

NDWI derivado de VANT e satélites multiespectrais na identificação de corpos hídricos: estudo de caso em um reservatório no estado de Pernambuco

Cloves Vilas Boas dos Santos* André Luiz Santos Patriota** Bruno do Nascimento Rodrigues Soares***
Magna Soelma Beserra de Moura**** Josicléda Domiciano Galvêncio***** Pedro Lemos de Almeida Junior*****

*Pós doutorando, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), CEP: 56302-970; Petrolina-PE, Brasil, clovesvilasboas@gmail.com

**Professor, Doutor, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IF-SertãoPE), CEP: 56000-000; Salgueiro-PE, Brasil, andre.patriota@ifsertao-pe.edu.br

***Graduando em Gestão da Tecnologia da Informação, Faculdade de Ciências Aplicadas e Sociais de Petrolina, CEP: 56328-903, Petrolina-PE, bruno.do.nrs@gmail.com

****Pesquisadora, Doutora, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Agroindústria Tropical), CEP: 60511-110; Fortaleza-CE, magna.moura@embrapa.br

*****Professora, Doutora, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), CEP: 50670-901; Recife-PE, Brasil, josicleda.galvencio@ufpe.br

*****Professor, Doutor, Universidade Federal Rural de Pernambuco / Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), CEP: 56909-535; Serra Talhada-PE, Brasil, pedro.lemos@ufrpe.br

Received May-14 ; accepted July-31.

RESUMO

O sensoriamento remoto tem avançado significativamente nas últimas décadas, com aprimoramentos em sensores e plataformas de aquisição de dados, como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), que permitem monitoramento de reservatórios hídricos em alta resolução espaço-temporal. Este estudo teve como objetivo comparar o NDWI obtido a partir de imagens RGB de VANT com os índices gerados por imagens multiespectrais dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2, avaliando a aplicabilidade de câmeras convencionais no mapeamento de corpos hídricos em ambiente semiárido. O estudo foi realizado no reservatório Serra do Livramento, Cabrobó/PE. O NDWI foi calculado nas imagens do VANT, do Landsat-8 e do Sentinel-2, e foram utilizados o coeficiente de correlação de Pearson (r), o RMSE e o MAE para analisar a relação entre os dados obtidos nas diferentes plataformas. Os resultados mostraram que o NDWI derivado do VANT descreveu adequadamente alvos de água, solo e vegetação, com fortes correlações com os dados de satélite (Landsat-8: $r = 0,85$; Sentinel-2: $r = 0,71$) e com baixos valores de erro, demonstrando a eficácia das câmeras convencionais no mapeamento de corpos hídricos no semiárido.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto, Recursos Hídricos, Landsat-8, Sentinel-2, VANT.

NDWI Derived from UAV and Multispectral Satellites for Water Body Identification: A Case Study in a Reservoir in Pernambuco

ABSTRACT

Remote sensing has advanced significantly in recent decades, with improvements in sensors and data acquisition platforms, such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), enabling high spatiotemporal resolution monitoring of water reservoirs. This study aimed to compare the NDWI obtained from RGB UAV images with indices generated by multispectral images from the Landsat-8 and Sentinel-2 satellites, evaluating the applicability of conventional cameras in mapping water bodies in a semiarid environment. The study was conducted in the Serra do Livramento reservoir, Cabrobó, Pernambuco. NDWI was calculated using UAV, Landsat-8, and Sentinel-2 images, and Pearson's correlation coefficient (r), RMSE, and MAE were used to analyze the relationship between the data obtained from the different platforms. The results showed that the UAV-derived NDWI adequately described water, soil and vegetation targets, with strong correlations with satellite data (Landsat-8: $r = 0.85$; Sentinel-2: $r = 0.71$) and with low error values, demonstrating the effectiveness of conventional cameras in mapping water bodies in the semiarid region.

Key-words: Remote Sensing, Water Resources, Landsat-8, Sentinel-2, UAV.

1. Introdução

O semiárido brasileiro é uma região marcada por alta variabilidade climática, especialmente no regime de chuvas, cuja distribuição é muito irregular e resulta em longos períodos de estiagem ao longo do ano. Essa condição acentua a importância dos recursos hídricos na manutenção dos ecossistemas e no desenvolvimento socioeconômico da região (Sobral et al., 2018).

Segundo Crioni (2024), a quantidade de água disponível é uma preocupação na gestão de recursos hídricos. No entanto, métodos convencionais de medição muitas vezes se mostram insuficientes para mapeamento de grandes áreas. Nesse contexto, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa de monitoramento, pois por meio dele é possível a aquisição de informações na superfície sem o contato direto com os alvos (Rosa, 2005; Cardoso et al., 2021).

Dentre as plataformas de aquisição de dados de sensoriamento remoto, destacam-se a série de satélites Landsat, que fornecem imagens multiespectrais em faixas do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) com resolução espacial de 30 metros (Facco et al., 2021; Kaya et al., 2023). De forma complementar, tem o satélite Sentinel-2, que disponibiliza imagens com resolução espacial de até 10 metros (EMBRAPA, 2024).

Apesar da qualidade dos produtos orbitais mencionados, suas limitações em termos de resolução espacial, interferência atmosférica e periodicidade podem comprometer a precisão na análise de áreas pequenas, como reservatórios hídricos de médio porte (Gomes et al., 2021). Diante disso, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) vêm sendo adotados como uma solução para aquisição de imagens de alta resolução espacial em menor escala, permitindo maior controle sobre altitude, frequência de imageamento e área de cobertura (Sampaio et al., 2020; Oliveira et al., 2020).

Os VANTs têm se destacado em aplicações ambientais devido à sua flexibilidade e precisão, oferecendo detalhamento superior dos alvos na superfície. Entretanto, a maioria deles utilizam câmeras RGB, que operam apenas na faixa do espectro visível, o que pode limitar a aplicação de índices espectrais que exigem bandas do NIR, como o Índice de Água por Diferença Normalizada - NDWI (McFeeters, 1996).

O NDWI é amplamente utilizado para detecção e delimitação de corpos d'água e tem se mostrado eficaz em diferentes contextos ambientais (Nascimento et al., 2020; Leonardo et al., 2021). Estudos como de Rodrigues et al. (2016) e Mahmood et al. (2025) por exemplo, demonstram a aplicabilidade desse índice em imagens multiespectrais no mapeamento de áreas alagadas e monitoramento de eventos de seca.

Como alternativa à limitação das câmeras RGB, têm sido propostos metodologias que estimam a refletância na faixa do NIR a partir das bandas visíveis, viabilizando a aplicação de índices espectrais com sensores convencionais. Arai et al. (2016) desenvolveram um método para estimar o NIR com base em câmeras RGB, obtendo fortes correlações com dados reais. Estudos recentes de Santos et al. (2022) e Souza et al. (2023) aplicaram essa abordagem com sucesso para estimar o NDVI, mostrando que é possível representar alvos como vegetação ativa com boa acurácia mesmo em sensores não multiespectrais.

Apesar dos avanços, a aplicação de técnicas baseadas em RGB para estimativa do NDWI ainda é pouco explorada, especialmente em ambientes de caatinga, agricultura e em reservatórios hídricos no semiárido. Essa lacuna evidencia a necessidade de avaliar o desempenho dessas metodologias em novas condições e com diferentes tipos de alvos.

Diante disso, o objetivo deste estudo é comparar o NDWI estimado a partir de imagens RGB obtidas por VANT com o índice calculado a partir de imagens multiespectrais dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2, visando avaliar a eficácia do uso de câmeras convencionais no mapeamento de corpos hídricos no reservatório Serra do Livramento, localizado no semiárido pernambucano.

2. Materiais e métodos

Área de estudo

Esta pesquisa foi realizada no reservatório Serra do Livramento (08°13'08" S; 39°19'08" O) (Figura 1), localizado no município de Cabrobó-PE. Esse reservatório integra o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), especificamente no Eixo Norte, e desempenha um papel fundamental no armazenamento e na distribuição de água na região. Sua importância é evidenciada principalmente no abastecimento hídrico das localidades adjacentes e na irrigação agrícola, ambos essenciais para o fortalecimento da

produção agrícola e para o desenvolvimento socioeconômico local.

A área de estudo está situada em uma região de clima semiárido do tipo *BShw*, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média

anual de 25°C (Silva et al., 2024) e precipitação concentrada entre os meses de dezembro e abril, estimada em 544,7 mm anuais com base em 50 anos de dados do INMET, conforme apresentado na Figura 2.

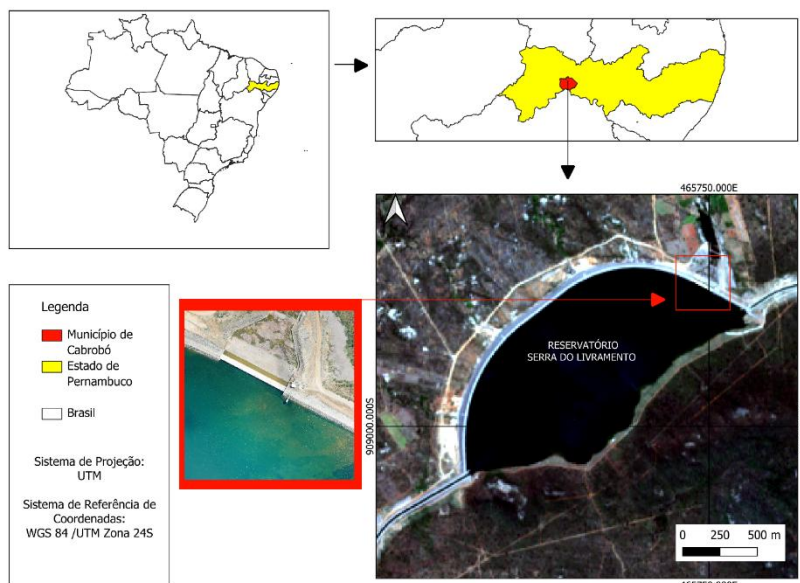


Figura 1 - Localização da área de estudo apontando a área amostral em que foi realizado o voo com o VANT.

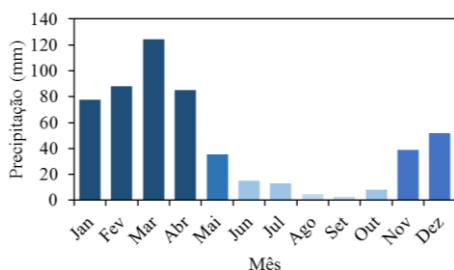


Figura 2 - Climatologia da precipitação pluviométrica do município de Cabrobó-PE entre os anos 1974-2023. Fonte: INMET.

Imagens aéreas obtidas por VANT

Foi realizado um voo na área de estudo (Figura 1) utilizando um VANT modelo DJI Mavic 2 pro acoplado com uma câmera em RGB com o sensor “1 CMOS - 20 Mp; FOV (campo de visão): cerca de 77°; Formato equivalente de 35 mm: 28 mm; Abertura de f/2.8-f/11” (DJI, 2024). A câmera também é acompanhada por um GNSS de navegação para a geolocalização das imagens.

O imageamento aéreo foi realizado no dia 09 de agosto de 2022. As imagens foram coletadas em um voo planejado com o objetivo de cobrir grandes áreas no entorno do reservatório, bem como áreas adjacentes que tivessem outros alvos. Para o planejamento e controle do voo, foi utilizado o aplicativo *Drone Deploy* em um smartphone, permitindo a criação de um plano de voo, a visualização em tempo real e o monitoramento da captura das imagens. A missão foi realizada a uma

altitude de 120 metros acima da superfície, com a câmera configurada para captura de imagens com sobreposição frontal de 75% e lateral de 70%, velocidade do voo a 6 m/s, ângulo da câmera a 90° imagens salvas em formato JPG.

Após a aquisição das imagens aéreas, o processamento foi realizado utilizando o software *Open Drone Map* (ODM) para a geração do ortomosaico. O fluxo de processamento envolveu a alinhamento das imagens por meio da técnica *Structure from Motion* (SfM), seguindo da reconstrução da nuvem de pontos densa, da geração do modelo digital de superfície (MDS) e do modelo digital de elevação (MDE), além da interpolação da textura e da criação do ortomosaico final com uma resolução de 0,05 m por pixel.

Em seguida, utilizando o software QGIS versão 3.30, foi realizado o recorte da área amostral no ortomosaico, conforme a Figura 1.

Imagens orbitais obtidas por satélites

As imagens de satélite utilizadas neste estudo foram adquiridas gratuitamente. Para o satélite Landsat-8, foi selecionado o produto de reflectância da superfície (*Land Surface Reflectance - C2L2*), obtido por meio da plataforma *Earth Explorer - USGS* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Este produto já incorpora correções atmosféricas baseadas no algoritmo LaSRC (*Land Surface Reflectance Code*) (Vermote et al., 2018). Fundamentado em

princípios físicos, o algoritmo foi desenvolvido para realizar a correção atmosférica das imagens do sensor OLI (Gaida et al., 2020).

Também foi adquirida uma cena do satélite Sentinel-2, operado pela ESA, acessada por meio da plataforma *Copernicus Browser* (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). O produto selecionado foi o nível L2A, que fornece reflectância da superfície já corrigida atmosféricamente por meio do algoritmo Sen2Cor (Main-Knorn et al., 2017), desenvolvido exclusivamente para o processamento de imagens dos sensores MSI (Gaida et al., 2020).

A utilização desses produtos com correção atmosférica garante maior precisão nas análises, minimizando os impactos da dispersão atmosférica e das variações nas condições atmosféricas durante a aquisição dos dados.

Outro fator importante a ser mencionado e que ambas as imagens foram adquiridas em 11 de agosto de 2022, apresentando uma diferença temporal de três dias em relação a imagem do VANT. As imagens obtidas foram em um dia em que não tinham cobertura de nuvens nos pixels estudados.

As características dos produtos obtidos por satélites estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das imagens de satélite utilizadas

Imagem	Sensor	Data de aquisição	Produto	Resolução	Bandas
Landsat-8	OLI	11 de agosto de 2022	C2 L2 (Reflectância da superfície)	30 m	G (B3) e NIR (B5)
Sentinel-2	MSI	11 de agosto de 2022	L2A (Reflectância da superfície)	10 m	G (B3) e NIR (B8)

* G: Banda verde; NIR: Infravermelho próximo.

Cálculo dos índices e processamento dos dados

Esta foi a etapa de operações matemáticas realizadas nas imagens para a obtenção NDWI utilizando o QGIS versão 3.30.

O NDWI (Equação 1) foi calculado a partir da diferença normalizada entre as bandas verde e do NIR, sendo que os valores variam de -1 a 1 com o autor definindo um limiar de 0, no qual, sendo positivos e mais próximos a 1 mostram a presença de água com ausência de materiais em suspensão e que o valor mais próximo de -1 mostram materiais em suspensão (McFeeters, 1996; Mahmood et al., 2025).

Como a câmera acoplada no VANT possui apenas imagens em RGB, primeiramente foi utilizada a metodologia proposta por Arai et al. (2016) para estimar a banda NIR (Equação 2), obtendo assim o dado necessário para a determinação do NDWI. As equações utilizadas seguem apresentados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Equações para o cálculo do índice de água, bem como a estimativa da banda NIR para o cálculo com as imagens do VANT.

	Equação	Referência	Eq.
NDWI	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$	McFeeters (1996)	(1)
NIR	$(360,6 - \text{Green}) / 1,1941$	Arai et al. (2016)	(2)

Legenda: NDWI – Índice de Água por Diferença Normalizada; NIR – Infravermelho Próximo.

A partir das imagens de satélite, foram criadas subparcelas em formato de polígono no software QGIS, conforme ilustrado na Figura 3. Essas subparcelas representam a matriz dos limites dos pixels das imagens do Landsat-8, com resolução espacial de 30x30 m, e do Sentinel-2, com resolução de 10x10 m, sobrepostas ao ortomosaico obtido a partir das imagens de VANT. No total, foram delimitadas 110 subparcelas correspondentes aos pixels do Landsat-8 e 1.225 subparcelas referentes aos pixels do Sentinel-2. Essas amostras foram utilizadas para comparar os valores extraídos das imagens dos satélites com os dados de alta resolução gerados pelo VANT, possibilitando uma análise detalhada da variabilidade espacial dos índices espectrais na área de estudo.

A Figura 3 apresenta essa sobreposição de forma esquematizada. Na Figura 3A, observa-se a matriz de pixels do Landsat-8, onde cada célula representa um pixel de 30x30 m, numerado de 1 a 110. Já na Figura 3B, esses limites são visualizados sobre a imagem de VANT, permitindo identificar a relação espacial entre os diferentes produtos e avaliar possíveis variações dentro de cada pixel de satélite. A comparação entre essas diferentes resoluções é fundamental para compreender as diferenças na captação dos dados espectrais e avaliar a acurácia dos produtos gerados.

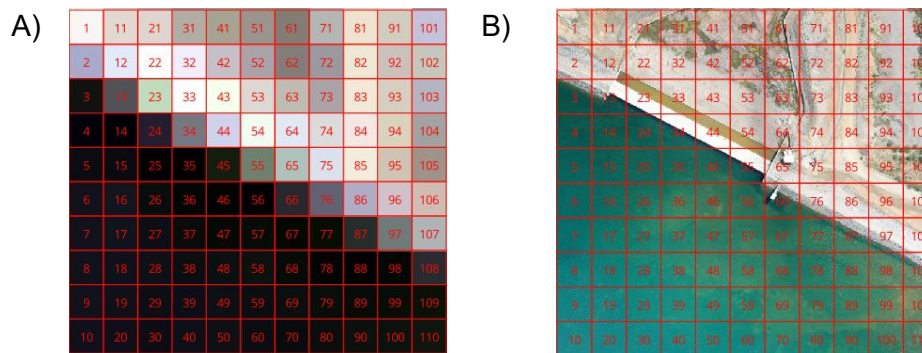


Figura 3 - Exemplo de delimitação das subparcelas na imagem tomando como referência a grade de pixels do satélite Landsat-8 para a área amostral. A) Imagem Landsat-8; B) Ortomosaico com as imagens capturadas com a câmera acoplada no VANT.

Em seguida, foram extraídos os valores do pixel das imagens de satélite e a média dos dados de cada uma das subparcelas da imagem do VANT como mostrado na Figura 3. Esses processos foram realizados utilizando o terminal Pythom no QGIS 3.30.

Análises

A relação entre o NDWI derivado das imagens de satélite e do VANT foi analisada por meio de regressão linear, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r) para avaliar a associação entre os conjuntos de dados. Esse coeficiente varia de -1 a 1, onde valores próximos de 1 indicam uma forte correlação positiva entre as variáveis (Souza et al., 2018).

Além da correlação, foram calculadas métricas de erro, como a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE), para quantificar a precisão das estimativas. O RMSE permite avaliar a magnitude média dos erros, sendo sempre positivo e indicando melhor precisão quando seus valores estão próximos de zero (Ruezzene et al., 2021). Já o MAE mede a média dos erros absolutos entre os valores interpolados e observados, sendo uma métrica robusta para avaliar modelos numéricos, especialmente na presença de outliers e dados não normalmente distribuídos (Willmott et al., 2009). Valores mais baixos de MAE e RMSE indicam maior confiabilidade das estimativas.

Essas métricas são fundamentais para validar a acurácia dos dados do VANT em comparação com os satélites Landsat-8 e Sentinel-2, garantindo uma avaliação consistente da metodologia aplicada.

3. Resultados e discussão

A Figura 4 apresenta a área de estudo com as imagens em composição colorida (RGB) e os

mapas de NDWI obtidos a partir das diferentes plataformas de aquisição de dados. A análise visual permitiu identificar claramente os principais alvos na superfície (corpo d'água, solo exposto e vegetação), e permitiu observar como a resolução espacial afeta a capacidade de distinção entre eles.

Nas imagens em RGB, foi observado que o aumento da resolução espacial proporcionou uma melhoria significativa na identificação dos alvos. Esse efeito foi especialmente evidente na zona de borda do reservatório, onde a interface entre a água e o solo foi mais bem definida nas imagens obtidas por VANT, com resolução de 0,05 m. Em contraste, nas imagens de satélite, com resoluções de 10 m (Sentinel-2) e 30 m (Landsat-8), essa definição foi suavizada.

A maior precisão do VANT no delineamento das bordas dos corpos d'água pode ser atribuída à sua alta resolução, que possibilita capturar feições menores e variações sutis na paisagem que são perdidas em sensores de média resolução. Esse resultado está de acordo com Santos et al. (2021) e Sampaio et al. (2020), que ressaltam a importância do uso de imagens com alta resolução espacial para o monitoramento de áreas hídricas e ecossistemas sensíveis.

Além disso, a composição RGB obtida pelo VANT revelou a heterogeneidade da área de estudo, com clara distinção de regiões com diferentes níveis de cobertura, áreas mais densas em vegetação, manchas de solo exposto e trechos com espelho d'água contínuo ou fragmentado. Essa diferenciação visual é fundamental para estudos que buscam compreender a dinâmica sazonal dos reservatórios e identificar possíveis impactos antrópicos ou naturais.

Portanto, a análise visual reforça que a integração de dados de diferentes sensores pode oferecer uma abordagem multiescala eficiente. Enquanto os satélites contribuem com séries temporais amplas, os VANTs complementam com

informações em alta precisão espacial. Essa combinação é estratégica para o planejamento

ambiental, permitindo ações mais eficazes de conservação e uso racional da água.

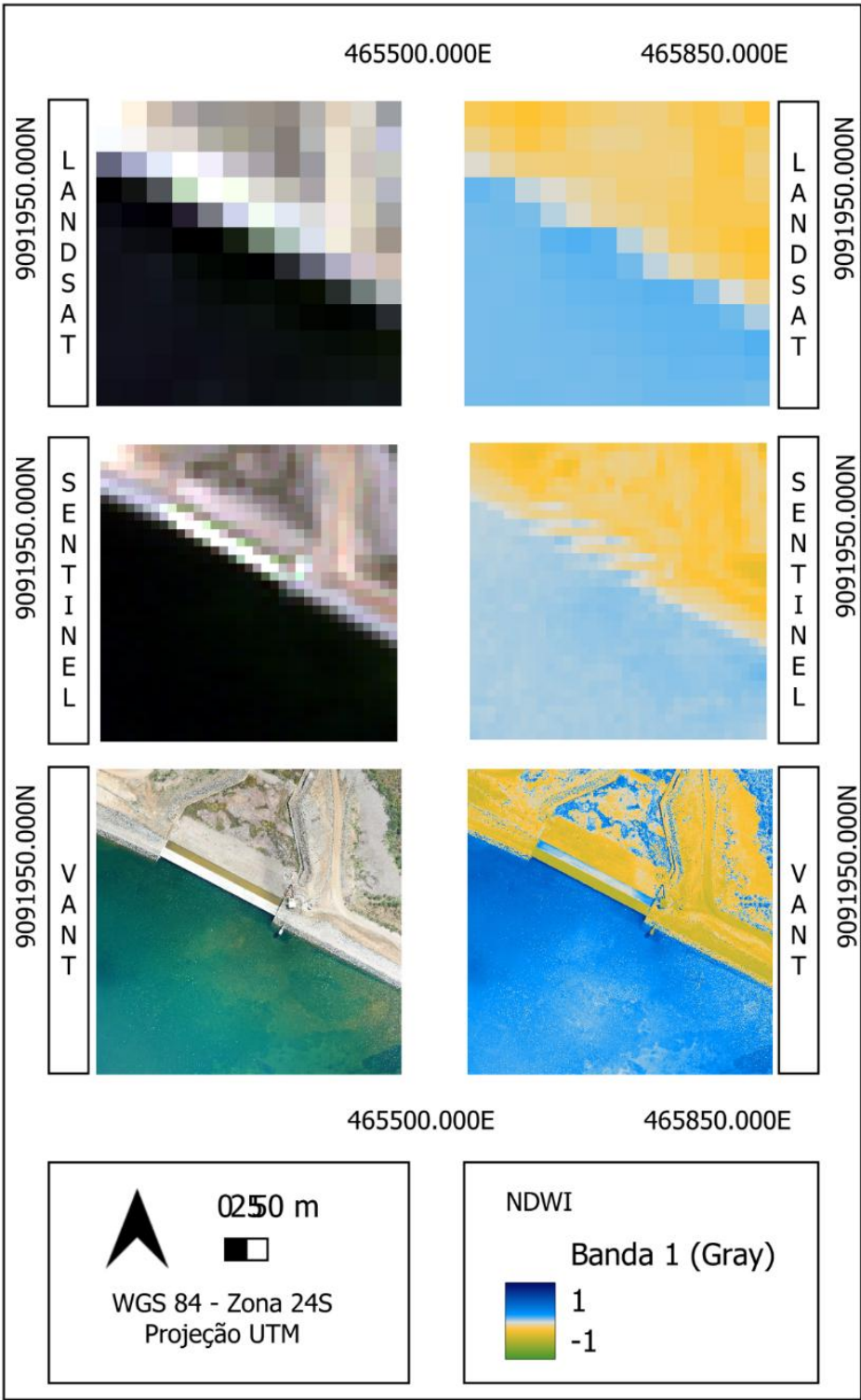


Figura 4 - Imagens da área amostral no reservatório a partir de composições coloridas (RGB) e calculados o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) a partir das diferentes plataformas de aquisição de dados.

O desvio padrão nos dados (Tabela 3) reforça essa interpretação, pois os dados de VANT apresentaram maior variabilidade (0,20 e 0,22), em

comparação aos satélites (0,10 e 0,11). Isso reforça que os dados de alta resolução são mais sensíveis à heterogeneidade local da paisagem, onde há

alternância de vegetação, solo exposto e água em pequenas escalas espaciais.

Esses dados estão em conformidade com os resultados de Santos et al. (2022), que observaram maior variabilidade nos índices espectrais estimados por VANT em comparação com dados orbitais em áreas de vegetação. Da mesma forma, Souza et al. (2023) destacaram que sensores RGB acoplados a drones apresentaram maior dispersão nos valores de NDVI devido à sua capacidade de capturar feições menores.

A alta variabilidade dos dados obtidos por VANT é positiva do ponto de vista analítico, pois

amplia a sensibilidade na detecção de pequenas feições ambientais e na identificação de mudanças sutis. Por outro lado, esse nível de detalhamento exige maior cuidado na calibração e interpretação dos dados, sobretudo em estudos que envolvem múltiplas fontes de dados.

Portanto, a análise estatística confirma que o uso de sensores embarcados em VANTs contribui para uma caracterização mais refinada da paisagem, sendo especialmente útil para o monitoramento de corpos hídricos em ambientes de alta heterogeneidade, como o semiárido brasileiro.

Tabela 3 - Estatística dos dados de NDWI obtidos com os diferentes produtos

	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
LANDSAT-8	-0,20	0,00	0,13	0,11
VANT/LANDSAT-8	-0,31	0,06	0,45	0,20
SENTINEL-2	-0,29	0,03	0,10	0,10
VANT/SENTINEL-2	-0,45	0,07	0,51	0,22

A Figura 5 apresenta a análise de correlação entre os valores do Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) estimados com dados de VANT e os obtidos a partir das imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2. A comparação foi realizada com base nas subparcelas construídas sobre os pixels de cada satélite, respeitando as respectivas resoluções espaciais: 30 m para Landsat-8, 10 m para Sentinel-2 e 0,05 m para o VANT.

As correlações entre os dados foram consideradas fortes, com $r = 0,85$ entre VANT e Landsat-8, e $r = 0,71$ entre VANT e Sentinel-2. Esses valores indicam uma relação linear forte e positiva entre os conjuntos de dados, sugerindo que, apesar das diferenças nas resoluções espaciais e nas características espectrais dos sensores, os padrões do NDWI permanecem consistentes entre as plataformas. O valor mais alto de correlação com o Landsat-8 pode ser atribuído à compatibilidade espectral com os alvos analisados e ao tamanho das subparcelas ajustadas, enquanto o Sentinel-2, embora com maior resolução, pode ter sido influenciado pela variabilidade espectral local.

As métricas de erro, raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE), também apresentaram valores baixos, evidenciando que a diferença entre os dados de VANT e satélite é pequena. Esses indicadores quantitativos reforçam a confiabilidade do NDWI calculado com base em imagens RGB de VANT, mesmo na ausência da banda do infravermelho

próximo (NIR), tradicionalmente utilizada no cálculo do índice.

Esse desempenho é relevante, pois demonstra a viabilidade do uso de câmeras convencionais embarcadas em drones para fins de monitoramento ambiental em locais com presença de água. A precisão obtida nas bordas dos reservatórios, locais com transições abruptas entre solo, vegetação e água, evidencia a vantagem do uso de alta resolução espacial.

Estudos anteriores corroboram com esses resultados. Santos et al. (2021) observaram correlação de $r = 0,73$ entre o NDVI derivado de VANT com sensor multiespectral e o Sentinel-2 em áreas de Caatinga. Da mesma forma, Souza et al. (2023) relataram coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$ ao comparar o NDVI calculado com câmera RGB em VANT com sensores calibrados em áreas agrícolas. Apesar das diferenças nos índices utilizados (NDVI vs. NDWI), esses resultados sustentam a consistência da resposta espectral gerada por sensores visíveis em diferentes contextos ambientais.

Portanto, a análise de correlação e erro entre os produtos demonstra que os dados de VANT, mesmo quando gerados com câmeras RGB, têm potencial para representar com fidelidade áreas de superfície hídrica. Isso reforça a importância do uso de metodologias alternativas e de baixo custo para o monitoramento ambiental, sobretudo em regiões semiáridas onde a disponibilidade de sensores multiespectrais pode ser limitada.

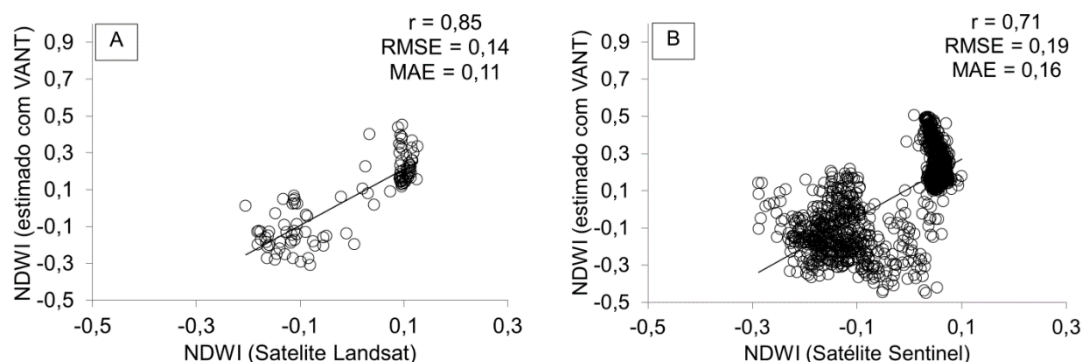


Figura 5 - Correlações entre os índices espectrais calculados. A) NDWI (Landsat-8) e NDWI (VANT); B) NDWI (Sentinel-2) e NDWI (VANT).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade do uso de imagens capturadas por VANT com câmera RGB para estimativa do NDWI, com forte correlação em relação aos índices calculados por sensores multiespectrais dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2. A análise permitiu avaliar não apenas o desempenho espectral, mas também os efeitos da resolução espacial na representação dos alvos em superfície hídrica.

A capacidade do VANT em captar feições com elevado nível de detalhamento, associada à precisão dos valores espectrais estimados, reforça o potencial dessa ferramenta em aplicações ambientais. Essa abordagem pode ser particularmente útil em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica exige monitoramento constante e detalhado.

Estudos anteriores já apontaram bons resultados para índices de vegetação derivados de câmeras RGB embarcadas em VANTs, mas poucos exploraram o NDWI em ambientes de reservatórios. Neste sentido, o presente estudo contribui com evidências concretas da aplicabilidade do método, utilizando métricas estatísticas robustas e comparações consistentes com produtos de referência.

Apesar dos resultados promissores, ressalta-se que a técnica ainda depende de estudos complementares em diferentes condições ambientais, incluindo áreas com cobertura hídrica mais homogênea ou sob diferentes períodos sazonais. A padronização de métodos de estimativa de NIR com RGB e sua validação em campo também são etapas importantes para consolidar o uso operacional da metodologia.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o NDWI estimado a partir de imagens

capturadas por VANT com câmera RGB apresenta forte correlação com os índices calculados a partir de dados dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2.

A alta resolução espacial dos dados do VANT permitiu a identificação precisa de áreas com presença de água, inclusive em regiões de borda e zonas de transição, demonstrando sua eficácia para o mapeamento de corpos hídricos em escala local.

A metodologia mostrou-se promissora como alternativa de baixo custo e fácil aplicação, especialmente para estudos ambientais em áreas com alta heterogeneidade espacial.

Os resultados reforçam o potencial de uso de câmeras convencionais embarcadas em VANTs para aplicações em sensoriamento remoto, contribuindo para o monitoramento de recursos hídricos em regiões semiáridas.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE). Ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) junto a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) com as imagens do VANT. Ao laboratório de Agrometeorologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) pela infraestrutura para o processamento dos dados. A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa do primeiro autor.

Referências

Arai, K., Gondoh, K., Shigetomi, O., Miura, Y. (2016). Method for NIR reflectance estimation with visible camera data based on regression for NDVI estimation and its application for insect damage detection of rice

- paddy fields. (IJARAI) International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, v. 5, n.11,2016.<https://doi.org/10.14569/IJARAI.2016.051103>
- Cardoso, P. V., Seabra, V. S., Xavier, R. A., Rodrigues, E. M., Gomes, A. S. (2021). Mapeamento de Áreas de Caatinga Através do Random Forrest: Estudo de caso na Bacia do Rio Taperoá. Revista Geoaraguaia, 11, Especial, 55-68, 2021.
- Crioni, P. L. B. (2024) Aplicação do sensoriamento remoto com imagens do satélite Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no brasil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/n/96ed6347-19f7-417f-8601-ffb6c6fbe421>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em 27 de maio de 2024.
- Facco, D. S., Guasselli, L. A., Ruiz, L. F. C., Simioni, J. P. D., Dick, D. G. (2021). Spectral Reflectance in the Spatial-temporal Dynamic of Turbidity, Itaipu Reservoir, Brazil. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41228
- Gaida, W., Breunig, F. M., Galvão, L. S., Ponzoni, F. J. 2020. Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. Revista Brasileira De Geografia Física, v. 13, n. 1, p. 229-248. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p229-248>
- Gomes, M. D. A., Román, R. M. S., Torres-Rua, A., Alves, É. S., Mckee, M. (2021). Comparação do NDVI obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. Irriga, v. 26, n. 3, p. 605-619. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619>
- Kaya, Y., Sanli, F. B., Abdikan, S. (2023). Determination of long-term volume change in lakes by integration of UAV and satellite data: The case of Lake Burdur in Türkiye. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 55, p. 117729-117747. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30369-z>
- Leonardo, H. R. A. L., Salgueiro, C. O. B., Almeida, D. N. O., Santos, S. M., Oliveira, L. M. M. (2021). Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz-PE e seu Entorno. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 6, p. 3592-3607. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3614-3629>
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., Gascon, F. 2017. Sen2Cor for sentinel-2. In: Image and signal processing for remote sensing XXIII. SPIE, 2017. p. 37-48. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International journal of remote sensing, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mahmood, M. R., Abraham, B. I., Jumaah, H. J., Alalwan, H. A., Mohammed, M. M. (2025). Drought monitoring of large lakes in Iraq using remote sensing images and normalized difference water index (NDWI). Results in Engineering, v. 25, p. 103854. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.1038>
- Nascimento, E. F., Azevedo, L. D. S., Candeias, A. L. B., Tavares Júnior, J. R. (2020). Comparison of water index for MUX/CBERS-4 digital number and monochrome reflectance images. Journal of Hyperspectral Remote Sensing, v. 10, n. 1, p. 34-44. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v10.1.p34-44>
- Oliveira, A. J., Silva, G. F., Silva, G. R., Santos, A. A. C., Caldeira, D. S. A., Vilarinho, M. K. C., Barelli, M. A. A., Oliveira, T. C. (2020). Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 64140-64149. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-010>
- Rodrigues, T. W. P., Guimarães, U. S., Rotta, L. H. S., Watanabe, F. S. Y., Alcantara, E., Imai, N. N. (2016). Delineamento amostral em reservatórios utilizando imagens LANDSAT-8/OLI: um estudo de caso no reservatório de Nova Avanhandava (estado de São Paulo, Brasil). Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 2, p. 303-323. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000200017>

- Rosa, R. (2005). Geotecnologias na geografia aplicada. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 16, p. 81-90.
- Ruezzene, C. B., Miranda, R. B., Tech, A. R. B., Mauad, F. F. (2021). Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tracionais e por inteligência artificial. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 29, p. 177-204.
- Sampaio, H. S., Bourscheidt, V., Sarracini, L. H., Jorge, L. D. C., Bertiol, G. M., Bernardi, A. D. C. (2020). Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 14, n. 2, p. 111-124. <https://doi.org/10.18011/bioeng2020v14n2p111-124>
- Santos, C. V. B., Moura, M. S. B., Carvalho, H. F. S., Galvêncio, J. D., Miranda, R. Q., Nishiwaki, A. A. M., Montenegro, S. M. G. L. (2022). Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12, 109-123. <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.254276>
- Santos, C. V. B., Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., Carvalho, H. F. S., Miranda, R. Q., Montenegro, S. M. G. L. (2021). Comparação de imagens multiespectrais utilizando Satélites e VANT para a análise de mudanças estruturais em área de Floresta Seca. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 5, p. 2510-2522. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2510-2522>
- Silva, J. L. P., Silva Junior, F. B., Santos, J. P. A. S., Almeida, A. C. S., Silva, T. G. F., Oliveira-Júnior, J. F., Araújo Junior, G. N., Scheibel, C. H., Silva, J. L. B., Lima, J. L. M. P., Silva, M. V. (2024). Semi-Arid to Arid Scenario Shift: Is the Cabrobó Desertification Nucleus Becoming Arid?. *Remote Sensing*, v. 16, n. 15, p. 2834. <https://doi.org/10.3390/rs16152834>
- Sobral, M. D. C. M., Assis, J. M. O., Oliveira, C. R., Silva, G. M. N., Morais, M., Carvalho, R. M. C. (2018). Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do Rio São Francisco-Brasil. *Revista Eletrônica do PRODEMA*, v. 12, n. 3, p. 95-106. <https://doi.org/10.22411/rede2018.1203.10>
- Souza, A. G. S., Ribeiro Neto, A.; Rossato, L.; Alvalá, R. C. S.; Souza, L. L. (2018). Use of SMOS L3 Soil Moisture Data: Validation and Drought Assessment for Pernambuco State, Northeast Brazil. *Remote Sensing*, v. 10, n. 8, p. 1314. <https://doi.org/10.3390/rs10081314>
- Souza, L. S. B., Maia, Í. C., Costa, D. S., Santos, C. V. B., Carneiro, A. S. R., Moura, M. S. B. (2023). Análise comparativa entre o NDVI obtido por imagens multiespectrais e visíveis (RGB) em câmera acoplada em drone em área de videira. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 13, n. 6, p. 741-751. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.6.p741-751>
- Vermote, E., Roger, J. C., Franch, B., Skakun, S. 2018. LASRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data's. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2018-July, p. 8173–8176.
- Willmott, C. J., Matsuura, K., Robeson, S. M. 2009. Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 3, p. 749–752. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.005>