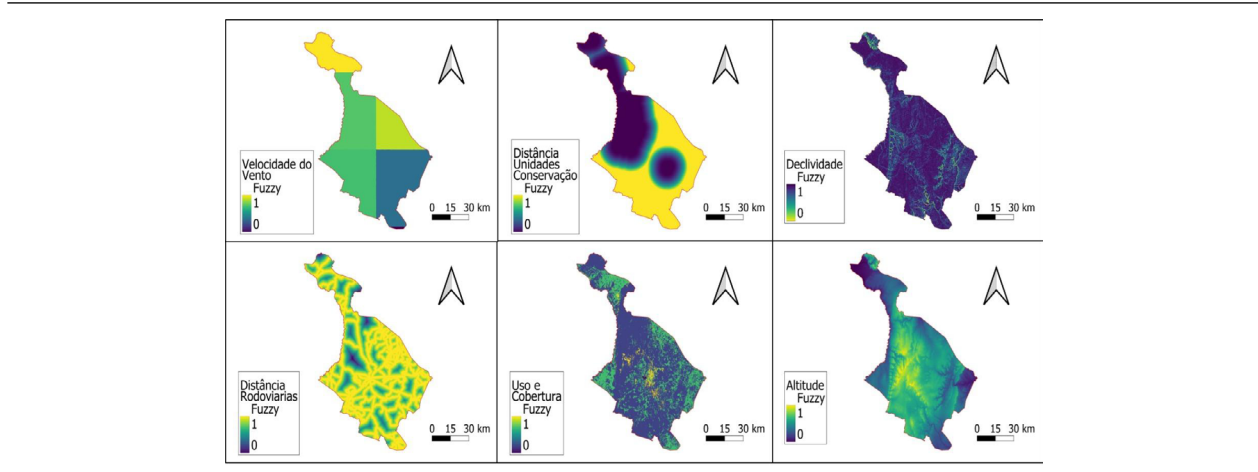
Foram feitos mapas de pertinência Fuzzy utilizando os seis critérios selecionados; as funções de pertinência linear são representadas pelas variáveis de distâncias, elevação e declividade. Para a função de poder foi escolhida a variável de velocidade do vento e a variável de uso e cobertura foi representada pela função categórica. Na Figura 7 mostra-se a defuzzificação por variável tendo em conta que as áreas mais próximas a 1 são as mais adequadas para a instalação dos aerogeradores e áreas representadas com valor 0 são as menos indicadas para a construção dos projetos eólicos.

Figura 6. Mapa realizado a partir dos critérios das variáveis, ilustrando as áreas restritas e adequadas para instalação de parque eólico



Fonte: elaboração própria.

Figura 7. Mapa Fuzzy a partir dos critérios das variáveis



Fonte: elaboração própria.



## Resultados do método Fuzzy AHP

Os valores de intensidade atribuídos a cada um dos critérios escolhidos, assim como os pesos e o resultado da modelagem Fuzzy AHP são ilustrados na Tabela 4 e 5. As áreas onde o desenvolvimento de parques eólicos se vê impossibilitado foram excluídas dos cálculos de integração. Essas áreas foram: áreas com elevada declividade ( $> 15$ ); áreas de proteção integral (parques, reservas indígenas, assentamentos); áreas sobre corpos d'água, e concentrações urbanas ou localidades que tiveram como resultado Fuzzy 0. Os sítios mais próximos a 1 são os locais mais ótimos para a implementação dos parques eólicos.

A razão de consistência (CR) indica a qualidade dos cálculos dos pesos atribuídos aos critérios. No presente caso, o valor obtido de 8,9% está dentro dos limites aceitáveis. Os mapas combinados com emprego de operadores permitiram a elaboração do mapa final (Figura 8). Pode-se observar em vermelho a área que corresponde ao parque eólico e em amarelo os possíveis cenários de

expansão, mostrando o grau de pertinência Fuzzy 0.82 mais próximo de 1 idôneos e os mais aleijados de 1 não idôneos coincidindo em alguns casos com as áreas de conservação. A aplicação da metodologia Fuzzy AHP para a identificação de parques eólicos foi padronizado em categorias, gerando assim um mapa de aptidão onde permite-se saber quais são os locais com baixa e alta idoneidade para a construção de novos projetos eólicos.

O mapa de idoneidade do município Morro de Chapéu apresentou áreas com alta aptidão (valores mais próximos de 1) em terrenos onde a declividade é baixa, os acessos às estradas são mais próximos e onde o uso e cobertura do solo em áreas de pastagem e não arborizadas possibilitam a implementação de novos cenários de expansão.

## Discussão

Este trabalho constitui uma ferramenta para a tomada de decisões em áreas do parque eólico Morro de Chapéu em particular, sendo que esta metodologia poderia ser

**Tabela 4.** Matriz de comparação dos valores de intensidade obtida com o método AHP

	Velocidade do vento	Altitude	Declividade	Unidades de conservação	Distância às estradas	Uso e ocupação da terra
Velocidade do vento	1	1	3	1	2	2
Altitude	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3
Declividade	1/3	3	1	1/3	1/3	1/2
Unidades de conservação	1	3	3	1	1	2
Distância às estradas	1/2	3	3	1	1	2
Uso e Ocupação da terra	1/2	3	2	1/2	1/2	1

Fonte: elaboração própria.

**Tabela 5.** Valores de peso para cada variável estudada

Variáveis	Peso (em %)
Velocidade do vento	23.6
Altitude	8.3
Declividade	9.8
Unidades de conservação	22.9
Distância a rodovias	21.1
Uso e Ocupação da terra	14.1
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fonte: elaboração própria.

aplicada em outras áreas no país. Nas investigações realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho, a principal limitação encontrada foi relacionada à obtenção dos dados da variável (vento) na fonte citada, os valores eram para alturas superiores a 250 m, portanto trabalhamos com valores para uma altura de 50 m. Apesar disso, os resultados obtidos para esta altura foram satisfatórios, já que segundo a literatura são analisados valores de velocidade do vento entre 80, 100 e 120 m.

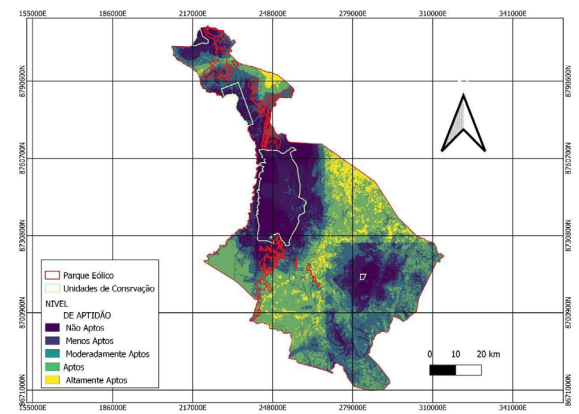
A utilização de métodos de análise multicritério Fuzzy AHP, indica com clareza que áreas são adequadas para a expansão ou instalação de parques eólicos. Por sua vez, a síntese dos resultados permite a comparação das prioridades e importância relativa de cada fator (Ayala e Frank, 2013), mas recomendamos que este processo seja realizado em conjunto com os gestores ou analistas em cada caso. No município de Morro de Chapéu, as áreas selecionadas como possíveis cenários de expansão se encontram no nordeste e centro leste do município, com os maiores índices de adequabilidade nas proximidades dos limites atuais do parque eólico, e também é possível a visualização de novas áreas adequadas e valorar os critérios por peso.

Ou seja, a síntese das informações permite a comparação de prioridades, lembrando que a estrutura hierárquica precisa de um consenso para a determinação de pesos e prioridades, já que a determinação de pesos e prioridades é altamente subjetiva, o que pode levar a resultados tendenciosos e inconsistentes. A estrutura permite uma organização clara das informações e critérios, facilitando melhor compreensão e análises, comparação sistemática entre diferentes elementos, identificando suas prioridades em relação uns aos outros, ajuda na tomada de decisões ao fornecer uma estrutura para avaliar e comparar opções com base em critérios específicos, aumentando a transparência do processo decisório fornecendo uma estrutura clara para a atribuição de pesos e prioridades.

## Conclusões

O conhecimento das possíveis áreas de expansão do parque do ponto de vista económico contribui para o progresso do país, gerando fontes alternativas de energia renováveis e aumentando o desenvolvimento económico e social da região. O emprego da lógica Fuzzy em sistemas de informação geográfica simplifica a solução de problemas baseados em transições contínuas entre verdadeiro e falso, permitindo saber o nível de incerteza ou certeza, concluindo assim que sítios são os mais idôneos para a construção de parques eólicos. Ainda por cima, o resultado expressado

Figura 8. Mapa de idoneidade para expansão do parque eólico



As linhas vermelhas indicam os limites atuais do parque eólico existente.

Fonte: elaboração própria.

em um mapa facilita o entendimento das informações para os gestores e o público em geral.

Espera-se que este trabalho venha a contribuir na pesquisa e desenvolvimento do uso da fonte eólica, chamando a atenção de investidores em geração de energia elétrica para novos locais e auxiliando o próprio governo no planejamento e formulação de estratégias de expansão do sistema elétrico como um todo, tendo em conta que o estado da Bahia apresenta a existência de recursos eólicos abundantes, com ventos regulares, distribuídos principalmente na região semiárido.

## Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

## Declaración de autoría

Alexis Fernandez Sarabia: Conceptualización, Investigación, Metodología, Curación de datos, Software, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Kevin Antonio Tomalá Pérez: Conceptualización, Investigación, Metodología, Curación de datos, Software, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Taimy Cantillo Pérez: Revisión, Recursos, Redacción y edición.

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos: Supervisión, Recursos, Software y Metodología

Deorgia Tayane Mendes de Souza: Supervisión, Metodología  
Washington De Jesus Sant'anna Franca Rocha: Supervisión, Metodología, Conceptualización, Curación de datos, Recursos

## Agradecimentos

Alexis Fernández Sarabia e Kevin Antonio Tomalá Pérez, gostariam de agradecer à CAPES pelas bolsas de estudo concedidas (números de processos 88887.679889/2022-00 e 88887.687041/2022-00 respectivamente), assim como ao programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio durante a realização deste estudo.

## Referencias

- Alameda County Community Development Agency. (2014). *Altamont Pass Wind Resource Area Repowering Draft Program Environmental Impact Report*. Alameda County Community Development Agency.
- Asadi, M., Pourhossein, K. e Mohammadi-Ivatloo, B. (2023). GIS-assisted Modeling of Wind Farm Site Selection Based on Support Vector Regression. *Journal of Cleaner Production*, 390, 135993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135993>
- Atlas de Eficiência Energética Brasil. (2022). Atlas de de Eficiência Energética Brasil.
- Ayala, N.F. e Frank, A.G. (9 ao 11 de junho de 2013). Métodos de análise multicriterial: Uma revisão das forças e fraquezas. Em XIII SEPROSUL. *Semana de Engenharia de Produção Sul Americana*. Gramado, Brasil. <http://hdl.handle.net/10183/196504>
- Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O., Odigie, O. e Munda, J.L. (2018). A Multi-criteria GIS Based Model for Wind Farm Site Selection Using Interval Type-2 Fuzzy Analytic Hierarchy Process: The Case Study of Nigeria. *Applied Energy*, 229, 739-753. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>
- Badi, I., Pamucar, D., Gigović, L. e Tatomirović, S. (2021). Optimal Site Selection for Sitting a Solar Park Using a Novel GIS-SWA<sup>TEL</sup> Model: A Case Study in Libya. *International Journal of Green Energy*, 18(4), 336-350. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1854264>
- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P. e Chetpattananondh, K. (10 e 11 de maio de 2007). Site Selection for Large Wind Turbine Using GIS. Em *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment*. Prince of Songkla University. Hat Yai, Tailândia.
- Borissova, D. (2024). Decision-Making in Wind Farm Design. Em D. Borissova, *Decision-Making in Design, Maintenance, Planning, and Investment of Wind Energy* (pp. 97-163). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-52219-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-52219-2_3)
- Borja, L.P., Beltrão, N.E.S., Gemaque, A.M.S. e Tavares, P.A. (2018). Analytical Hierarchical Process (AHP) in the GIS Environment: Issues and Applications for Decision Making Using Spatial Criteria. *Interações (Campo Grande)*, 20(2), 407-426. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>
- Brasil. (2000). *Lei Nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC*. Governo Federal. <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Leis-Federais/Lei-Federal-9985.pdf>
- Bronzatti, F.L. e Iarozinski Neto, A. (13 ao 16 de outubro de 2008). Matrizes energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030. Em *XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Rio de Janeiro, Brasil. [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008\\_TN\\_STO\\_077\\_541\\_11890.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_541_11890.pdf)
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (1 de fevereiro de 2023). *Consumo brasileiro de energia elétrica subiu 1,5% em 2022, mostra balanço da CCEE*. CCEE. <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/consumo-brasileiro-de-energia-eletrica-subiu-1-5-em-2022-mostra-balanco-da-ccee>
- Carvalho, L.T.F., Andrade, L.P. e da Silva, L.R.S. (2023). Impactos ambientais e climáticos da implantação de Usinas eólicas: Revisão sistemática. *Diversitas Journal*, 8(4), 2846-2856. <https://doi.org/10.48017/dj.v8i4.2495>
- Da Silva, V.P. e Galvão, M.L.D.M. (2022). Onshore Wind Power Generation and Sustainability Challenges in Northeast Brazil: A Quick Scoping Review. *Wind*, 2(2), 192-209. <https://doi.org/10.3390/wind2020011>
- Díaz-Cuevas, P., Haddad, B., e Fernandez-Nunez, M. (2021). Energy for the Future: Planning and Mapping Renewable Energy. The Case of Algeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101445. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101445>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Atlas de Eficiência Energética Brasil 2022*. EPE. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil>

- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023). BEN - *Balanco Energético Nacional 2023*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>
- Franco, R.A.M., Hernández, F.B.T. e Moraes, J.F.L. (13 ao 18 de abril de 2013). O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias na restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. Em *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. INPE. Foz do Iguaçu, Brasil.
- Gonçalves Júnior, E.R., Rangel, I.C., Tavares, A.R.T., Figueira Júnior, E.G., Erthal Junior M. e Souza, C.L.M. (2020). Multi-criteria Assessment of Potential Regions for Wind Power Generation in the State of Rio de Janeiro. *Gestão & Produção*, 27(3), e4747. <https://doi.org/10.1590/0104-530X4747-20>
- Janke, J.R. (2010). Multicriteria GIS Modeling of Wind and Solar Farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.014>
- Liu, H., Liu, Y., Wang, C., Zhao, W. e Liu, S. (2021). Landscape Pattern Change Simulations in Tibet Based on the Combination of the SSP-RCP Scenarios. *Journal of Environmental Management*, 292(112783). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112783>
- Malczewski J. (2006). GIS-based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Mokarram, M., Pourghasemi, H.R. e Mokarram, M.J. (2022). A Multi-criteria GIS-based Model for Wind Farm Site Selection with the Least Impact on Environmental Pollution Using the OWA-ANP Method. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 43891-43912. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18839-2>
- Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y. e Rosso, D. (2020). Multi-criteria Decision Support System for Wind Farm Site Selection and Sensitivity Analysis: Case Study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>
- Rekik, S. e El Alimi, S. (2024). A Spatial Perspective on Renewable Energy Optimization: Case Study of Southern Tunisia Using GIS and Multicriteria Decision Making. *Energy Exploration & Exploitation*, 42(1), 265-291. <https://doi.org/10.1177/01445987231210962>
- Roscher, B., Mortimer, P., Schelenz, R., Jacobs, G. e Baseer, A. (2020). Optimizing a Wind Farm Layout Considering Access Roads. *Journal of Physics Conference Series*, 1618(4), 042014. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1618/4/042014>
- Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process—What it is and How it is Used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T.L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- Saaty, T.L. (2005). The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-making. Em J. Figueira, S. Grec e M. Ehrgott (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the art surveys* (pp. 345-405). Kluwer Academic Publishers.
- Santos, A.Á.B., Camargo, O., Back, A., Silva, F., Catani, F., Estante, F. e Neves, P.R.F. (2013). *Atlas eólico Bahia*. SEINFRA.
- Smallwood, K.S. e Bell, D.A. (2020). Effects of Wind Turbine Curtailment on Bird and Bat Fatalities. *Journal of Wildlife Management*, 84(4), 681-690. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21844>
- Turkovska, O., Castro, G., Klingler, M., Nitsch, F., Regner, P., Soterroni, A.C. e Schmidt, J. (2021). Land-use Impacts of Brazilian Wind Power Expansion. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024010. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd12f>
- USAID (2009). *Elementos para la promoción de la energía eólica en México*. U.S. Agency for International Development and PA Government Services.
- Wang, S., Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S. e Pei, F. (2017). A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94-116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>