

POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE DO NORDESTE SOBRE AS AVES MIGRATÓRIAS

Fábio Tadeu Côrtes Morais¹
Amilcar Baiardi²

RESUMO: Considerando a expansão dos parques eólicos offshore no Nordeste brasileiro, este estudo avalia o uso de sensoriamento remoto e inteligência artificial para monitorar os impactos ambientais, especialmente sobre aves migratórias. A metodologia inclui levantamentos de Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental sobre parques eólicos da região, revisão da literatura científica, análise do estado da arte das tecnologias de monitoramento e descrição das técnicas de sensoriamento e inteligência artificial aplicáveis. Resultados indicam alta precisão (99,93%) na identificação de espécies por sensoriamento remoto e 87% de acurácia em modelos de IA, como YOLOv5, sugerindo potencial para monitoramento ambiental com menor custo e alta confiabilidade.

Palavras-chave: Energia Eólica Offshore. Monitoramento Ambiental. Aves Migratórias. Sensoriamento Remoto. Inteligência Artificial. Impacto Ambiental.

ABSTRACT: Considering the expansion of offshore wind farms in the Brazilian Northeast, this study evaluates the use of remote sensing and artificial intelligence to monitor environmental impacts, especially on migratory birds. The methodology includes surveys on Environmental Impact Studies and Reports on wind farms in the region, a comprehensive review of scientific literature, analysis of the state of the art of monitoring technologies and description of applicable sensing and artificial intelligence techniques. Results indicate high precision (99.93%) in species identification by remote sensing and 87% accuracy in AI models, such as YOLOv5, suggesting potential for environmental monitoring with lower cost and high reliability.

5210

Keywords: Offshore Wind Energy. Environmental Monitoring. Migratory Birds. Remote Sensing. Artificial Intelligence. Environmental Impact.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas marinhos do Nordeste brasileiro, que abrigam manguezais, recifes de coral e diversas espécies migratórias, enfrentam o desafio da expansão da energia eólica offshore. Este desenvolvimento, embora promissor, pode impactar habitats sensíveis e rotas migratórias de aves marinhas. Estima-se que a capacidade eólica offshore da região alcance 3

¹Mestrando em planejamento, território e meio ambiente pela UCSAL.

²Professor Dr. da Universidade Católica do Salvador- UCSAL.

TW, com produção média anual superior a 14.800 TWh, atraindo crescente interesse e projetos de expansão. No entanto, a implementação desses parques exige avaliações ambientais rigorosas.

O Nordeste brasileiro destaca-se no cenário energético por seu potencial eólico offshore excepcional. De acordo com Gorayeb et al. (2022), a região possui capacidade estimada de 3 TW, com possibilidade de produção média anual de eletricidade superior a 14.800 TWh nas plataformas de águas rasas. Este potencial tem atraído interesse crescente do setor energético, resultando em um aumento significativo de projetos em fase de licenciamento ambiental, especialmente no estado do Ceará (XAVIER et al., 2023). No entanto, a implementação destes projetos requer uma avaliação criteriosa dos impactos ambientais.

A instalação de parques eólicos offshore pode trazer impactos aos ecossistemas marinhos, afetando habitats como recifes de coral e rotas de aves migratórias. Xavier et al. (2023) destacam efeitos sobre ecossistemas únicos, como tapetes de ervas marinhas, e mudanças nas rotas migratórias da avifauna. Além disso, a pesca artesanal, que sustenta muitas famílias, enfrenta potenciais impactos com mudanças na circulação marinha e restrições de acesso a áreas de pesca." (GRAY et al., 2005). Diante deste contexto, é pertinente avaliar como a literatura científica tem abordado os impactos ambientais dos parques eólicos offshore no Nordeste brasileiro, em especial com relação as aves migratórias, bem como prospectar se existem novas tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial que possa dar base científica no monitoramento destes impactos;

5211

A metodologia inclui revisão da literatura científica sobre o assunto, levantamentos de Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental sobre parques eólicos da região, análise do estado da arte das tecnologias de monitoramento e descrição das técnicas de sensoriamento e inteligência artificial aplicáveis. Como resultado serão fornecidos subsídios para pesquisadores e gestores ambientais na tomada de decisões informadas sobre o desenvolvimento energético e a conservação ambiental.

2. ECOSSISTEMAS MARINHOS NO NORDESTE BRASILEIRO

Os ecossistemas marinhos do Nordeste brasileiro representam uma das regiões mais biodiversas e ecologicamente relevantes do Atlântico Sul. Esta área abriga uma variedade de habitats críticos, incluindo a segunda maior área de manguezais do mundo (SPALDING et al., 2010), a maior extensão de recifes de coral do Atlântico Sul (LEÃO et al., 2019) e vastas pradarias

de fanerógamas³ marinhas, cuja extensão ainda é subestimada (COPERTINO et al., 2016). A complexidade destes ecossistemas é evidenciada pela presença de bancos de rodolitos⁴, os mais extensos do planeta (AMADO-FILHO et al., 2012). Esta diversidade de ambientes suporta uma rica fauna marinha, incluindo espécies migratórias de grande porte como mamíferos, aves marinhas e tartarugas, cujas áreas de reprodução, alimentação e berçário são cruciais para sua conservação.

Os meios ambientes da costa nordestina apresentam uma rica biodiversidade e desempenham um papel crucial na manutenção do equilíbrio ecológico da região. Ela é caracterizada por uma variedade de habitats, incluindo recifes de coral, manguezais e extensas áreas de planície costeira, que abrigam uma diversidade de espécies marinhas e terrestres. Esses ecossistemas são interconectados e influenciados por fatores como correntes oceânicas, regimes de marés e padrões climáticos sazonais. Os manguezais, por exemplo, atuam como berçários naturais para diversas espécies de peixes e crustáceos, além de fornecerem proteção contra erosão costeira e servirem como sumidouros de carbono (MEIRELES et al., 2016). Os recifes de coral, por sua vez, abrigam uma variedade de organismos marinhos e desempenham um papel importante na proteção da costa contra a ação das ondas, em especial aqueles localizados na Baía de Todos os Santos, no estado da Bahia, onde enfrentam problemas decorrentes do aquecimento global e acidificação dos oceanos que afetam estes ecossistemas. De um modo geral, essas perturbações têm resultado em uma perda de biodiversidade local e impactado os estoques pesqueiros, que são vitais para as comunidades de pesca artesanal da região (PRISCILLA et al., 2019). O desequilíbrio ecológico causado por estas pressões tem favorecido a proliferação de

³ Fanerógamas, também conhecidas como plantas com sementes ou espermatófitas, são um grupo de plantas vasculares que produzem sementes. O termo "fanerógama" vem do grego e significa literalmente "casamento visível", referindo-se ao fato de que seus órgãos reprodutivos são facilmente observáveis, em contraste com as criptógamas (como musgos e samambaias). As fanerógamas incluem duas grandes divisões: 1. Gimnospermas: plantas com sementes nuas, não encerradas em frutos. Exemplos incluem pinheiros e icadáceas. 2. angiospermas: plantas com flores e sementes protegidas dentro de frutos. Esta é a divisão mais diversa e abundante de plantas terrestres. No contexto marinho, quando falamos de "fanerógamas marinhas", estamos nos referindo especificamente a um grupo de angiospermas que evoluiu para viver totalmente submersas em ambientes marinhos. Estas plantas, muitas vezes chamadas de "gramas marinhas", formam pradarias submarinas que são ecossistemas cruciais em muitas áreas costeiras, incluindo o Nordeste brasileiro.

⁴ Rodolitos são estruturas marinhas biogênicas formadas por algas vermelhas calcárias de crescimento livre. Estas algas da ordem Corallinales depositam carbonato de cálcio em suas paredes celulares, criando nódulos ou ramificações de formas variadas, geralmente arredondadas ou irregulares. Encontrados em águas rasas a moderadamente profundas das plataformas continentais, os rodolitos desempenham um papel ecológico crucial, formando habitats complexos que suportam alta biodiversidade marinha. AMADO-FILHO et al. (2012) destacam a presença do mais extenso banco de rodolitos do mundo no Nordeste brasileiro, enfatizando sua importância como "biofábricas" de carbonato de cálcio. Estes bancos contribuem significativamente para os ciclos biogeoquímicos oceânicos, capturando e armazenando carbono, além de fornecerem substrato duro em áreas predominantemente arenosas ou lamosas, aumentando assim a complexidade do habitat marinho.

certas espécies, como o zoantídeo *Palythoa cf. variabilis*⁵, que ameaça as principais espécies formadoras de recifes. Por outro lado, os manguezais, embora não sejam o foco principal do estudo de PRISCILLA et al. (2019), desempenham um papel crítico na manutenção da saúde dos ambientes marinhos, incluindo os recifes de coral. Eles atuam como filtros naturais de poluentes e fornecem abrigo para uma variedade de espécies marinhas, incluindo peixes, crustáceos e aves. A importância destes ecossistemas se estende além de suas fronteiras imediatas, influenciando a produtividade marinha em uma escala regional e contribuindo para a resiliência costeira contra erosão e eventos climáticos extremos.

A região costeira do Nordeste também é reconhecida como uma importante rota de migração para diversas espécies de aves. Conforme destacado por Nascimento (2021), no litoral da Paraíba as aves são provenientes do hemisfério norte, como o maçariquinho e a andorinha de bando, bem como para espécies consideradas visitantes ocasionais, como as araras. Além disso, espécies do Hemisfério Sul, como a arribaçã, também utilizam a região em seus deslocamentos migratórios através do bioma caatinga. Essa diversidade de rotas migratórias ressalta a importância da costa nordestina como um corredor ecológico para diferentes espécies de aves.

O litoral brasileiro, incluindo a costa nordestina, compõe a Rota Atlântica de migração de aves costeiras, com diversos sítios-chave utilizados como áreas de invernagem ou pontos de parada, adjacentes às áreas com potencial eólico offshore. Exemplos notáveis incluem as praias arenosas do Ceará e Rio Grande do Norte, que desempenham um papel fundamental na manutenção dessas populações de aves migratórias (BUGONI et al., 2022). Além disso, a Área de Proteção Ambiental (APA) do Manguezal da Barra Grande, localizada no município de Icapuí, no extremo leste do Estado do Ceará, é reconhecida como um importante ponto de parada para aves limícolas, tendo sido classificada desde 2017 pela Western Hemisphere Shorebird Reserve Network (WHSRN) como um stopover de importância regional (BUGONI et al., 2022).

⁵ O zoantídeo *Palythoa cf. variabilis* é uma espécie de cnidário marinho pertencente à ordem Zoantharia. Este organismo forma colônias incrustantes em substratos duros em ambientes marinhos rasos, como recifes de coral. O termo "cf." na nomenclatura indica uma incerteza na identificação exata da espécie, sugerindo que é muito similar ou próxima à espécie *Palythoa variabilis*. Como outros membros do gênero *Palythoa*, esta espécie possui tentáculos ao redor da boca para capturar alimento e pode conter palitoxina, uma potente toxina marinha. Sua presença em ecossistemas marinhos contribui para a biodiversidade e complexidade estrutural dos recifes, podendo servir como um indicador das condições ambientais locais.

3. POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE (PEO) NO NORDESTE BRASILEIRO



Figura 2 - Projeto Eólico Offshore. Fonte: Petrobrás.

A região Nordeste do Brasil apresenta um elevado potencial para o desenvolvimento de energia eólica *offshore*, devido às suas características geográficas e condições climáticas favoráveis oeste. Neste sentido, o Nordeste se destaca como uma área promissora para a expansão deste modal, devido às suas condições favoráveis de vento e características geográficas. Ortiz e Kampel (2011) identificaram três regiões de alta magnitude de vento no Brasil, com destaque para a margem de Sergipe e Alagoas, e a costa do Rio Grande do Norte e Ceará. Essas áreas apresentam uma média da magnitude do vento offshore variando entre 7 e 12 m/s, com valores máximos próximos à costa de Sergipe e Alagoas. Essa combinação de fatores ambientais e potencial energético cria um cenário complexo para o desenvolvimento sustentável na região.

O potencial energético em questão, no Nordeste brasileiro, tem sido objeto de diversos estudos e análises. Gorayeb et al. (2022) destacam que a costa tropical nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país possui um alto potencial, estimado em cerca de 3 TW, com mais de 14.800 TWh de produção média anual de eletricidade para as plataformas de águas rasas viáveis. Esse potencial é particularmente notável quando consideramos a velocidade do vento, a profundidade da plataforma e a distância da costa. A Empresa Pública Brasileira de Pesquisa Energética (EPE) apontou em 2020 a existência de um potencial técnico de aproximadamente

700 GW em locais de até 50 m de profundidade e vento de até 100 m de altura. Comparativamente, a região Nordeste se destaca em relação a outras regiões costeiras do país, com os estados de Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará apresentando um maior potencial. Martins (2024) ressalta que o Nordeste combina ventos com velocidade, constância e direção adequadas, além de possuir águas relativamente rasas e proximidade com grandes centros consumidores de energia. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) corrobora essa informação, indicando que o Nordeste brasileiro possui alguns dos melhores índices de capacidade eólica do mundo, tanto *onshore* quanto *offshore*.

O desenvolvimento da energia eólica offshore no Nordeste brasileiro, embora promissor, apresenta desafios significativos relacionados aos impactos ambientais, que serão avaliados a seguir.

4. IMPACTOS AMBIENTAIS DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NA COSTA NORDESTINA

A implementação destes complexos na costa nordestina, embora promissora do ponto de vista energético, requer uma análise cuidadosa dos potenciais impactos ambientais, conforme tabela abaixo⁶:

5215

Quadro 1 – Impactos Ambientais Em Parques Eólicos baseado no Termo de Referência do IBAMA para Complexos Eólicos Marítimos

Impacto Ambiental	Descrição	Medida Mitigadora
Ruídos subaquáticos	Afeta peixes, mamíferos marinhos e tartarugas.	Modelagem de emissões sonoras, controle de vibrações e limitação da intensidade de ruídos durante operações.
Turbidez da água	Aumenta durante dragagem, afetando organismos aquáticos e atividades pesqueiras.	Monitoramento e controle da pluma de turbidez, uso de barreiras de contenção.
Mortandade de aves e quirópteros (morcegos)	Risco de colisões com pás das turbinas.	Monitoramento, uso de sistemas de detecção de fauna e paralisação temporária das turbinas.
Impacto visual	Alteração da paisagem, afetando áreas turísticas.	Determinar distanciamento mínimo da costa com base em estudos, e uso de cores que minimizem o impacto visual.
Interferência em rotas de navegação e pesca	Geração de áreas de exclusão e restrição.	Definir rotas alternativas de navegação, e distanciamento de áreas de pesca artesanal.

⁶ Disponível em https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2020-11-TR_CEM.pdf

Interferência em rotas de migração	Afeta mamíferos marinhos, aves e peixes migratórios.	Definir layout das turbinas para evitar corredores migratórios importantes.
Geração de resíduos sólidos	Resíduos gerados nas fases de construção e operação.	Implementar plano de gerenciamento de resíduos sólidos, com reciclagem e descarte adequado.
Efluentes líquidos	Poluição por efluentes gerados durante a instalação e operação.	Implementar sistemas de tratamento e controle de efluentes.
Luminosidade artificial	Afeta padrões de comportamento de fauna, como aves e tartarugas marinhas.	Controle da intensidade e direcionamento da iluminação artificial, conforme legislação específica.
Alteração de habitats bentônicos	Impacto sobre as comunidades bentônicas (organismos no fundo do mar).	Monitoramento ambiental prévio e recuperação de áreas degradadas.
Campos eletromagnéticos	Efeitos sobre espécies sensíveis, como tartarugas e peixes.	Implementar medidas de mitigação para minimizar a emissão de campos eletromagnéticos, como isolamento adequado.

Fonte: IBAMA.

Um dos aspectos mais relevantes a ser considerado e que vai ser o objeto deste artigo, é o efeito dessas estruturas nas rotas migratórias de aves marinhas e costeiras. Como destacado por Amaral (2021), o Nordeste do Brasil possui duas rotas principais de migração: a rota Nordeste e a rota Atlântica Ocidental, esta última abrangendo as regiões costeiras do país. A instalação de turbinas eólicas offshore pode representar obstáculos físicos e alterar os padrões de voo dessas aves, potencialmente impactando suas rotas migratórias e áreas de alimentação. O banco dos Cajuais, por exemplo, reconhecido como o banco de algas mais expressivo do Ceará, desempenha um papel crucial na alimentação da fauna marinha, incluindo diversas espécies de aves limícolas⁷ (MEIRELES et al., 2006; MEIRELES et al., 2016). A presença de torres eólicas *offshore* nessa região poderia afetar a disponibilidade de alimento e os padrões de uso do habitat por essas aves. Além disso, os maçaricos e batuíras, que geralmente permanecem no Brasil de setembro a maio, formando bandos mistos de milhares de indivíduos na região da APA do Manguezal da Barra Grande para descanso e alimentação (ICMBIO, 2019), poderiam ser particularmente vulneráveis a essas alterações no ambiente marinho. Portanto, é essencial que o planejamento e a implementação de projetos eólicos offshore na costa nordestina levem

5216

⁷ Aves limícolas são espécies que vivem e se alimentam em áreas úmidas como praias, mangues e lagoas. Elas têm bicos e pernas compridas, que usam para buscar pequenos invertebrados enterrados na lama ou areia. Estas aves ajudam a indicar a qualidade ambiental dos ecossistemas costeiros.

em consideração esses aspectos ecológicos, buscando minimizar os impactos sobre as populações de aves migratórias e os ecossistemas marinhos locais.

No Termo de Referência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) traz como forma de mitigação deste impacto, a definição dos *layout* das turbinas como forma de evitar os corredores de animais marítimos, em especial aves, peixes migratórios e mamíferos marinhos. Contudo torna-se necessário um monitoramento de maior escopo da avifauna migratória costeira. É o que iremos tratar no próximo tópico.

5. SENSORIAMENTO REMOTO NA COSTA NORDESTINA COMO FORMA DE REDUÇÃO DE IMPACTOS EM AVES MIGRATÓRIAS



5217

Figura 2 - Migração das aves: uma das grandes maravilhas da natureza. **Fonte:** NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL

O sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta promissora para o monitoramento da fauna marinha e aves na Costa Nordeste. Esta tecnologia se destaca por sua capacidade de coletar dados da superfície terrestre sem causar perturbações aos animais estudados, uma característica decisiva para pesquisas em ambientes sensíveis como o litoral. Os avanços tecnológicos mais recentes nesta metodologia permitem realizar levantamentos a partir de longas distâncias, utilizando sistemas de sensores altamente sensíveis que possibilitam a aquisição de imagens com alta resolução espacial, mesmo em condições de baixa visibilidade, uma característica particularmente relevante para o monitoramento costeiro, onde as condições climáticas podem variar significativamente.

A tecnologia envolve um sistema sofisticado de imageamento aéreo. Segundo Bakó et al. (2014), o processo utiliza câmeras digitais calibradas de alta velocidade, capazes de realizar exposições de até 1/8000s e produzir 5-7 disparos por segundo. Esta configuração permite mapear a superfície no espectro eletromagnético visível com resolução espacial de até 0,5 cm, sem necessidade de integração temporal ou compensação de movimento frontal. O sistema opera em altitudes de até 800 metros em condições climáticas favoráveis, embora em clima úmido seja recomendável voar mais baixo para manter a qualidade da imagem.

O levantamento aéreo é realizado utilizando aeronaves especialmente modificadas para missões de sensoriamento remoto, como o Piper PA-32 Cherokee Six 300, que oferece estabilidade mesmo em velocidades de 285 km/h. A aeronave é equipada com dois sistemas de câmeras voltados para baixo e detectores adicionais podem ser instalados nas janelas laterais. O sistema elétrico modificado inclui um gerador auxiliar e baterias de armazenamento adicionais, fornecendo até 24V para operação dos instrumentos. Esta configuração permite cobrir grandes áreas em curto período, minimizando a possibilidade de movimentação dos animais entre as linhas de voo.

A capacidade das imagens aéreas de cobrir extensas áreas de estudo em um único levantamento representa uma vantagem significativa para o monitoramento de populações marinhas. Esta característica permite registrar todos os animais presentes em uma determinada região simultaneamente, oferecendo uma visão abrangente da distribuição e densidade populacional. A metodologia demonstrou alta precisão no reconhecimento e contagem de diferentes espécies de aves, alcançando uma taxa de confiabilidade de 99,93% para algumas espécies, um resultado que sugere grande potencial para aplicação no monitoramento de espécies típicas da costa nordestina.

5218

O processamento das imagens envolve técnicas fotogramétricas avançadas, incluindo ortorretificação após triangulação em bloco e extração do modelo de terreno. O mosaico de ortoimagens é criado através de orientação direta e medição de pontos de controle geodésico, equalização de feixe, extração do modelo digital de terreno, reprojeção de imagens e mosaicagem final. A precisão geométrica do sistema permite um erro máximo de posicionamento de apenas 8 cm, suficientemente preciso para identificação e contagem de indivíduos.

Para maximizar a eficácia dos levantamentos, é recomendado realizar as observações durante o entardecer, quando o movimento das aves é naturalmente reduzido e elas tendem a

permanecer em suas colônias. A altitude de voo aproximada de 800 metros mostrou-se ideal para não perturbar os animais, permitindo observações mais naturais de seu comportamento. Esta abordagem não invasiva é particularmente importante para estudos em áreas sensíveis ou protegidas, como unidades de conservação marinha.

O monitoramento efetivo requer uma abordagem sistemática e repetitiva. Os levantamentos devem ser conduzidos múltiplas vezes durante o período reprodutivo, pois uma única observação pode não capturar toda a população de uma colônia. A recomendação é realizar pelo menos três levantamentos em dias consecutivos para obter dados mais precisos sobre o número de indivíduos. Esta metodologia pode ser especialmente útil para monitorar espécies migratórias ou que apresentam padrões sazonais de ocupação do território.

A interpretação das imagens pode ser realizada em diferentes resoluções espaciais, permitindo a identificação precisa de diferentes espécies. Por exemplo, garças-brancas-grandes podem ser identificadas com certeza em resoluções de 2,5 cm, enquanto gaivotas necessitam de resolução de 2 cm para identificação precisa das marcações das asas. O sistema permite ainda o mapeamento da vegetação e do habitat, contribuindo para uma compreensão mais ampla da ecologia das espécies estudadas. Esta metodologia apresenta uma taxa de confiabilidade superior a 99% para a maioria das espécies estudadas, demonstrando seu potencial para aplicação em programas de monitoramento da biodiversidade costeira.

5219

A aplicação desta tecnologia na Costa Nordeste pode representar um avanço significativo nas práticas de conservação e manejo da fauna marinha. O método permite não apenas a contagem e identificação de espécies, mas também o estudo de padrões comportamentais e uso do habitat. A capacidade de realizar levantamentos sistemáticos sem perturbação física do ambiente oferece novas possibilidades para o monitoramento de longo prazo de populações animais em áreas costeiras, contribuindo para a compreensão das dinâmicas populacionais e para o desenvolvimento de estratégias mais efetivas de conservação.

6. IA APLICADA AO MONITORAMENTO AMBIENTAL NO NORDESTE

O monitoramento ambiental por radar na região Nordeste pode ser implementado com a integração de sistemas de inteligência artificial. No Brasil, diversos órgãos são responsáveis pelo monitoramento ambiental no Nordeste, com destaque para o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Chico Mendes de

Conservação da Biodiversidade (ICMBio), que atuam em nível federal (ICMBIO, 2023; MMA, 2023). Além disso, cada estado possui seu próprio órgão ambiental, como o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) na Bahia (INEMA, 2023).

O sistema NEXRAD⁸, utilizado inicialmente nos Estados Unidos, serve como base metodológica para o desenvolvimento de técnicas adaptadas às condições brasileiras. De acordo com Mead, Paxton e Sonda (2023), este sistema permite observar grandes aglomerados de aves durante sua migração, identificando pontos de parada e padrões de movimento. A adaptação desta tecnologia para o contexto do Nordeste brasileiro considera particularidades como a presença de rotas migratórias específicas e características atmosféricas locais.

Para complementar o monitoramento por radar, são utilizados diversos satélites. Entre os principais estão o *Landsat*, amplamente utilizado para mapeamentos temáticos e monitoramento ambiental, e os satélites da família SPOT⁹, que operam com sensores ópticos em bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (EMBRAPA, 2023a; EMBRAPA, 2023b). Além disso, o satélite Meteosat é empregado para o monitoramento atmosférico de uma ampla região, incluindo o Nordeste brasileiro (APAC, 2023).

O processamento destes dados, antes realizado manualmente por técnicos especializados, agora conta com algoritmos de aprendizado de máquina que identificam padrões em varreduras de radar, reduzindo o tempo de análise e aumentando a precisão das observações.

5220

A implementação de redes neurais profundas baseadas na arquitetura Faster R-CNN representa um avanço no processamento de dados de radar meteorológico. Cheng et al. (2021) demonstram que estes modelos incorporam informações espaciais e temporais, permitindo distinguir ecos biológicos de não biológicos com maior precisão. Os resultados obtidos por Perez et al. (2023) indicam um aumento na precisão média de detecção de 47,0% para 54,7% após a inclusão de dados temporais. Esta melhoria possibilita o monitoramento mais preciso

⁸ O NEXRAD (Next Generation Weather Radar), de acordo com a NOAA (https://www.weather.gov/jetstream/how_nexrad), é uma rede que compreende 154 estações de radar em todo os Estados Unidos, cada uma gerando centenas de varreduras volumétricas diárias. O sistema utiliza tecnologia Doppler para monitorar condições atmosféricas e movimentação de objetos no ar, incluindo a observação da migração de pássaros ao identificar grandes aglomerados de aves se aproximando e descendo em pontos de parada durante suas rotas migratórias. Este sistema é considerado referência para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento ambiental por radar, embora o grande volume de dados gerado represente um desafio para a análise manual, motivando a implementação de soluções baseadas em IA.

⁹ A família de satélites SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) é uma série de satélites de observação da Terra de alta resolução, desenvolvida pela agência espacial francesa CNES. Lançada em 1986, a série SPOT opera com sensores ópticos capazes de capturar imagens nas bandas do visível e infravermelho. Estes satélites são amplamente utilizados para mapeamento, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e planejamento urbano, oferecendo resolução espacial que varia de 2,5 a 20 metros, dependendo do modo de operação e da geração do satélite.(AIRBUS, 2023)

das espécies migratórias que utilizam a costa nordestina como rota, auxiliando na preservação destes corredores ecológicos e na compreensão dos impactos das estruturas eólicas offshore sobre os padrões de voo.

O desenvolvimento de algoritmos específicos para as condições do Nordeste considera fatores como alta nebulosidade e características próprias da fauna local. Mead et al (2007) documentam a aplicação de diferentes algoritmos - florestas aleatórias, máquinas de vetores de suporte e redes neurais - na classificação de alvos de radar. Estes métodos apresentam alta precisão na identificação de aves, embora a diferenciação entre espécies ainda requeira conjuntos de dados de treinamento mais robustos. A integração destes sistemas com dados históricos da região¹⁰ permite criar modelos mais adaptados às condições locais, melhorando a eficácia do monitoramento ambiental.

A evolução dos sistemas de monitoramento incorporou recentemente o modelo YOLOv5, que segundo Gopalakrishnan et al. (2024), alcança precisão superior a 87% na identificação de espécies. Esta tecnologia auxilia especialmente no acompanhamento de espécies ameaçadas, complementando os dados de radar com análise visual. Dwivedi et al. (2023) ressaltam que esta abordagem permite avaliar o sucesso das estratégias de conservação através do monitoramento contínuo das populações.

5221

As perspectivas futuras do monitoramento ambiental no Nordeste apontam para a integração de múltiplas fontes de dados. Feng et al. (2024) demonstram que as redes neurais convolucionais profundas, combinadas com técnicas de *transfer learning*, oferecem novas possibilidades para o reconhecimento de espécies. Esta integração tecnológica permite criar um sistema mais abrangente de monitoramento, essencial para a preservação da biodiversidade regional em face das mudanças ambientais e do desenvolvimento da energia eólica offshore.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo avaliou se os estudos sobre impactos ambientais de parques eólicos offshore sobre aves migratórias no Nordeste brasileiro poderiam ser mais eficientes na eventualidade de utilizarem sensoriamento remoto e inteligência artificial. A metodologia utilizada permitiu uma abordagem direcionada, integrando o conhecimento teórico existente com as tecnologias

¹⁰ A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é responsável pela coleta e manutenção de dados históricos ambientais da região Nordeste, fornecendo uma base sólida para essas análises (SUDENE, 2023).

de ponta para o monitoramento ambiental. A revisão bibliográfica forneceu o embasamento teórico para a pesquisa, enquanto a análise das tecnologias permitiu avaliar seu potencial para melhorar a mensuração dos impactos deste modal energético. A revisão bibliográfica direcionada à aplicação dessas tecnologias contribuiu para a identificação de soluções práticas para a conservação da biodiversidade marinha.

O objetivo central deste artigo foi destacar o potencial de novas tecnologias para subsidiar as avaliações e monitoramento de impactos ambientais dos parques eólicos *offshore* sobre aves migratórias no Nordeste brasileiro. Uma revisão da literatura científica sobre o tema informa que tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial podem ser ferramentas essenciais nesse processo. Buscou-se sintetizar o conhecimento existente, e propor direções para futuras investigações, fornecendo subsídios para pesquisadores, gestores ambientais e tomadores de decisão no setor energético. A pergunta guia para elaboração do artigo foi: Qual é a eficácia do uso combinado de sensoriamento remoto e IA na detecção precoce de impactos sobre a biodiversidade marinha em áreas próximas a parques eólicos *offshore* no litoral nordestino? Tentando responder a essa pergunta, o estudo procura contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a conservação da avifauna marinha em regiões com crescente desenvolvimento de energia eólica *offshore*.

5222

Os resultados obtidos demonstram o potencial do uso combinado de sensoriamento remoto e IA para o monitoramento e mitigação dos impactos desses complexos energéticos sobre aves migratórias. Como já informado, o sistema de imageamento aéreo a 800m de altitude alcançou uma taxa de confiabilidade de 99,93% na identificação de espécies, permitindo um monitoramento não invasivo de grandes áreas. Por sua vez as redes neurais Faster R-CNN e o modelo YOLOv5 apresentaram alta precisão na detecção e identificação de espécies, processando eficientemente grandes volumes de dados de radar. A identificação de áreas críticas, como o Banco dos Cajuais (CE) e a APA do Manguezal da Barra Grande, como importantes pontos para aves migratórias, reforça a importância do monitoramento nessas regiões. Essas informações contribuem para a gestão ambiental, fornecendo dados precisos para a tomada de decisão, bem como para o desenvolvimento de estratégias para a redução dos impactos dos parques eólicos em rotas migratórias. O estudo sugere a viabilidade da aplicação dessas tecnologias para a conservação da biodiversidade em áreas de expansão da energia eólica *offshore*. O que seria um avanço do conhecimento sobre os impactos de parques eólicos *offshore* na avifauna, oferecendo ferramentas tecnológicas para o monitoramento e a mitigação desses

impactos. Apesar dos resultados promissores que o levantamento apontou, algumas limitações devem ser consideradas, como a necessidade de aprimoramento dos algoritmos de IA para lidar com condições climáticas adversas e a disponibilidade de dados de alta resolução para áreas extensas. Sugere-se que em trabalhos futuros sobre a investigação da influência de variáveis ambientais, como ventos e correntes marítimas, no comportamento das aves e levem em consideração a existência dessas ferramentas de sensoriamento remoto e IA. Caso isso possa acontecer, a realização de estudos de longo prazo permitirá avaliar a eficácia das medidas de mitigação implementadas e o desenvolvimento de modelos preditivos para auxiliar na tomada de decisão em relação à localização e operação de parques eólicos offshore, minimizando os impactos sobre as aves migratórias.

REFERÊNCIAS

AMADO-FILHO, Gilberto M. et al. Rhodolith beds are major CaCO_3 bio-factories in the tropical South West Atlantic. **PloS one**, v. 7, n. 4, p. e35171, 2012. Disponível em <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035171>. Acesso em: 15 Out. 2024.

AMARAL, L. N. de S. **Conhecimento ecológico de marisqueiras sobre a dieta de aves limícolas migratórias em Icapuí (Estado do Ceará, Nordeste do Brasil)**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas). Disponível em <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/60446>. Acesso em: 15 Out. 2024.

5223

AIRBUS. Satellite imagery: SPOT 6/7. 2023. Disponível em: <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/spot-6-7/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

APAC. Satélites. 2023. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/sobre-meteorologia/113-sobre-meteorologia/508-satelites>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. **Ecological Monographs**, v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011.

BRINK, T. S. T.; DALTON, T. Perceptions of Commercial and Recreational Fishers on the Potential Ecological Impacts of the Block Island Wind Farm (US). **Frontiers in Marine Science**, v. 5, p. 1–13, nov. 2018.

BAKÓ, G.; TOLNAI, M.; TAKÁCS, A. Introduction and Testing of a Monitoring and Colony-Mapping Method for Waterbird Populations That Uses High-Speed and Ultra-Detailed Aerial Remote Sensing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12828–12846, 2014. doi:10.3390/s140712828

BUGONI, L. et al. Eólicas offshore no Brasil: impactos potenciais, recomendações para o licenciamento e implicações para a conservação das aves marinhas e costeiras. In: CEMAVE.

Relatório de Áreas de Concentração de Aves Migratórias no Brasil. 4. ed. Cabedelo: CEMAVE/ICMBio, 2022. p. 137-180.

BUGONI, L. et al. Eólicas offshore no Brasil: impactos potenciais, recomendações para o licenciamento e implicações para a conservação das aves marinhas e costeiras. In: FIALHO, M. S.; GOMES FILHO, A. (Org.). **Relatório de Áreas de Concentração de Aves Migratórias no Brasil.** 4. ed. Cabedelo: CEMAVE/ICMBio, 2022. p. 137-180.

CHENG, Z. et al. AI for conservation: learning to track birds with radar. **ACM Crossroads Student Magazine**, 2021. doi: 10.1145/3466859

COPERTINO, M. S. et al. Seagrass and submerged aquatic vegetation (VAS) habitats off the coast of Brazil: State of knowledge, conservation and main threats. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, p. 53-79, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S1679-875920161036064sp2>. Acesso em 10 out. 2024

DWIVEDI, D. N.; MAHANTY, G.; DWIVEDI, V. N. Intelligent Conservation: A Comprehensive Study on AI-Enhanced Environmental Monitoring and Preservation. In: RAJAPPAN, R. C.; GANESH, N. G.; DANIEL, J.; AHMAD, A.; SANTHOSH, R. (Eds.). **The Convergence of Self-Sustaining Systems With AI and IoT.** Hershey: IGI Global, 2024. p. 215-226. DOI: 10.4018/979-8-3693-1702-0.ch011. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/intelligent-conservation/345513>. Acesso em: 12 nov. 2024.

EMBRAPA. Landsat. 2023a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 12 nov. 2024.

EMBRAPA. SPOT. 2023b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/spot>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FARRELL, P. et al. **Development of Mitigation Measures to Address Potential Use Conflicts between Commercial Wind Energy Lessees/Grantees and Commercial Fishermen on the Atlantic Outer Continental Shelf: final report on best management practices and mitigation measures.** Herndon: United States Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewal Energy Programs, 2014. 98 p. (OCS Study BOEM 2014-654).

FENG, J. et al. Utilizing deep convolutional neural networks and transfer learning for bird species recognition. **[Periódico]**, 2024. doi: 10.1117/12.3038576

GOMES, C. A. A. et al. Variação temporal da meiofauna em área de manguezal em Itamaracá - Pernambuco. **Atlântica**, v. 24, n. 2, p. 89-96, 2002.

GOPALAKRISHNAN, S. et al. Bird Species Detection Using Deep Learning Method. In: 2023 International Conference on Research Methodology in Knowledge Acquisition, Technology Enhancement and Advanced Applications (RMKATE). IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/RMKATE59243.2023.10369870. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377137006_Bird_Species_Detection_Using_Deep_Learning_Method. Acesso em: 12 nov. 2024.

.

GORAYEB, A. et al. Desafios sociais e ambientais da energia eólica offshore no Brasil. In: **Descarbonização na América do Sul: conexões entre o Brasil e a Argentina**. 2022. p. 312-328.

GORAYEB, A. et al. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. **Energy Research and Social Science**, v. 40, p. 82-88, 2018.

GRAY, T.; HAGGETT, C.; BELL, D. Offshore wind farms and commercial fisheries in the UK: A study in stakeholder consultation. **Ethics, Place and Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-140, 2005.

HARALDSSON, M. et al. How to model social-ecological systems?—A case study on the effects of a future offshore wind farm on the local society and ecosystem, and whether social compensation matters. **Marine Policy**, v. 119, p. 104031, 2020.

HERNANDEZ, M. et al. Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110994, 2021.

IBAMA. **Diretrizes para avaliação de impactos de projetos de geração de energia eólica offshore sobre a avifauna**. Brasília, 2020.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br>. Acesso em: 12 nov. 2024.

INEMA. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2023. Disponível em: <http://www.inema.ba.gov.br/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

LEÃO, Z. M.; KIKUCHI, R. K.; OLIVEIRA, M. D. The Coral Reef Province of Brazil. In: SHEPPARD, C. (Ed.). **World seas: An environmental evaluation: Volume I: Europe, the Americas and West Africa**. 2. ed. : Academic Press, 2019. p. 813-833.

LESSA, R. P. et al. Multidimensional analysis of fishery production systems in the state of Pernambuco, Brazil. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 25, n. 3, p. 256-268, 2009.

LUZ, C. D. da et al. Avaliação dos impactos ambientais em parques eólicos offshore e onshore utilizando a Matriz de Leopold. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 55, p. 206-225, 2020. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200644>

MACHADO, J. T. M.; GARCÍA, M. de A. Parques Eólicos Offshore e o Setor de Turismo & Recreação: Uma Revisão de Conflitos e Sinergias. **Revista Costas**, n. esp. 2, p. 315-332, 2021. doi: 10.26359/costas.e1521

MARTINS, C. B. V. **Simulação de Instalação de Fundações de Aerogeradores Offshore: Proposta de Método**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção). Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/60008>. Acesso em 10 out. 2024

MEAD, R.; PAXTON, J.; SOJDA, R. S. Identifying Biological Echoes in Radar Scans Using Machine Learning. 2007.

MEAD, R. et al. Radar target classification of birds using support vector machines and neural networks. *Remote Sensing of Environment*, v. 106, n. 2, p. 266-281, 2007.

MEDEIROS, C. et al. The Itamaracá estuarine ecosystem, Brazil. In: SEELIGER, U.; KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal marine ecosystems of Latin America**. Berlin: Springer, 2001. p. 71-81.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 12 nov. 2024.

MOURA, R. L. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science Advances**, v. 2, n. 4, p. 1-12, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501252>. Acesso em 10 out. 2024.

NASCIMENTO, P. C. S. **Aves migratórias do Estado da Paraíba**. Cuité: Universidade Federal de Campina Grande, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas).

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Migração das aves: uma das grandes maravilhas da natureza**. 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/animais/2021/05/migracao-das-aves-e-uma-das-grandes-maravilhas-da-natureza-entenda-esse-fenomeno>. Acesso em: 25 out. 2024.

5226

NEVES, C. F.; GUIMARÃES, R. C.; AGUILERA, L. Considerações sobre o clima de ondas na costa brasileira para o projeto e dimensionamento de parques eólicos offshore. In: CONGRESSO BRASIL WIND POWER, 2023, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Canal Energia, 2023. p. 1-14.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. In: **Oceanografia e Políticas Públicas**. Santos, 2011.

PACHECO, J. E. V. et al. O panorama atual da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 12, p. 10-26, jul. 2024.

PEREZ, G. et al. Usando informações espaço-temporais em dados de radar meteorológico para detectar e rastrear poleiros de pássaros comunitários, 2023.

PETROBRAS. **Energia eólica offshore no Brasil: conheça nossos projetos**. 2023. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/energia-eolica-offshore/acordo-equinor>. Acesso em: 25 out. 2024.

PLATIS, A. et al. First in situ evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2163, 2018.

SANTOS, S. A. **Diagnóstico socioeconômico dos pescadores artesanais de lagosta em Fortaleza, CE**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca).

SILVA, E. et al. Space-time analysis of environmental changes and your reflection on the development of phenological of vegetation of mangrove. **Journal of Agriculture and Environmental Sciences**, v. 4, n. 1, p. 245-253, 2015.

SILVA-FALCÃO, E. C.; SEVERI, W.; ARAUJO, M. E. de. Spatial-temporal variation of *Achirus* larvae (Actinopterygii: Achiridae) in mangrove, beach and reef habitats in north-eastern Brazil. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 93, n. 2, p. 381-388, 2013.

SOARES, M. de O.; XAVIER, T. Desafios Sociais e Ambientais da Energia Eólica Offshore no Brasil. In: **Descarbonização na América do Sul: conexões entre o Brasil e a Argentina**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 312-328.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SPALDING, M. D.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **World Atlas of Mangroves**. London: Earthscan, 2010.

VAN ERP, J. A. et al. A framework for post-processing bird tracks from automated tracking radar systems. **Methods in Ecology and Evolution**, 2023. doi: 10.1111/2041-210X.14249 5227

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Energia eólica offshore e pesca artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. S. (org.). **Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: Caroline Fontelles Ternes, 2020. p. 608-631.

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Parques eólicos marítimos (offshore) como fronteira energética? Impactos e sinergias com os aspectos socioambientais e a atividade pesqueira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 3, p. 11-42, 2023.

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Parques eólicos marítimos (offshore) como fronteira energética? Impactos e sinergias com os aspectos socioambientais e a atividade pesqueira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 29, n. 3, p. 11-42, 2023.

ZHANG, Y. et al. Offshore wind farm in marine spatial planning and the stakeholder's engagement: Opportunities and challenges for Taiwan. **Ocean & Coastal Management**, v. 149, 2017.