

Article

Monitoramento de Manguezais em Recuperação em Porto do Mangue-RN: Eficácia de Índices RGB e MDE em Imagens de Drone

Leonardo de França Almeida¹, Erivaldo Laurindo Gomes², Renata Ramayane Torquato Oliveira³, Miguel Ferreira Neto⁴, Rogerio Taygra Vasconcelos Fernandes⁵, Raimunda Thyciana Vasconcelos Fernandes⁶, Antônio Gustavo de Luna Souto⁷, Luiz Fernando de Sousa Antunes⁸

¹ Doutorando em Manejo de Solo e Água. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0003-0140-9927. E-mail: lfaleonardo@hotmail.com

² Doutorando em Manejo de Solo e Água. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0001-9361-6928. E-mail: Erivaldo_lgomes@hotmail.com

³ Doutora em Manejo de Solo e Água. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-7365-8271. E-mail: renataramayanet@gmail.com

⁴ Pós-doutor em fisiologia vegetal. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-5128-8230. E-mail: miguel@ufersa.edu.br

⁵ Doutor em Ciência Animal - Produção e Conservação Animal no Semiárido. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-2901-3986. E-mail: rogerio.taygra@ufersa.edu.br

⁶ Doutora em Ciência Animal - Produção e Conservação Animal no Semiárido: Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0002-8019-1227. E-mail: fernandesrtv@hotmail.com

⁷ Doutor em Fitotecnia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0003-2798-2174. E-mail: gustavo.luna@ufersa.edu.br

⁸ Doutor em Fitotecnia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. ORCID: 0000-0001-8315-4213. E-mail: fernando.ufrrj.agro@gmail.com

RESUMO

O presente estudo avaliou o uso de imagens RGB obtidas por Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) no monitoramento de manguezais em processo de recuperação ambiental, localizados em Porto do Mangue-RN. Foram aplicados seis índices espectrais (VARI, GLI, MGVRI, MPRI, RGVBI e ExG) com o objetivo de classificar as áreas em três classes temáticas: solo exposto, vegetação rasteira e vegetação arbustiva. O processamento das imagens permitiu a geração de ortofotos e Modelos Digitais de Elevação (MDE), os quais forneceram subsídios para a validação dos resultados obtidos. Os índices espectrais foram testados individualmente no software QGIS e analisados em comparação com dados de campo e o MDE. O índice Excesso de Verde (ExG) apresentou maior precisão e consistência na identificação das classes, com destaque para a vegetação arbustiva, alcançando valores muito próximos da área de referência. Os demais índices demonstraram limitações, especialmente em cenários com alta variabilidade espectral e presença de sombras e solo úmido. A utilização de imagens RGB de alta resolução associadas a índices espectrais simples revelou-se uma ferramenta acessível e eficiente para o monitoramento de áreas de mangue em regeneração, com potencial para subsidiar ações de recuperação ambiental, reflorestamento e políticas públicas de preservação. A metodologia adotada oferece suporte à gestão ambiental em contextos de recursos limitados e reforça o papel das ARPs no monitoramento de ecossistemas sensíveis.



Submissão: 21/07/2025



Aceite: 01/08/2025



Publicação: 04/09/2025





Palavras-chave: sensoriamento remoto; ecossistemas costeiros; classificação de uso e cobertura da terra; tecnologia geoespacial; planejamento ambiental.

ABSTRACT

This study evaluated the use of RGB images obtained by Remotely Piloted Aircraft (RPA) for monitoring mangroves undergoing environmental recovery, located in Porto do Mangue-RN, Brazil. Six spectral indices (VARI, GLI, MGVI, MPRI, RGVBI, and ExG) were applied with the aim of classifying the areas into three thematic classes: exposed soil, low vegetation, and shrub vegetation. The image processing allowed the generation of orthophotos and Digital Elevation Models (DEM), which provided support for validating the obtained results. The spectral indices were individually tested using QGIS software and analyzed in comparison with field data and the DEM. The Excess Green Index (ExG) showed the highest accuracy and consistency in identifying the classes, with emphasis on shrub vegetation, achieving values very close to the reference area. The other indices showed limitations, especially in scenarios with high spectral variability and the presence of shadows and wet soil. The use of high-resolution RGB imagery associated with simple spectral indices proved to be an accessible and efficient tool for monitoring mangrove areas under regeneration, with potential to support environmental recovery actions, reforestation, and public preservation policies. The adopted methodology provides support for environmental management in contexts of limited resources and reinforces the role of RPAs in monitoring sensitive ecosystems.

Keywords: remote sensing; coastal ecosystems; land use and land cover classification; geospatial technology; environmental planning

Introdução

Os manguezais são ecossistemas costeiros de grande relevância ambiental, atuando como berçários para diversas espécies marinhas e terrestres. Além disso, oferecem proteção contra erosão e tempestades (Santos et al. 2021; Souza et al. 2023). Esses ecossistemas também desempenham papel essencial no sequestro de carbono, podendo este armazenar cerca de 22,8 toneladas de carbono por ano, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Santos et al., 2019).

Apesar de sua relevância, a ação antrópica desmatamento, ocupação irregular, poluição e pesca insustentável - intensifica a degradação desses ambientes (Duarte e Rezende, 2019). Nesse contexto, o monitoramento contínuo desses ecossistemas é fundamental para garantir sua conservação e uso sustentável, permitindo a detecção precoce de alterações e a implementação de medidas de recuperação.

Os métodos de monitoramento tradicionais realizados em campo são onerosos e limitados em abrangência espacial e temporal (Gomes et al., 2024). Alternativamente, tem-se empregado imagens de satélite, que oferecem ampla cobertura espacial e permitem o monitoramento contínuo de grandes áreas ao longo do tempo, com custos relativamente reduzidos em comparação a levantamentos de campo. No entanto, essas imagens frequentemente apresentam limitações, como baixa resolução espacial e susceptibilidade a condições atmosféricas adversas, como nuvens e neblina (Santos et al., 2019).

Nesse cenário, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) surgem como uma solução tecnológica promissora, oferecendo imagens de alta resolução espacial, flexibilidade na coleta de dados e custo relativamente reduzido. Essa abordagem tem ampliado o entendimento sobre a dinâmica estrutural dos manguezais (Vikou et al. 2023).

As imagens obtidas por ARPs podem operar com diferentes sensores, sendo mais comuns os sensores RGB, que capturam informações nos espectros vermelho, verde e azul. Embora sensores multiespectrais e hiperespectrais ofereçam maior riqueza de bandas, os sensores RGB se destacam pela acessibilidade e viabilidade em projetos de monitoramento de baixo custo. Esses sensores permitem a geração de índices espectrais simples, mas eficazes, como o Excess Green (ExG) e o Vegetation Index from Visible Bands (VARI). Os índices espectrais de vegetação são fórmulas matemáticas aplicadas às bandas das imagens (normalmente vermelho, verde e azul) com o objetivo de ressaltar a presença e o vigor da vegetação nas imagens. Esses índices



auxiliam na identificação e análise da cobertura vegetal e da estrutura dos manguezais (Phinn et al. 2008; Klemas 2013; Florêncio et al. 2024).

Estudos anteriores como os de Costa et al. (2022) e Silva et al. (2024) demonstraram o potencial do uso de ARPs com sensores RGB para identificação de áreas degradadas, estágios sucessionais e processos de regeneração em ecossistemas costeiros. Essas ferramentas viabilizam a extração de informações quantitativas, superando algumas limitações dos métodos convencionais.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial do uso de imagens aéreas RGB, obtidas por ARPs, para o monitoramento de áreas de manguezal em processo de recuperação. A proposta visa identificar os melhores índices de vegetação para geração de informações que subsidiem estratégias de manejo e ações de recuperação ambiental em ecossistemas de manguezais.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo está localizada na zona rural do município de Porto do Manguê, estado do Rio Grande do Norte, Brasil, nas coordenadas geográficas $5^{\circ}10'33,83''\text{S}$ e $36^{\circ}45'36,65''\text{O}$ (Figura 1). Trata-se de um manguezal inserido em uma Área de Preservação Permanente (APP), com extensão aproximada de 2,85 hectares. O local passou por um processo de degradação ambiental devido à construção de diques e à retirada da vegetação, estando em processo de recuperação desde 2017.

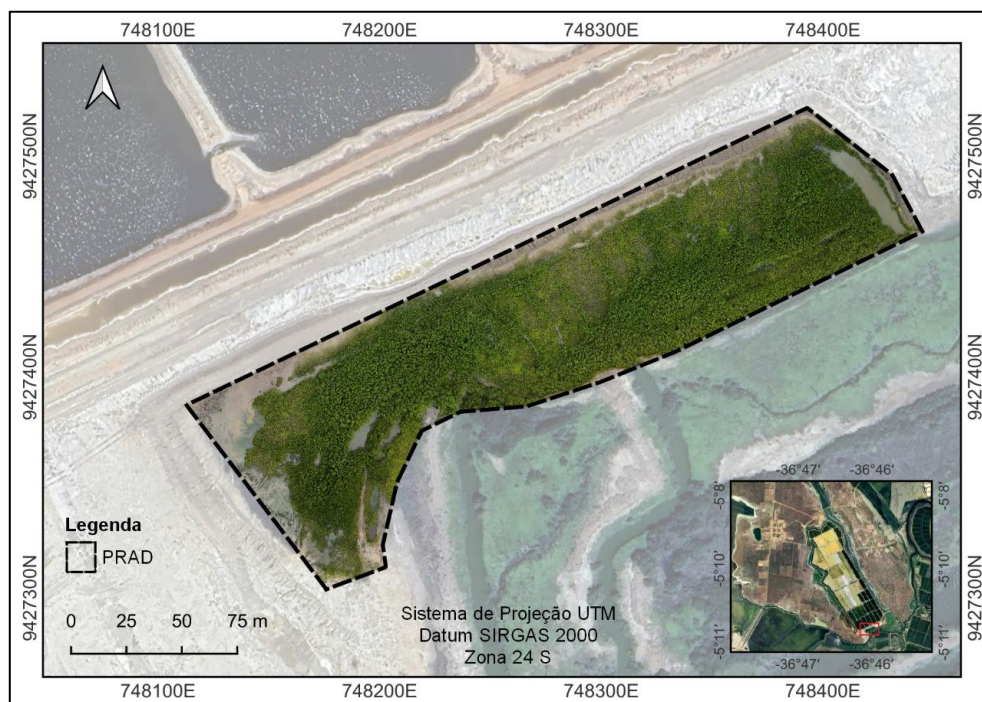


Figura 1 - Mapa de localização da área estudada. Fonte: elaborado pelos autores

Equipamentos e ferramentas utilizadas

Para a realização do levantamento das informações, foi utilizada uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) do tipo quadricóptero, modelo DJI Mavic Air 2. O processamento das imagens foi realizado em um computador com configuração intermediária, equipado com processador Intel Core i5, placa gráfica dedicada



e 8 GB de memória RAM, o que se mostrou suficiente para atender à demanda de processamento dos dados gerados.

Levantamento dos dados

O levantamento de dados foi realizado a partir de uma visita de campo e do uso de uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). A visita in loco teve como objetivo observar diretamente as condições ambientais, especialmente a distribuição da vegetação, além de permitir a coleta inicial de dados (Figura 2).



Figura 2 - Condições da vegetação da área de estudo, ângulo do registro fotográfico a) e ângulo do registro fotográfico b). Fonte: elaborado pelos autores

Na etapa de levantamento aéreo, utilizou-se o software Drone Harmony, que permite a automação do planejamento e execução dos voos (DRONE HARMONY AG 2025). Para essa operação, adotaram-se as configurações padrão do aplicativo, ajustadas conforme o perímetro da área de interesse e a altura do voo. Esta, por sua vez, foi definida considerando a presença de obstáculos e a resolução espacial desejada, já que a altura



influencia diretamente no tamanho do pixel da imagem obtida. Os parâmetros utilizados no plano de voo estão apresentados na Tabela 1

Tabela 1. Informações utilizadas no plano de voo

Parâmetros	Dados do Lev (21/01/2025)
Altura do voo	100 m
Tempo do voo	7 min
Número de imagens	98
Área mapeada	3,27 ha
Sobreposição lateral	70%
Sobreposição frontal	80%
Velocidade	7 m/s
Resolução espacial	2,00 cm/pixel

Fonte: elaborado pelos autores.

A execução do voo consistiu na montagem e verificação dos componentes da ARP, seguida da calibração e início do sobrevoos automatizado. A operação foi conduzida com o sistema de piloto automático da aeronave, que seguiu os parâmetros de rota, altitude e velocidade previamente definidos. Ao término do voo, as imagens obtidas foram processadas para a extração das informações relevantes ao estudo.

Processamento dos dados

Geração do MDE e ortofoto

Após a aquisição das imagens, iniciou-se o processamento para a geração do MDE e da ortofoto. O MDE, que representa o relevo natural do terreno, incluindo a cobertura do solo, foi fundamental para a validação da classificação espectral das áreas vegetadas, sendo um fator de referência para determinar o porte da vegetação.

A ortofoto, por sua vez, composta por bandas no espectro RGB, serviu como base para a aplicação de operações algébricas destinadas à testagem de classificações por meio de índices espectrais. A confecção desses dois produtos foi realizada no software *Agisoft PhotoScan*, seguindo os passos ilustrados no fluxograma abaixo (Figura 3).

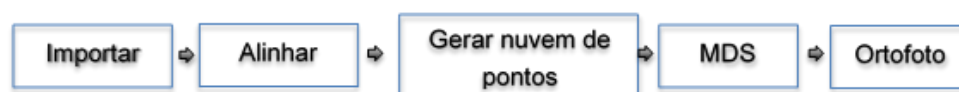


Figura 3 - Etapas que foram seguidas no Agisoft Photoscan para a confecção do MDE e ortofoto utilizando as imagens do levantamento Fonte: elaborado pelos autores.

*Índices de vegetação utilizados para a análise*

De posse da ortofoto, esta foi importada para o ambiente do software QGIS, versão 3.40.5, uma ferramenta de geoprocessamento de código aberto (QGIS 2025). No QGIS, utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator* para calcular os Índices de Vegetação (VIs) listados na Tabela 2. Esses índices foram derivados de operações matemáticas entre as bandas espectrais da ortofoto – vermelho (R), verde (G) e azul (B) –, gerando camadas raster georreferenciadas que representam distintas respostas espectrais da vegetação. Cada índice produzido foi armazenado como uma camada independente, permitindo análises espaciais e comparativas.

Tabela 2. Fórmulas dos Índices de Vegetação (VIs) calculados a partir das bandas espectrais RGB da ortoimagem

Sigla do Índice	Nome do Índice (Tradução)	Fórmula	Referência
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index (Índice de Vegetação com Ajuste para a Atmosfera)	$(G-R)/(G+R-B)$	(Gitelson et al. 2002)
GLI	Global Green Index (Índice de Verde Global)	$(2G-R-B)/(2G+R+B)$	(Louhaichi et al. 2001)
MGVRI	Modified Green-Red Vegetation Index (Índice de Vegetação Verde-Vermelho Modificado)	$(G)^2-(R)^2/(G)^2+(R)^2$	(Bendig et al. 2015)
MPRI	Modified Photochemical Reflectance Index (Índice de Reflectância Fotoquímica Modificado)	$(G-R)/(G+R)$	(Yang et al. 2008)
RGVBI	Red-Green-Blue Vegetation Index (Índice de Vegetação Vermelho-Verde-Azul)	$(R \cdot G)/B^2$	(Bendig et al. 2015)
ExG	Excess Green Index (Índice de Verde Excedente)	$2G-R-B$	(Woebbecke et al. 1995)

Fonte: elaborado pelos autores.

Classificação das imagens

Para a classificação dos dados espectrais, utilizou-se a ferramenta *r.recode* do QGIS, integrada por meio do plugin GRASS GIS. O processo teve início com a elaboração de um arquivo de regras de reclassificação no formato txt cujo conteúdo era classificado nomeado como: "valor_mínimo:valor_máximo:classe_categórica", no qual foram definidos intervalos numéricos específicos para três classes temáticas principais: (1) solo exposto/água, (2) vegetação rasteira e (3) vegetação arbustiva. Esses arquivos de regras foram importados no plugin juntamente com os respectivos índices espectrais.

Cada índice de vegetação foi processado individualmente, gerando raster categóricos, nos quais os valores contínuos originais foram convertidos em valores inteiros representativos das classes definidas. Essa etapa de



reclassificação possibilitou a conversão dos dados espectrais em informações temáticas discretas, fundamentais para as análises espaciais subsequentes e para a quantificação precisa das áreas ocupadas por cada tipo de cobertura do solo.

A eficácia dos diferentes índices foi avaliada por meio da comparação entre os resultados da classificação automatizada e os dados de verificação de campo, buscando identificar qual índice apresentou maior concordância com as condições reais observadas *in loco* e com a representação quantificada fornecida pelo MDE.

Posteriormente, empregou-se o plugin *r.report* para a geração de estatísticas descritivas referentes à distribuição espacial das classes resultantes. Essa ferramenta forneceu, para cada classe temática, informações quantitativas expressas em área absoluta (hectares) e relativa (percentual da área total), permitindo uma análise detalhada da cobertura vegetal com base em cada índice espectral aplicado.

Geração dos produtos iniciais

O processamento fotogramétrico das imagens resultou na geração do MDE e da ortofoto em composição RGB. O MDE (Figura 4) revelou variações altimétricas que oscilaram entre -3,844 m e 1,596 m, permitindo identificar zonas de maior influência das marés, correspondentes a áreas de solo exposto ou água, além de regiões mais elevadas com vegetação arbustiva

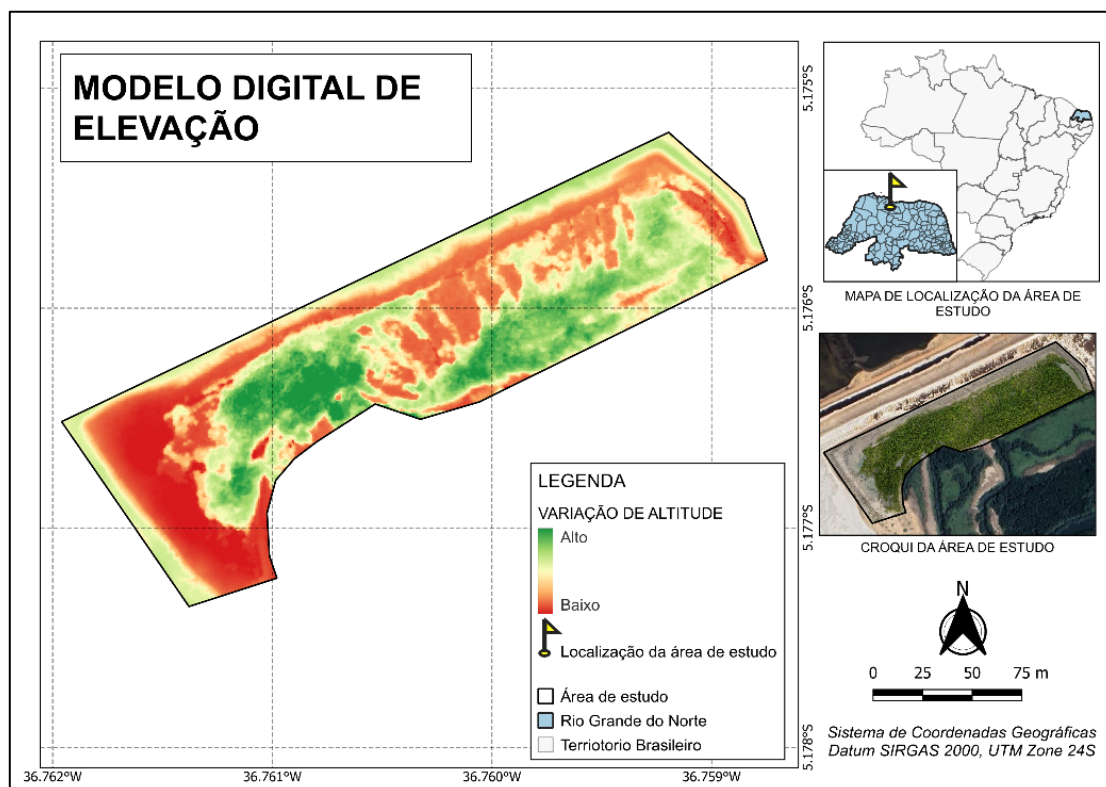


Figura 4 - Modelo digital de Elevação gerado a partir do levantamento de campo com a ARP. Fonte: elaborado pelos autores

A ortofoto RGB (Figura 5), com resolução espacial de 2 cm/pixel, proporcionou detalhamento suficiente para a distinção visual das diferentes classes de cobertura do solo. A alta definição possibilitou uma representação fiel da distribuição e da estrutura da vegetação no manguezal em processo de recuperação.

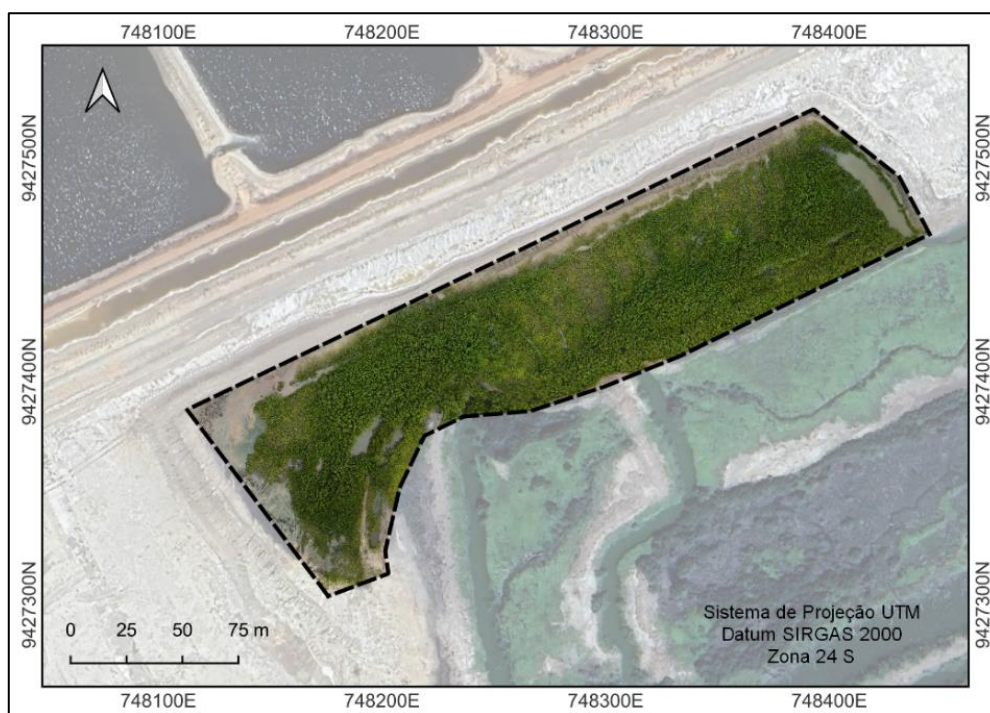
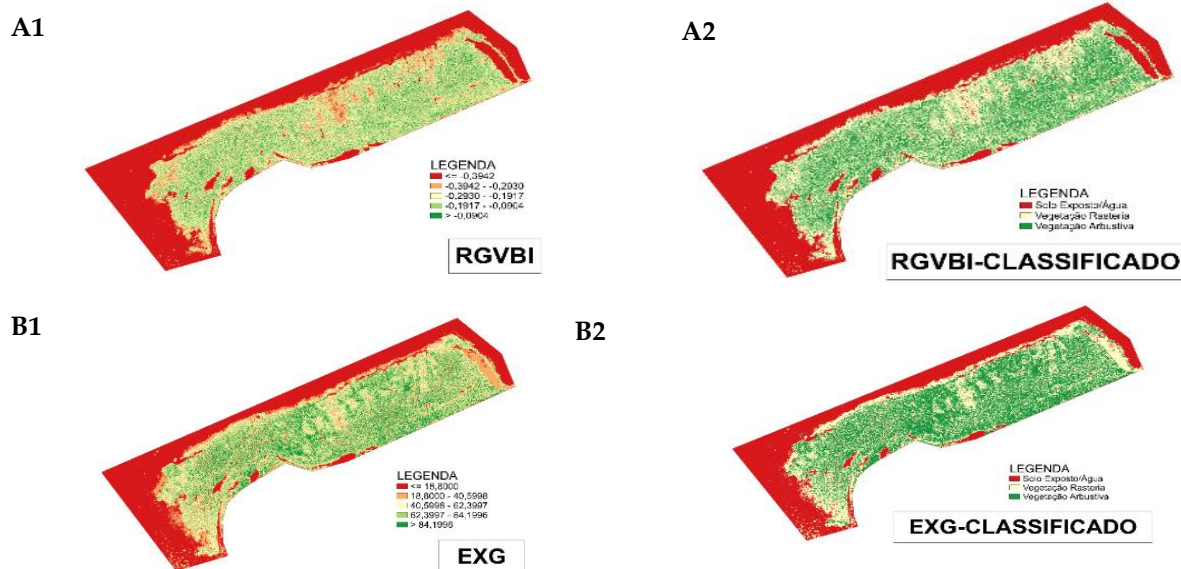


Figura 5 - Ortofoto gerada a partir do processamento dos dados levantados pela ARP. Fonte: elaborado pelos autores

Resultados e Discussão

Análise espectral e classificação da cobertura vegetal

A partir da ortofoto RGB, foram aplicados seis índices espectrais: RGVBI, ExG, GLI, MGVRI, VARI e MPRI. Cada índice resultou em um mapa temático (Figura 6), permitindo a reclassificação dos dados espectrais em três categorias principais: Solo exposto/água, vegetação rasteira e vegetação arbustiva.



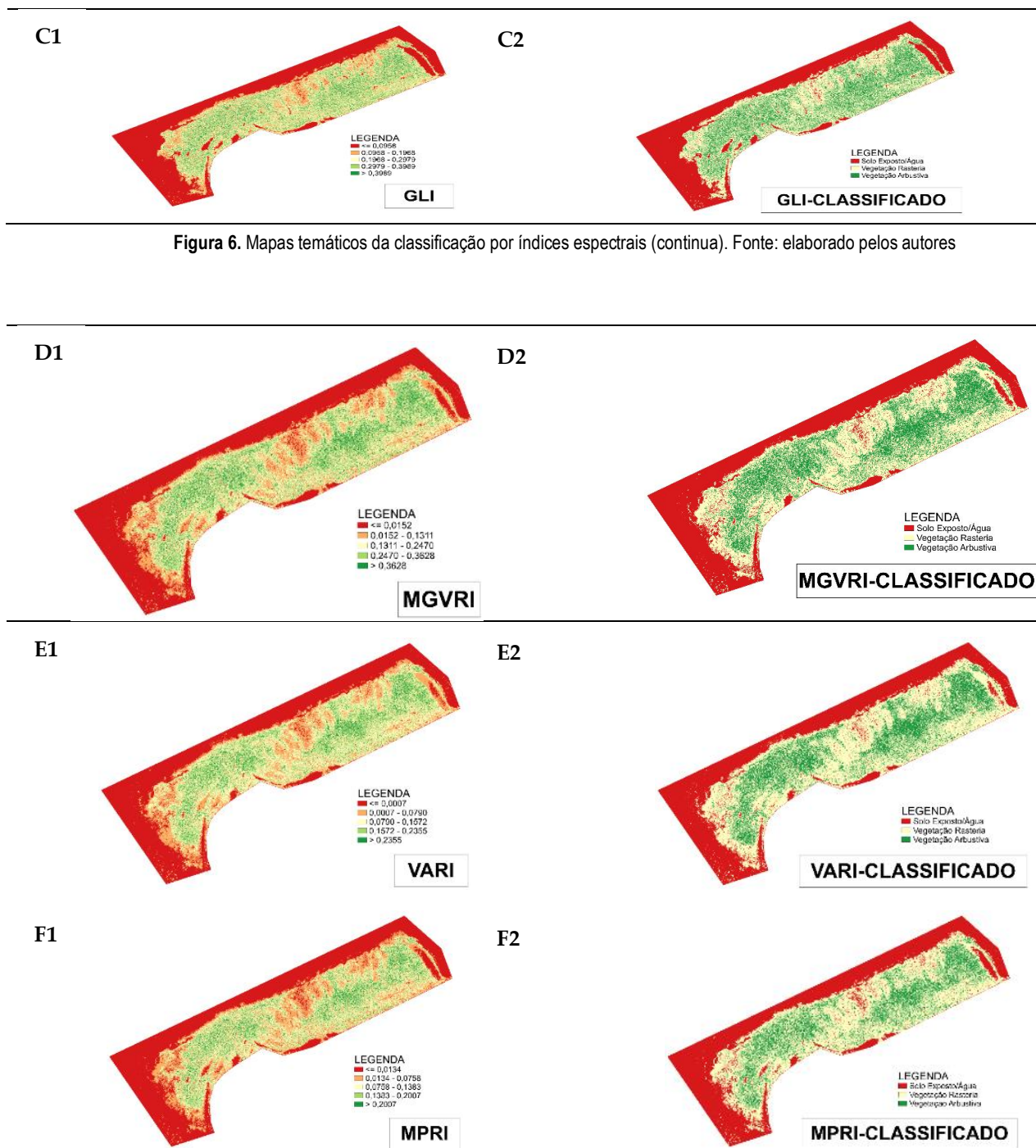


Figura 6. Mapas temáticos da classificação por índices espectrais (continua). Fonte: elaborado pelos autores

Figura 6. Mapas temáticos da classificação por índices espectrais (conclusão). Fonte: elaborado pelos autores

As regras de recodificação utilizadas para cada índice, bem como as respectivas áreas ocupadas por cada classe, estão apresentadas na Tabela 3. A distribuição das classes variou entre os índices, refletindo diferenças em sensibilidade espectral.



Tabela 3. Resumo das regras de recodificação aplicadas em cada índice e áreas contabilizadas

ÍNDICE	RECODIFICAÇÃO	ÁREA CONTABILIZADA
RGVBI	-0.6:-0.3942:1	Solo exposto: 1.041486 ha
	-0.3942:-0.1917:2	Vegetação rasteira: 1.060955 ha
	-0.1917:0.6:3	Vegetação arbustiva: 0.748046 ha
		TOTAL = 2.850486 ha
EXG	-40:18.8000:1	Solo exposto: 0.876912 ha
	18.8000:62.3997:2	Vegetação rasteira: 0.944304 ha
	62.3997:150.0000:3	Vegetação arbustiva: 1.026303 ha
		TOTAL = 2.847518 ha
GLI	-0.6:0.0958:1	Solo exposto: 1.064864 ha
	0.0958:0.2979:2	Vegetação rasteira: 1.192670 ha
	0.2979:1:3	Vegetação arbustiva: 0.592982 ha
		TOTAL = 2.850516 ha
MGVRI	-0.5:0.0152:1	Solo exposto: 1.001772 ha
	0.0152:0.2470:2	Vegetação rasteira: 1.242910 ha
	0.2470:1:3	Vegetação arbustiva: 0.605816 ha
		TOTAL = 2.850498 ha
VARI	-0.3:0.0007:1	Solo exposto: 0.954457 ha
	0.0007:0.1572:2	Vegetação rasteira: 1.326321 ha
	0.1572:1:3	Vegetação arbustiva: 0.569304 ha
		TOTAL = 2.850082 ha
MPRI	-0.6:0.0134:1	Solo exposto: 1.053004 ha
	0.0134:0.1383:2	Vegetação rasteira: 1.313892 ha
	0.1383:1:3	Vegetação arbustiva: 0.483619 ha
		TOTAL = 2.850516 ha

Fonte: elaborado pelos autores.

Validação dos resultados e análise de acurácia

A Figura 7 apresenta o mapa com a delimitação da vegetação arbustiva com base no MDE, por meio do qual foi possível calcular a extensão das áreas vegetadas com altura superior a 30 cm.

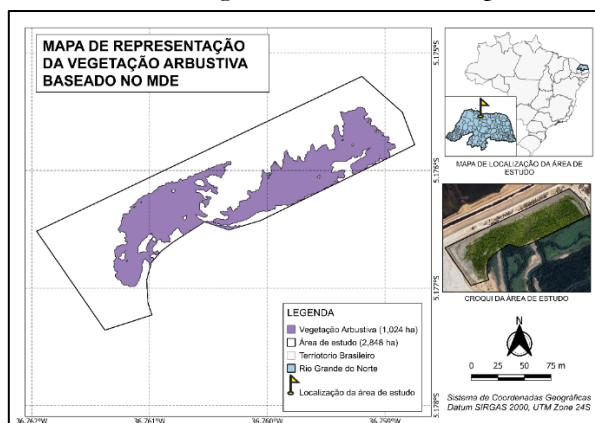


Figura 7 - Mapa de representação da vegetação arbustiva baseada no MDE. Fonte: elaborado pelos autores



A Figura 8 apresenta o mapa temático resultante da seleção manual das áreas vegetadas, com base na coloração predominante de tons esverdeados na imagem. Esse procedimento permitiu a delimitação visual das regiões com cobertura vegetal em contraste com as áreas de solo exposto. Os polígonos resultantes foram utilizados para quantificar a área vegetada, servindo como referência de validação para a comparação com os índices espectrais derivados das imagens RGB.

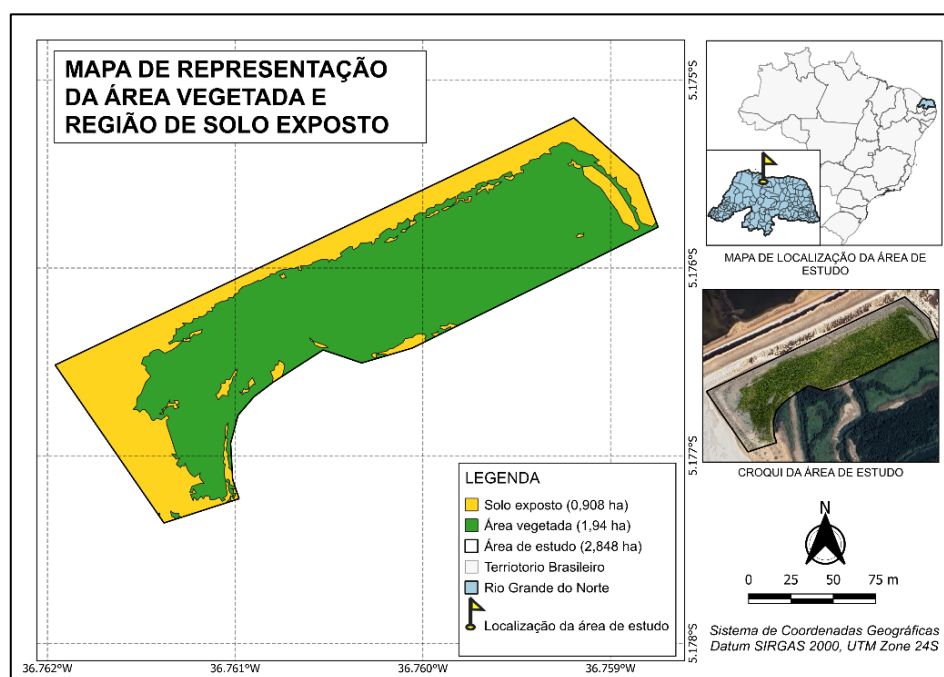


Figura 8 - Mapa de representação da área vegetada e região de solo exposto. Fonte: elaborado pelos autores

A Tabela 4 apresenta o resumo das áreas quantificadas com base no MDE e seleção manual de áreas vegetadas.

Tabela 4. Resumo de áreas quantificadas de referência

ID	CATEGORIA	ÁREA
1	Solo exposto	0,908 ha
2	Vegetação rasteira	0,916 ha
3	Vegetação arbustiva	1,024 ha

Fonte: elaborado pelos autores.

A análise comparativa evidenciou que o índice Excesso de Verde (ExG) apresentou a maior correspondência com os dados de referência, demonstrando o melhor desempenho na discriminação das classes temáticas avaliadas. Entre os índices testados, o ExG mostrou-se o mais eficiente na detecção de áreas com solo exposto, vegetação rasteira e vegetação em estágios avançados de regeneração (Figura 8).

A Tabela 5 apresenta o desempenho dos índices espectrais avaliados para as classes Solo Exposto, Vegetação Rasteira e Vegetação Arbustiva, considerando a diferença das áreas estimadas em relação às áreas de referência.

A superioridade do ExG pode estar relacionada à sua maior sensibilidade ao componente verde visível da imagem, o que favorece a discriminação de áreas com vegetação arbustiva e regeneração em estágios mais



avanzados. Como evidenciado no gráfico comparativo e na Tabela 5, o ExG foi o único índice a se aproximar dos valores de referência nas três categorias analisadas, com destaque para a vegetação arbustiva, cuja estimativa (1,026 ha) foi praticamente idêntica à área de referência (1,024 ha). Nas classes de solo exposto e vegetação rasteira, o ExG também apresentou desempenho consistente, com diferenças de apenas -0,031 ha e +0,028 ha, respectivamente, superando significativamente os demais índices.

O índice VARI, demonstrou relativa precisão na detecção de solo exposto (2º lugar, +0,046 ha de diferença), mas falhou em vegetação rasteira e arbustiva, subestimando esta última em -0,455 ha. Estudos sugerem que o VARI é sensível à interferência de sombras e umidade do solo, o que pode explicar sua inconsistência (Gitelson et al., 2002).

Já o índice RGVBI, teve desempenho mediano, com superestimativa em solo exposto (+0,133 ha) e vegetação rasteira (+0,145 ha), mas subestimou a vegetação arbustiva (-0,276 ha). Sua fórmula, baseada na razão entre bandas verde e azul, pode ser menos eficaz em cenas com alta variabilidade espectral (Lussem et al., 2002).

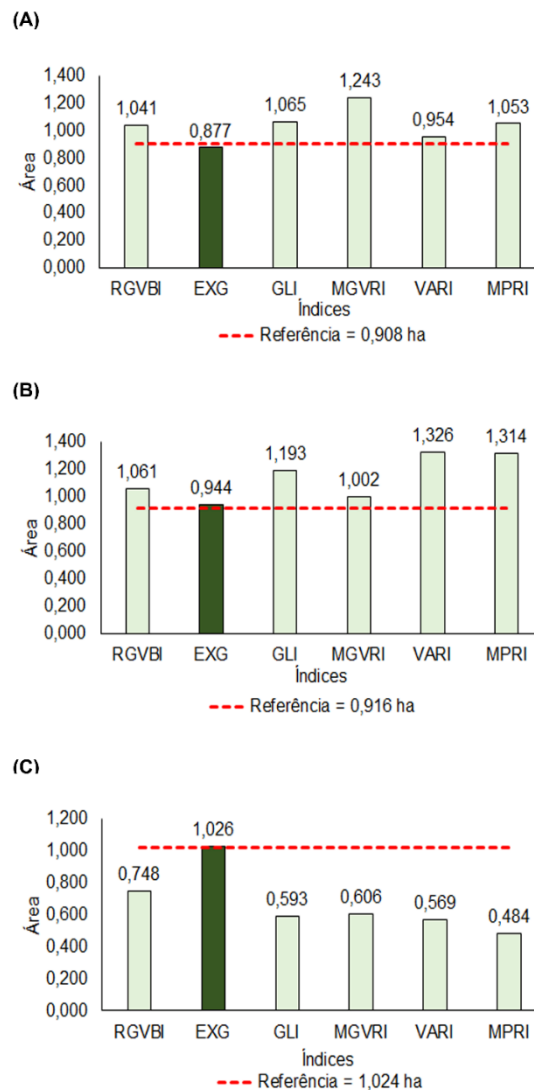


Figura 8 - Comparativo da Área Detectada por Índices em relação aos valores de referência, A) Solo exposto, B) Vegetação rasteira e C) Vegetação arbustiva.



Tabela 5. Desempenho dos índices espectrais por classe de cobertura, considerando a diferença em relação à área de referência

Classe	Posição	Índice	Valor estimado (ha)	Diferença em relação à referência (ha)
<i>Solo Exposto</i>	1º	ExG	0,877	-0,031
	2º	VARI	0,954	0,046
	3º	RGVBI	1,041	0,133
	4º	MPRI	1,053	0,145
	5º	GLI	1,065	-0,157
	6º	MGVRI	1,243	0,335
<i>Vegetação Rasteira</i>	1º	ExG	0,944	0,028
	2º	MGVRI	1,002	0,086
	3º	RGVBI	1,061	0,145
	4º	GLI	1,193	0,277
	5º	MPRI	1,314	0,398
	6º	VARI	1,326	0,410
<i>Vegetação Arbustiva</i>	1º	ExG	1,026	0,002
	2º	RGVBI	0,748	-0,276
	3º	MGVRI	0,606	-0,418
	4º	GLI	0,593	-0,431
	5º	VARI	0,569	-0,455
	6º	MPRI	0,484	-0,540

Fonte: elaborado pelos autores.

Os índices MPRI e GLI foram os piores índices para vegetação rasteira e arbustiva, variando da 4º e 5º posição em cada classe, indicando limitações com relação a sua classificação. O MPRI, que utiliza principalmente a banda do vermelho, é suscetível a ruídos espectrais que podem causar superestimação/subestimação tanto na vegetação arbustiva como na vegetação rasteira e, dificultando a distinção entre essas classes. Já o GLI, baseado nas bandas verde, vermelho e azul, pode não capturar adequadamente a variabilidade estrutural e espectral da vegetação densa, como a arbustiva, além de ser influenciado por solo exposto e variações ambientais, o que compromete sua capacidade de discriminação precisa nessas categorias, o que fez desse ocupar uma das 3 últimas posições em cada classe analisada.

Por último, o índice MGVRI, apesar de aceitável para vegetação rasteira (2º lugar, +0,086 ha), este por sua vez apresentou percentual elevado em solo exposto (+0,335 ha) e vegetação arbustiva (-0,418 ha), sugerindo baixa robustez em cenários heterogêneos.

Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram o potencial do uso de imagens RGB de alta resolução, obtidas por aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), para o monitoramento de áreas de manguezal em processo de regeneração natural. A aplicação de seis índices espectrais (VARI, GLI, MGVRI, MPRI, RGVBI e ExG) possibilitou a classificação da cobertura vegetal em três categorias temáticas — solo exposto, vegetação rasteira e vegetação arbustiva —, com desempenho variável entre os índices.



Entre os índices analisados, o Excesso de Verde (ExG) destacou-se por apresentar a maior correspondência com os dados de referência obtidos por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) e do levantamento realizado em campo. O ExG foi o único índice que melhor se aproximou dos valores de referência nas três classes temáticas, especialmente na detecção de vegetação arbustiva, com uma estimativa praticamente idêntica à área de validação. Esse desempenho reforça a sensibilidade do ExG ao componente verde das imagens, sendo especialmente útil em ambientes com vegetação em estágios intermediários ou avançados de regeneração. Os demais índices têm aplicabilidades específicas e limitações que devem ser consideradas em função do contexto ambiental e dos objetivos do estudo. A escolha do índice ideal deve priorizar não apenas a acurácia, mas também a consistência entre as classes analisadas.

A abordagem adotada neste trabalho revelou-se uma alternativa eficiente, acessível e tecnicamente viável para o monitoramento ambiental de ecossistemas sensíveis como os manguezais, especialmente em contextos com recursos limitados. As informações geradas podem subsidiar estratégias de manejo, ações de recuperação ambiental e formulação de políticas públicas voltadas à preservação de áreas costeiras.

A validação qualitativa baseada na combinação entre o Modelo Digital de Elevação (MDE), mapas temáticos e observações de campo proporcionou um grau robusto de confiabilidade aos resultados obtidos. Para fortalecer futuras análises, recomenda-se a adoção de pontos amostrais georreferenciados e validação cruzada com dados espectrais de maior resolução.

Além do valor científico, os resultados obtidos trazem implicações práticas relevantes. A metodologia proposta, baseada no uso de imagens RGB de fácil aquisição e índices espectrais simples, mostrou-se uma alternativa acessível, eficiente e tecnicamente viável para o monitoramento de áreas de manguezal em processo de regeneração. Essas informações podem subsidiar ações de reflorestamento, orientar estratégias de manejo ambiental e apoiar políticas públicas em escalas locais e regionais.

Referências

- Bendig, Juliane, Kang Yu, Helge Aasen, et al. 2015. "Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39: 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>.
- Costa, Karina Freitas, Etenaldo Felipe Santiago, e Vinicius de Oliveira Ribeiro. 2022. "Uso de imagens na avaliação ambiental e restauração em ambientes naturais". *Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente: avanços, retrocessos e novas perspectivas* 3. <https://dx.doi.org/10.37885/220408649>.
- DRONE HARMONY AG. 2025. *Automated Drone Inspections Increase Quality & Safety – Reduce Costs*. <https://www.droneharmony.com/>.
- Duarte, Thiago Lima Santana, e Viviane Almeida Rezende. 2019. "Degradação dos manguezais em Aracaju/SE(Brasil): impactos socioeconômicos na atividade de catador do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*)". *Revista Brasileira de Meio Ambiente* 7 (1).



- Florêncio, José Vinícius de Sousa, Maria do Socorro Bezerra de Araújo, Josiclêda Domiciano Galvêncio, e Rodrigo de Miranda Queiroga. 2024. “Estimativa de altura de vegetação com imagens obtidas de drone utilizando técnicas de inteligência artificial”. *Revista Brasileira de Geografia Física* 17 (5): 3736–49.
- Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, e D. Rundquist. 2002. “Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction”. *Remote Sensing of Environment* 80 (1): 76–87.
- Gomes, Maria Tereza Uille, Phamella Lorenzen, e Clarissa Bueno Wandscheer. 2024. “Carbono azul: Manglares, un potencial sumidero de carbono para América Latina y el Caribe”. *Revista Estudios Avanzados*, n° 40: 149–82. <https://doi.org/10.35588/drc5zx11>.
- Klemas, V. 2013. “Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview”. *TAYLOR & FRANCIS* 34 (18): 6286–320. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.800656>.
- Louhaichi, M, M. M. Borman, e D. E. Johnson. 2001. “Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat”. *Geocarto International* 16 (1): 65–70.
- Lussem, U, A Bolten, e M. L Gnyp. 2018. “Evaluation of rgb-based vegetation indices from uav imagery to estimate forage yield in grassland”. *Symposium “Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing”*, advance online publication. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>.
- Phinn, Stuart, Chris Roelfsema, Arnold Dekker, Vittorio Brando, e Janet Anstee. 2008. “Mapping seagrass species, cover and biomass in shallow waters: An assessment of satellite multi-spectral and airborne hyper-spectral imaging systems in Moreton Bay (Australia)”. *Remote Sensing of Environment* 112: 3413–25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.017>.
- QGIS. 2025. *Quantum GIS - A liderança do SIG de código aberto*. <https://qgis.org/>.
- Santos, Isabela Rodrigues, Norma Ely Santos Beltrão, e Ariadne Reinaldo Trindade. 2019. “CARBONO ‘AZUL’ NOS MANGUEZAIS AMAZÔNICOS: CONSERVAÇÃO E VALORAÇÃO ECONÔMICA”. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 31 (1): 18–28. <https://www.raco.cat/index.php/Revibec/article/download/361040/455862/>.
- Santos, Nayara Marques, Diógenes Félix da Silva Costa, e Luiz Antonio Cestaro. 2021. “Identificação e mapeamento dos serviços ecossistêmicos de provisão no manguezal do Rio Tijupá, Ilha do Maranhão (Região Nordeste do Brasil)”. *Revista Caminhos de Geografia* 22 (29): 276–94. https://www.researchgate.net/profile/Nayara-Santos-7/publication/349699546_identificacao_e_mapeamento_dos_servicos_ecossistemicos_de_provisao_no_manguezal_do_rio_tijupa_ilha_do_maranhao_regiao_nordeste_do_brasil/links/6053c95592851cd8ce4f8bd3/identificacao-e-mapeamento-dos-servicos-ecossistemicos-de-provisao-no-manguezal-do-rio-tijupa-ilha-do-maranhao-regiao-nordeste-do-brasil.pdf.
- Silva, Cesar, Alan D’Oliveira Correa, e Matheus Kopp Prandini. 2024. *Environmental quality monitoring of restingas in the coast of southern Brazil using high resolution images: a tool for environmental management*. 29. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220240002>.



Souza, Alane Santos, Rafael dos Santos Gonçalves, Everton Luís Poelking, Raffael de Almeida, e Sangermano. 2023. “Mapeamento dos manguezais na Baía de Todos os Santos”. *Anais do XX simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (Florianópolis-SC), 2359–62. <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.16.13.45/doc/156174.pdf>.

Vikou, Sidney Vincent de Paul, Otacílio Lopes de Souza da Paz, Daiane Maria Pilatti, e Eduardo Vedor de Paula. 2023. “Análise da Pressão Antrópica sobre Manguezais Urbanos: Subsídios à Proteção Ambiental e ao Ordenamento Territorial”. *Sociedade & Natureza* 35. <https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67515>.

Woebbecke, D. M, G. E Meyer, k Von Bargen, e D. A Mortensen. 1995. “Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions”. *Transactions of the ASAE*, 259–69.

Yang, Zhengwei, Patrick Willis, e Rick Mueller. 2008. “Impact of band-ratio enhanced awifs image to crop classification accuracy”. *National Agricultural Statistics Service Research and Development Division*, 1-20.