ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DAS MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DA TERRA NA CAATINGA POTIGUAR COM A IMPLANTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS: UM ESTUDO DE CASO DO MUNICIPIO DE LAJES - RN

Georg Herison Maia Nunes[1], *Yves Pablo Costa Rego*[2], *Leandro Magno Santos da Motta Filho*[3], *Melquisedec Moreira*[4] *e Kátia Alves Arraes*[5]

[1]Bolsista PIBIC-INPE, georg.nunes@inpe.br, [2] Bolsista PIBIC-INPE, yves.costa@inpe.br , [3]Bolsista PIBIC-INPE, leandro.magno.conectelab@imd.ufrn.br, [4]Pesquisador do INPE/Coordenação Espacial do Nordeste, melquisedec.moreira@inpe.br e [5]Tecnologista do INPE/Coordenação Espacial do Nordeste, katia.arraes@inpe.br

RESUMO

O Estado do Rio Grande do Norte (RN) tem enfrentado grandes transformações com a instalação de parques eólicos em seu território, se destacando o Município de Lajes, que consta como a segunda maior cidade do RN com presença eólica. Para acompanhar as transformações decorrentes da distribuição desses parques e sua interação com o bioma Caatinga disposta em toda a área estudada, foi utilizada a Classificação LULC(*Land Use Land Cover*) aliada ao algoritmo *Random Forest* para gerar mapas temáticos e dados acerca do uso e ocupação do solo. Diante disso, foi realizado um estudo comparativo entre cenas capturadas em 2019 e 2024. A análise concluiu que houve uma supressão da vegetação em várias áreas pelo território de Lajes, e que apesar dos benefícios advindos da presença dessas usinas, é necessária uma análise aprofundada acerca dos espaços que serão implantados os parques, para assim, reduzir os impactos ocasionados pelo desmatamento e um aproveitamento otimizado do solo.

Palavras-chave – Random Forest, Classificação LULC, Caatinga, eólico, solo.

ABSTRACT

The State of Rio Grande do Norte (RN) has been undergoing significant transformations with the establishment of wind farms within its territory, notably in the Municipality of Lajes, which ranks as the second largest city in RN in terms of wind energy presence. To monitor the changes resulting from the distribution of these wind farms and their interaction with the Caatinga biome throughout the studied area, LULC (Land Use Land Cover) Classification was applied in combination with the Random Forest algorithm to generate thematic maps and data on land use and coverage. Consequently, a comparative study was conducted between scenes captured in 2019 and 2024. The analysis concluded that there was vegetation suppression in various areas across Lajes, and that despite the benefits brought by these wind farms, a thorough assessment of the locations planned for new wind parks is necessary. This would help reduce the impacts caused by deforestation and ensure optimized land use.

Key words – *Random Forest, LULC Classification, Caatinga, wind power, soil.*

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Norte (RN) nos últimos anos tem sido um dos protagonistas na implantação de energias renováveis em seu território [1]. Um dos motivos para isso são suas características naturais, como sua privilegiada posição geográfica no extremo leste do continente sul-americano, onde há uma confluência de ventos alísios [2], que possibilitam a emancipação do Estado na produção de energia eólica. Assim, esse território de posição ideal, com ventos de intensidade e qualidade promissores, se tornou um lugar atrativo para a vinda de multinacionais do ramo energético e para parcerias público-privado, estabelecendo municípios como polos eólicos.

A instalação de parques eólicos foi uma das formas encontradas de aproveitar as vantagens naturais desse território. Com isso, é gerada a energia eólica, que é considerada limpa [3] e contribui para diminuir [4] ou suprir [5] a dependência dos combustíveis fósseis para a produção de energia. Os próprios parques, por sua vez, geram empregos, movimentando a economia dos locais em que são instalados [5].

No entanto, apesar desses benefícios, o Rio Grande do Norte também tem sofrido grandes transformações com a instalação dos parques eólicos em seu território. Essas áreas afetadas sofreram visíveis transformações em um curto período, reconfigurando paisagens, interferindo no bioma nativo da Caatinga e impactando os moradores situados nas regiões em que foram distribuídas as usinas eólicas. [6]

O bioma Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro e acomoda ampla biodiversidade, com a existência de espécie endêmicas e vegetação adaptada ao clima semiárido, o que desencadeia em longos períodos de estiagem entre os meses de Junho a Dezembro. Esse bioma dispõe-se pelo território do Rio Grande do Norte ocupando cerca de 95% de seu território [7], sendo de suma importância para a população Nordestina em diversas esferas, incluindo a socioeconômica, ambiental e demográfica.

É notório que a Caatinga enfrenta processos de desertificação e degradação do solo [8–10], um fenômeno natural que tem se intensificado nos últimos anos pela intervenção humana nas regiões que o bioma está presente.

Diante da importância ambiental e socioeconômica da Caatinga e as transformações constantes ocasionadas pela intervenção humana, urge a necessidade de monitorar e registrar as rápidas mudanças terrestres que o bioma enfrenta

ao longo do tempo. Para isso, uma maneira acessível de realizar o acompanhamento das transformações do solo, é a classificação LULC, que gera mapas temáticos categorizados a partir das classes pré-estabelecidas. Assim, é possível realizar analises rápidas, eficientes e comparativas acerca dos impactos sofridos na área de estudo em que a vegetação se dispõe ao realizar um comparativo temporal entre os locais já mapeados.

Nesse contexto, é adotada a classificação LULC, que a partir da manipulação da imagem de um município capturada através de técnicas de Sensoriamento Remoto, pelo satélite *Sentinel-2*, possibilita, o treinamento do modelo que irá gerar mapas temáticos baseados nos dados rotulados e índices espectrais de cada pixel da imagem. Essa técnica é possível ser aplicada devido ao algoritmo de *Machine Learning Random Forest*, que desempenha seu papel baseado em uma floresta de árvores de decisão.

Dessa maneira, o estudo teve como objetivo trazer uma perspectiva acerca dos impactos e transformações em áreas compreendidas pelo bioma Caatinga afetadas pela injeção de usinas eólicas em determinados períodos. Nessa circunstância, sendo possível realizar o comparativo devido aos dados e mapas temáticos das áreas afetadas geradas pela classificação LULC. Assim, pode-se então contribuir na fomentação de políticas públicas e no desenvolvimento de práticas de manejo ambiental sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O estudo teve como base o território referente ao município de Lajes, localizado no Estado do Rio Grande do Norte (RN) (Figura 1). O município de Lajes possui uma área territorial aproximada de 676 km², localizado no Alto Oeste. Referente ao período de 2024, Lajes é a segunda cidade do RN com maior índice de parques eólicos implantados [11]. Dessa forma, Lajes foi selecionado para este estudo devido as grandes transformações territoriais e impactos detectados na região através da classificação LULC e em uma análise comparativa durante os últimos 5 anos, de 2019 a 2024.

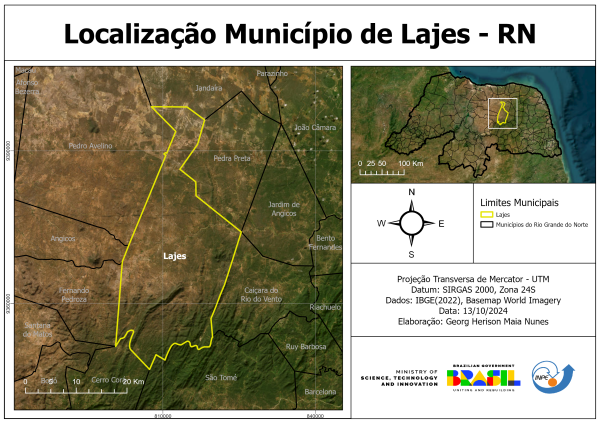


Figura 1: Mapa de Localização do município de Lajes.

2.2. Metodologia

Para a realização do estudo foram utilizadas duas cenas referentes aos anos de 2019 e 2024 obtidas a partir do satélite *Sentinel-2*, onde as etapas do processo de classificação foram realizadas na plataforma de processamento geoespacial em nuvem *Google Earth Engine* (GEE). As imagens capturadas pelo satélite através de técnicas de sensoriamento remoto e disponibilizadas na plataforma, foram filtradas baseado na área de estudo e o determinado período temporal referente a estiagem da Caatinga que acontece de Julho a Dezembro, ou seja, o período com menor incidência de nuvens na região.

Além disso, não obstante a escolha do período com baixa incidência de nuvens, foi preciso introduzir um filtro de cobertura máxima de nuvens com o objetivo de facilitar o processo percorrido para a obtenção de imagens satisfatórias. Existiram casos em que as cenas obtidas não alcançaram os parâmetros de satisfação e qualidade estabelecidos, normalmente devido a presença de oclusões visuais, assim, necessitou-se da manipulação de algoritmos de mascaramento de nuvem para a obtenção de uma cena que compreendesse os padrões de qualidade para a classificação. Quando obtida a imagem, foram calculados os índices espectrais, e adicionadas bandas extras de elevação e declividade, de modo a facilitar a classificação de áreas com altitudes semelhantes.

A partir do conjunto de dados resultantes das etapas anteriores, foram inseridos pontos de treinamento e validação de acordo com a classes temáticas previamente estabelecidas: uso agrícola e pastagem, corpo d'água, solo exposto, área urbana, vegetação aberta, vegetação densa e construções eólicas, que serviram de base para treinar o modelo a partir do aprendizado de máquina *Random Forest*, dessa forma, gerando um mapa temático decorrente da classificação LULC.

Não obstante, os dados coletados através dos pontos de validação foram introduzidos em uma matriz de confusão e adotou-se o coeficiente *Kappa* para obter-se uma resposta acerca da acurácia da classificação. Assim, utilizando os mapas temáticos obtidos referentes a cada período situado nos anos de 2019 e 2024, foi realizada uma análise comparativa visual e quantitativa relacionada aos dados obtidos após a classificação para evidenciar os impactos e transformações causados pela instalação de usinas eólicas na região.

A Figura 2 descreve a metodologia do estudo em um fluxograma.

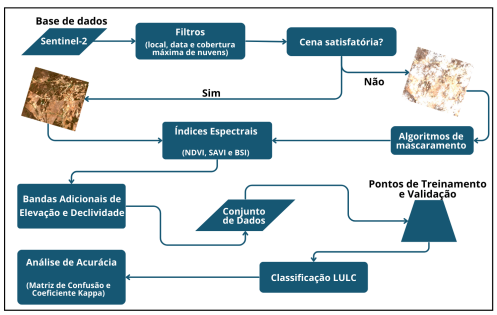


Figura 2: Fluxograma da metodologia adotada no estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 exibe um comparativo de cenas de satélite de Lajes referentes a 2019 e 2024. Nessa figura, é visível a aparição de linhas contínuas e padronizadas com coloração esbranquiçada. Esse padrão distribuído pelo território de Lajes corresponde aos parques eólicos introduzidos na região.

Na Figura 3 e na Figura 4, a qual exibe os resultados das classificações LULC das duas cenas, foram demarcadas 6 zonas de interesse que caracterizam terrenos tomados pelos parques eólicos.

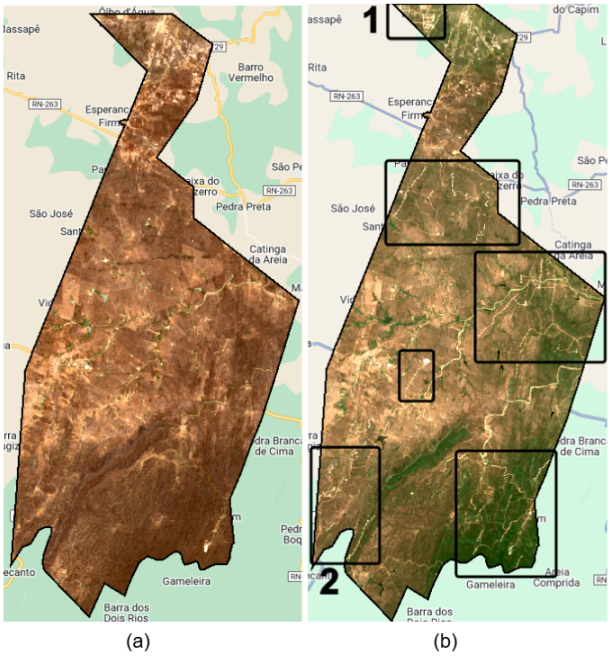


Figura 3: Cenas de Lajes em 2019 (a) e 2024 (b). Demarcação na zona superior de Lajes (1) e na zona inferior (2).

Notoriamente, as cenas expostas na Figura 3 demarcam diferenças visíveis no comportamento da vegetação. Isso se deve parcialmente à variação da pluviometria nos anos em que as cenas foram capturadas, constatada na Tabela 1, e à capacidade de regeneração da Caatinga quando em contato com as chuvas.

Lajes	Posto	Precipitação (mm)
2019	Olho D'Água Dois Irmãos	597.2
2024	Olho D'Água Dois Irmãos	785.6

Tabela 1: Tabela relativa à precipitação acumulada por estação de coleta em Lajes - RN [12].

Além desse comportamento natural da vegetação, também é possível observar a supressão da vegetação presente no território de Lajes ocasionada pela implantação de parques eólicos, principalmente nas áreas demarcadas em retângulos.

Nota-se que essas alterações também ocorreram em pontos importantes para a dinâmica cultural e ecológica da região: a zona inferior "(2)", destacada nas Figuras 3 e 4, corresponde parcialmente à Serra do Feiticeiro, habitat de diversas espécies em risco de extinção e coberta pela Caatinga.

Além da presença de usinas eólicas, observa-se, na zona "1", localizada ao norte, uma ampla área de solo exposto,

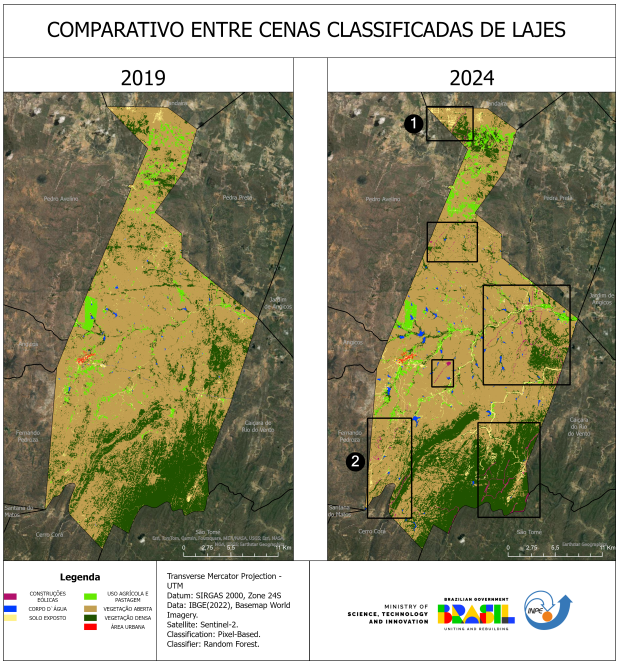


Figura 4: Cenas de Lajes após Classificação LULC em 2019 e 2024. Demarcação na zona superior de Lajes (1) e na zona inferior (2).

correspondente ao início da implantação de uma usina fotovoltaica. Neste estudo, optou-se por incluir as demais categorias de usinas na classe de solo exposto, criando uma categoria específica apenas para as usinas eólicas. Essa abordagem permite contabilizar a presença dessas estruturas enquanto mantém visível o impacto na supressão da vegetação da Caatinga.

Os resultados obtidos para o estudo através da classificação e quantificados através do *Random Forest* revelaram uma diminuição das classes referentes à vegetação ao realizar o comparativo entre as cenas de 2019 e 2024, corroborando a análise visual das cenas.

A cena de Lajes em 2019 constava com 68,9% do seu território correspondente a Vegetação Aberta e 26% a Vegetação Densa. Em comparação, a cena capturada em 2024 registrou uma queda percentual para 65,3% de Vegetação Aberta e 25,6% de Vegetação Densa em seu território, perdendo aproximadamente um total de 4% da extensão nas classes de vegetação.

A classe de usinas eólicas ocupou cerca de 0,9% do território total em 2024, enquanto o solo exposto cresceu de 1% para 2,8% entre 2019 e 2024, aproximando-se de um crescimento relativo de cerca de 180% em 5 anos.

As acurácias obtidas para as classificações das cenas de 2019 e 2024 podem ser observadas na Tabela 2, junto com seus coeficientes Kappa respectivos.

Lajes	Acurácia da Classificação	Coeficiente Kappa
2019	0.9236641221374046	0.8840015053239768
2024	0.9182692307692307	0.8913763046132814

Tabela 2: Tabela referente a acurácia das classificações realizadas nas cenas de Lajes em seus respectivos anos.

4. CONCLUSÕES

A classificação LULC demonstrou-se eficaz para mapear as mudanças decorrentes do uso e ocupação do solo na área em que se dispõe o bioma Caatinga. Assim, permitiu-se realizar comparativos temporais efetivos e obter dados concisos para o estudo. Os resultados alcançados demonstraram grandes transformações e impactos em diversas regiões que compõem Lajes a partir da distribuição de usinas eólicas.

É notório que a instalação de complexos eólicos traz investimentos e muda a dinâmica econômica dos municípios que se instalam. Contudo, é imprescindível uma análise aprofundada por parte do órgãos públicos reguladores com relação a impactos e consequências que podem acontecer a partir de transformações em um curto espaço de tempo, principalmente nas áreas de vegetação nativa da Caatinga.

5. REFERÊNCIAS

[1] L. C. S. Silva R. L. P. Teixeira, E. M. S. Dias and Z. S. Pessoa. Olhares sobre a expansão das energias renováveis no rio grande do norte: entre conflitos, controvérsias e possibilidades. *Geographia Opportuno Tempore*, 10(1):e49704, 4 2024.

[2] Governo do Estado do Rio Grande do Norte. *Atlas eólico e solar do Estado do Rio Grande do Norte*. ISI-ER, Natal, Rio Grande do Norte, 2022.

[3] M. D. de Aquino M. V. S. Rodrigues and A. C. F. Thomaz. Análise da eficiência na produção de energia eólica nos principais estados brasileiros produtores, por meio da aplicação de análise por envoltória de dados. *Revista Tecnologia*, 36(1 e 2):18–33, dec 2015.

[4] A. C. Alves S. S. da Silva and Â. M. C. Ramalho. Energia eólica e complementaridade energética: estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região nordeste do brasil. *Qualitas Revista Eletrônica*, 19(3):53, 6 2020.

[5] M. Simas and S. Pacca. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, 27(77):99–116, 2013.

[6] C. Brannstrom A. Gorayeb and A. J. de A. Meireles. *Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil*. Coleção Estudos Geográficos da UFC. Edições UFC, Fortaleza, 2019.

[7] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Brasil em síntese: Território, 2024. Acesso em: 28 out. 2024.

[8] S. M. G. L. Montenegro. Desertificação no brasil: a exploração não planejada dos recursos naturais e as mudanças climáticas acarretam danos irreversíveis ao meio ambiente. *Ciência e Cultura*, 75(4):Oct./Dec., 2023.

[9] R. C. Artigas B. I. Souza and E. R. V. de Lima. the caatinga and desertification. *Mercator*, 14(1):131–150, 4 2015.

[10] M. A. de Araújo J. J. A. Alves and S. do Nascimento. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga*, 2009.

[11] Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Norte (FIERN). Mapa das energias renováveis, 2024. Acesso em: 28 de outubro de 2024.

[12] Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Relatório pluviométrico - precipitação acumulada, 2024. Dados consultados para os anos de 2019 e 2024. Disponível em: https://meteorologia.emparn.rn.gov.br/relatorios/relatorios-pluviometricos. Acesso em: 31 out. 2024.