

Mapeamento automático de viveiros aquícolas por índices espectrais e limiar de Otsu: estudo de caso no Baixo Jaguaribe, Ceará

Bruno e Silva Ursulino^{1*}, Jéssica da Costa Lima Pereira², Aline Cássia Silva de Oliveira²,
Jefferson Aécio da Silva²

¹Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos)/UFPE, Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará/IFCE – campus Aracati, Brasil. (*Autor correspondente: bruno.ursulino@ifce.edu.br)

²Graduandos em Engenharia de Aquicultura no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará/IFCE – campus Aracati, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 06/07/2025 – Revisado em: 12/07/2025 – Aceito em: 17/07/2025

RESUMO

O monitoramento preciso de corpos d'água é fundamental para a gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável da aquicultura, especialmente em regiões semiáridas. Este estudo avaliou o desempenho de diferentes índices espectrais de água (NDWI, MNDWI, NWI, AWEIsh, AWEInsh e SWI) aplicados a imagens Landsat 8 OLI para a identificação automática de viveiros voltados à carcinicultura no município de Aracati, Ceará. A classificação binária dos índices espectrais, calculados a partir das bandas processadas no QGIS, foi realizada por meio do método de Otsu, aplicado de maneira independente às duas áreas de interesse: a cena completa e o recorte restrito aos viveiros aquícolas. O desempenho foi analisado tanto para uma cena maior, que inclui diferentes usos do solo, quanto para um recorte restrito à área dos viveiros. Os resultados evidenciaram que a utilização de áreas homogêneas favorece a segmentação espectral entre água e áreas secas, otimizando a aplicação de limiares automáticos. Entre os índices testados, o NWI apresentou o melhor desempenho na separação dos alvos, seguido por MNDWI e NDWI, enquanto índices subtrativos como AWEIsh, AWEInsh e SWI apresentaram limitações devido à sensibilidade a sombras e superfícies úmidas não aquáticas. A análise dos histogramas e estatísticas descritivas confirmou que ambientes mais homogêneos e índices com distribuição bimodal clara maximizam a eficácia do método de Otsu. O estudo destaca ainda a importância de abordagens adaptativas em áreas espectralmente complexas e recomenda o uso de séries temporais, imagens de maior resolução e técnicas de inteligência artificial em futuras pesquisas para aprimorar a acurácia do mapeamento aquícola e de recursos hídricos.

Palavras-Chaves: sensoriamento remoto, índice de água, carcinicultura, segmentação espectral, algoritmo Otsu.

Automatic mapping of aquaculture ponds using spectral indices and Otsu threshold: a case study in the lower Jaguaribe, Ceará

ABSTRACT

Accurate monitoring of water bodies is essential for water resources management and the sustainable development of aquaculture, especially in semi-arid regions. This study evaluated the performance of different spectral water indices (NDWI, MNDWI, NWI, AWEIsh, AWEInsh, and SWI) applied to Landsat 8 OLI imagery for the automatic identification of shrimp aquaculture ponds in the municipality of Aracati, Ceará. Binary classification of the spectral indices, calculated from bands processed in QGIS, was performed using the Otsu thresholding method, independently applied to two areas of interest: the complete scene and the subset restricted to the aquaculture ponds. Performance was analyzed for both a larger scene, which includes different land uses, and a subset focused on the pond area. The results showed that using homogeneous areas favors spectral segmentation between water and dry areas, optimizing the application of automatic thresholds. Among the tested indices, NWI showed the best performance in target separation, followed by MNDWI and NDWI, while subtractive indices such as AWEIsh, AWEInsh, and SWI exhibited limitations due to their sensitivity to shadows and non-aquatic moist surfaces. Analysis of histograms and descriptive statistics confirmed that more homogeneous environments and indices with clear bimodal distributions maximize the effectiveness of the Otsu method. The study also highlights the importance of adaptive approaches in spectrally complex areas and recommends the use of time series, higher-resolution imagery, and artificial intelligence techniques in future research to further improve the accuracy of aquaculture and water resources mapping.

Keywords: remote sensing, water index, shrimp farming, spectral segmentation, Otsu algorithm.

Ursulino, B. S., Pereira, J. C. L., Oliveira, A. C. S., Silva, J. A. (2025). Mapeamento automático de viveiros aquícolas por índices espectrais e limiar de Otsu: estudo de caso no Baixo Jaguaribe, Ceará. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.6, n.3, p.13-27.



1. Introdução

A preocupação crescente com os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos impulsiona a necessidade de melhoria das tecnologias voltadas ao monitoramento ambiental no mundo, principalmente em regiões semiáridas. Os métodos tradicionais de monitoramento de águas superficiais dependem principalmente de levantamentos manuais em campo ou são baseados em estações de medição já estabelecidas (Liu et al., 2022). Embora possam apresentar alta acurácia, esses métodos são trabalhosos, têm altos custos e apresentam limitações ou registros de séries temporais incompletas, especialmente em regiões remotas ou de difícil acesso.

A partir do avanço das tecnologias com a utilização do sensoriamento remoto, foi possível a realização do monitoramento dos corpos d'água em grandes extensões territoriais e ao longo de longos períodos, proporcionando dados essenciais para a gestão sustentável dos recursos (Herndon et al., 2020). Muitos produtos e plataformas de sensoriamento têm permitido a obtenção de informações superficiais de maneira rápida, eficiente e com baixo custo, por muitas vezes em tempo quase real, tornando-se uma abordagem amplamente utilizada para a detecção e o monitoramento de águas superficiais (Shiklomanov et al., 2019, Li et al., 2023). Como exemplos, produtos multiespectrais provenientes de sensores como MODIS, Sentinel-2 e, sobretudo, da série Landsat, destacam-se como fontes de dados amplamente empregadas, devido a boa resolução espacial, frequência de revisita, baixo custo e longa série histórica, características importantes para o monitoramento ambiental contínuo.

Neste cenário de avanços tecnológicos e expansão da necessidade de monitoramento, a aquicultura desponta como uma das atividades econômicas de maior crescimento mundial, especialmente em ambientes de águas interiores, como viveiros escavados, reservatórios e lagoas (Edwards et al., 2019; Ximenes et al., 2023). De acordo com a FAO (2024), a produção global de aquicultura superou a marca de 130,9 milhões de toneladas em 2022, consolidando-se como protagonista na oferta de alimentos aquáticos. No Brasil, diferentes regiões costeiras e de várzea, sobretudo ao longo do litoral nordeste, nas regiões Norte e em áreas de transição do semiárido, têm apresentado forte expansão da carcinicultura e de sistemas de produção em viveiros, promovendo impactos econômicos, ambientais e sociais em múltiplas escalas (Oliveira Júnior, Gomes e Rocha, 2021; São José et al., 2022). Exemplos desse avanço podem ser encontrados no Rio Grande do Norte, Maranhão, Pará e especialmente no estado do Ceará, onde regiões como o baixo Jaguaribe se destacam pela produção de camarão marinho em viveiros escavados, impulsionando a economia regional e demandando métodos eficazes para o mapeamento e o monitoramento dessas áreas de produção (Santana, 2009; Lacerda et al., 2021).

O sucesso do mapeamento aquícola depende, em grande parte, da identificação eficiente de corpos d'água e áreas alagadas, sobretudo em regiões com grande densidade de viveiros e pequenas barragens. Neste contexto, os índices espectrais de água têm se destacado como ferramentas fundamentais, pois permitem a detecção e o monitoramento de ambientes aquáticos com diferentes níveis de precisão, dependendo da resolução espacial das imagens empregadas (Gumma et al., 2020; Feyisa et al., 2014; Li et al., 2022). Enquanto sensores como MODIS e Sentinel oferecem amplo alcance temporal e espacial, plataformas de código aberto como Landsat continuam sendo amplamente utilizadas para estudos de aquicultura em larga escala, inclusive em séries temporais (Diniz et al., 2021; Kurekin et al., 2022). Recentemente, avanços computacionais, como o uso do Google Earth Engine, têm possibilitado a análise massiva de dados e a integração de metodologias automatizadas para extração de feições aquáticas em grandes áreas (Wang et al., 2020; Kolli et al., 2022; Giri et al., 2021). Entretanto, a classificação de pequenos corpos d'água, como viveiros recém-formados ou açudes de menor porte, ainda representa um desafio, especialmente em ambientes com alta complexidade espectral, onde métodos tradicionais de segmentação e algoritmos de aprendizado profundo podem apresentar limitações (Lacaux et al., 2007; Prasad et al., 2019; Islam et al., 2007).

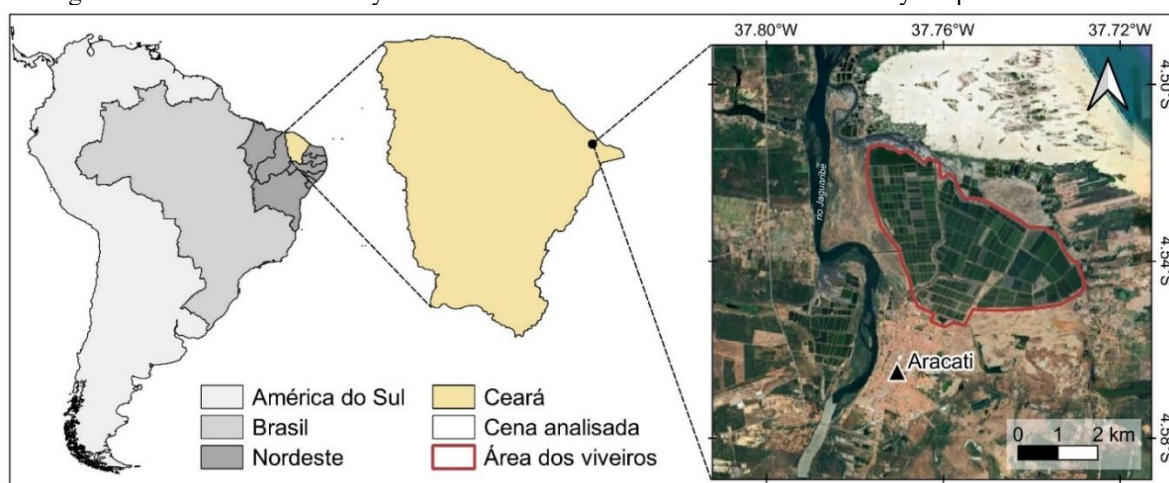
Dessa forma, o uso do sensoriamento remoto para extração automática de áreas alagadas por meio de índices espectrais representa uma estratégia eficiente e inovadora para a gestão da aquicultura e dos recursos hídricos. Diante do exposto, esta pesquisa busca avaliar o desempenho de diferentes índices espectrais de água, aplicados a imagens Landsat 8 OLI, para o mapeamento dos viveiros escavados utilizados na carcinicultura no município de Aracati, Ceará, utilizando um algoritmo de limiarização refinado baseado no limiar de Otsu e análise comparativa das principais métricas espectrais.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Esta pesquisa foi realizada utilizando cenas de viveiros localizados no município de Aracati, no litoral leste do estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo e identificação da cena e do recorte dos viveiros analisados.
Figure 1 - Location of the study area and identification of the scene and the analyzed pond area subset.



Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

A região está inserida na da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, que possui cerca de 633 km de extensão e uma área de drenagem de aproximadamente 72.000 km², sendo o maior sistema hidrográfico do estado e o principal contribuinte fluvial do litoral cearense (Cavalcante, 2021; Bungenstock, 2023). O clima é caracterizado como tropical semiárido, apresentando um comportamento sazonal acentuado, com um período chuvoso entre março e abril (200 - 400 mm) e um período seco entre agosto e novembro, quando a precipitação pode frequentemente ser zero. (Cotovicz Jr., 2022).

A região estuarina tem um regime semidiurno e meso-maremoto com altura média da maré de 2,8 m, com picos durante a maré de sizígia atingindo até 3,4 m (Dias et al., 2009). Este ambiente é ecologicamente relevante, com presença de extensos campos de dunas, vegetação de restinga e manguezais, os quais ocupam cerca de 7 km² na foz do rio (Cavalcante, 2021). Além disso, a planície estuarina abriga uma intensa atividade aquícola, com destaque para a carcinicultura de *Litopenaeus vannamei*, iniciada nos anos 1990 e intensificada a partir dos anos 2000 (Gameiro, 2022). Atualmente o município é um dos principais polos produtores de camarão marinho do estado, com infraestrutura consolidada e vasta ocupação da planície fluviomarinha por viveiros escavados (Lacerda et al., 2021).

2.2 Aquisição e processamento das imagens

A imagem utilizada neste estudo foi obtida a partir da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), por meio da seleção de uma cena do satélite *Landsat 8 OLI*, com data de imageamento em 25 de agosto de 2024 e processada como produto de refletância de superfície (Level-2, Tier 1). A cena abrange toda a área de estudo, correspondendo ao parth 216 e row 063.

O *Landsat* foi escolhido devido a resolução espectral de 30 metros, que garante uma visualização mais ampliada e de boa qualidade dos viveiros de camarão na região. Para a aquisição da imagem, foi considerado o período seco do ano, o qual apresenta baixa cobertura de nuvens e, consequentemente, melhor visibilidade dos alvos na área. A partir da imagem selecionada, os índices espectrais de detecção de áreas úmidas/água foram aplicados como forma de realçar os corpos hídricos e facilitar a distinção entre as regiões alagadas e não alagadas, e assim distinguir com maior precisão as áreas de viveiros.

Na plataforma do GEE, foram baixadas as bandas espectrais B2 (azul), B3 (verde), B5 (Infravermelho próximo NIR), B6 (Infravermelho médio SWIR1) e B7 (Infravermelho médio SWIR2). O processamento das bandas espectrais e o cálculo dos índices (Tabela 1) foram realizados no QGIS 3.34.13.

Tabela 1 – Índices espectrais de água utilizados e respectivas fórmulas.

Table 1 – Spectral water indices used and their respective formulas.

Índice	Fonte	Equação
NDWI	McFeeters (1996)	$\frac{(\text{GREEN} - \text{NIR})}{(\text{GREEN} + \text{NIR})}$
MNDWI	Xu (2006)	$\frac{(\text{GREEN} - \text{SWIR1})}{(\text{GREEN} + \text{SWIR1})}$
AWEIsh	Feyisa et al. (2014)	$\text{BLUE} + 2.5 * \text{GREEN} - 1.5 * (\text{NIR} + \text{SWIR1}) - 0.25 * \text{SWIR2}$
AWEInsh	Feyisa et al. (2014)	$4 * (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) - (0.25 * \text{NIR} + 2.75 * \text{SWIR1})$
NWI	Feng (2009)	$\frac{(\text{BLUE} - \text{NIR} - \text{SWIR1} - \text{SWIR2})}{(\text{BLUE} + \text{NIR} + \text{SWIR1} + \text{SWIR2})}$
SWI	Jiang et al. (2021)	$\text{BLUE} + \text{GREEN} - \text{NIR}$

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de McFeeters (1996), Xu (2006), Feyisa et al. (2014), Feng (2009) e Jiang et al. (2021).
Source: Prepared by the author based on McFeeters (1996), Xu (2006), Feyisa et al. (2014), Feng (2009), and Jiang et al. (2021).

Entre os índices escolhidos, destaca-se o NDWI (Normalized Difference Water Index), desenvolvido por McFeeters (1996), que utiliza as bandas espectrais verde visível e NIR para detecção de presença de água. Como variação do NDWI, foi utilizado o MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), proposto por Xu (2006), substituindo o NIR pelo SWIR1, com o intuito de aprimorar a identificação de água, especialmente em áreas urbanas e mistas. Também foram utilizados os índices AWEIsh (Automated Water Extraction Index, Normalized for Shadow) e o AWEInsh (Automated Water Extraction Index, for Shadow), desenvolvidos por Feyisa et al. (2014), com o objetivo de melhorar a detecção de água em regiões sombreadas. Enquanto o AWEInsh utiliza as bandas do verde, NIR e SWIR1, o AWEIsh inclui as bandas do azul e do SWIR2 para melhorar a sensibilidade em sombras. Além desses índices, o NWI (Feng, 2009) e o SWI (Jiang et al., 2021) também foram aplicados no estudo considerando que os mesmos são capazes de reduzir possíveis interferências de superfícies escuras ou áreas de sombra, aprimorando a precisão na extração das áreas alagadas e corpos d'água.

Como forma de avaliar o desempenho dos índices aplicados, foram adotadas duas abordagens: uma utilizando a cena maior, contendo diferentes alvos (Figura 1), e outra cena utilizando um recorte focado apenas nos viveiros. Essa abordagem permitiu analisar a resposta dos diferentes índices considerando um contexto com a presença de diferentes usos do solo, paisagem heterogênea, e em um ambiente apenas com o espelho d'água dos viveiros e pequenas áreas ao redor (diques entre os tanques). Conforme discutido anteriormente, o uso de uma subárea específica para cada cena pode aprimorar o desempenho do índice aplicado, minimizando a confusão espectral de diversas coberturas terrestres.

Após o cálculo dos índices, um método automático de segmentação limiar foi aplicado para classificar os pixels da imagem em duas categorias: água e área seca. Para essa etapa, foi escolhido o algoritmo de limiarização de Otsu devido à sua capacidade não supervisionada, baseada em histogramas, de maximizar a variância interclasse (Otsu, 1979). Esse método tem se mostrado eficiente e amplamente utilizado na binarização de imagens para extração de corpos hídricos, incluindo aplicações para detecção de viveiros aquícolas (Ya Peng *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2021). Otsu tem sido empregado em diversas aplicações envolvendo classificação da cobertura do solo e separação de classes espectralmente distintas (Wang *et al.*, 2023; Taylor *et al.*, 2019), sendo uma abordagem robusta para a determinação automática do limiar ideal em índices espectrais de água (Xu *et al.*, 2011). Neste estudo, o algoritmo Otsu foi aplicado nas cenas utilizando o *R Studio* a partir da função *otsu()*, do pacote *EBImage*, que calcula a distribuição de intensidade dos valores de pixel e determina automaticamente o limiar ideal com base no critério de máxima variância entre classes.

Finalmente, após a classificação binária, foram gerados histogramas para cada índice espectral, considerando a cena maior e o recorte dos viveiros. Essa aplicação buscou explorar visualmente o comportamento da distribuição em frequência dos valores dos pixels entre as duas abordagens utilizadas, permitindo avaliar como a variabilidade espectral dos índices influencia o desempenho do limiar obtido pelo método de Otsu. A sobreposição dos histogramas também permitiu identificar se os recortes com menor heterogeneidade espectral resultam em separações mais nítidas entre as duas categorias calculadas.

3. Resultados e Discussão

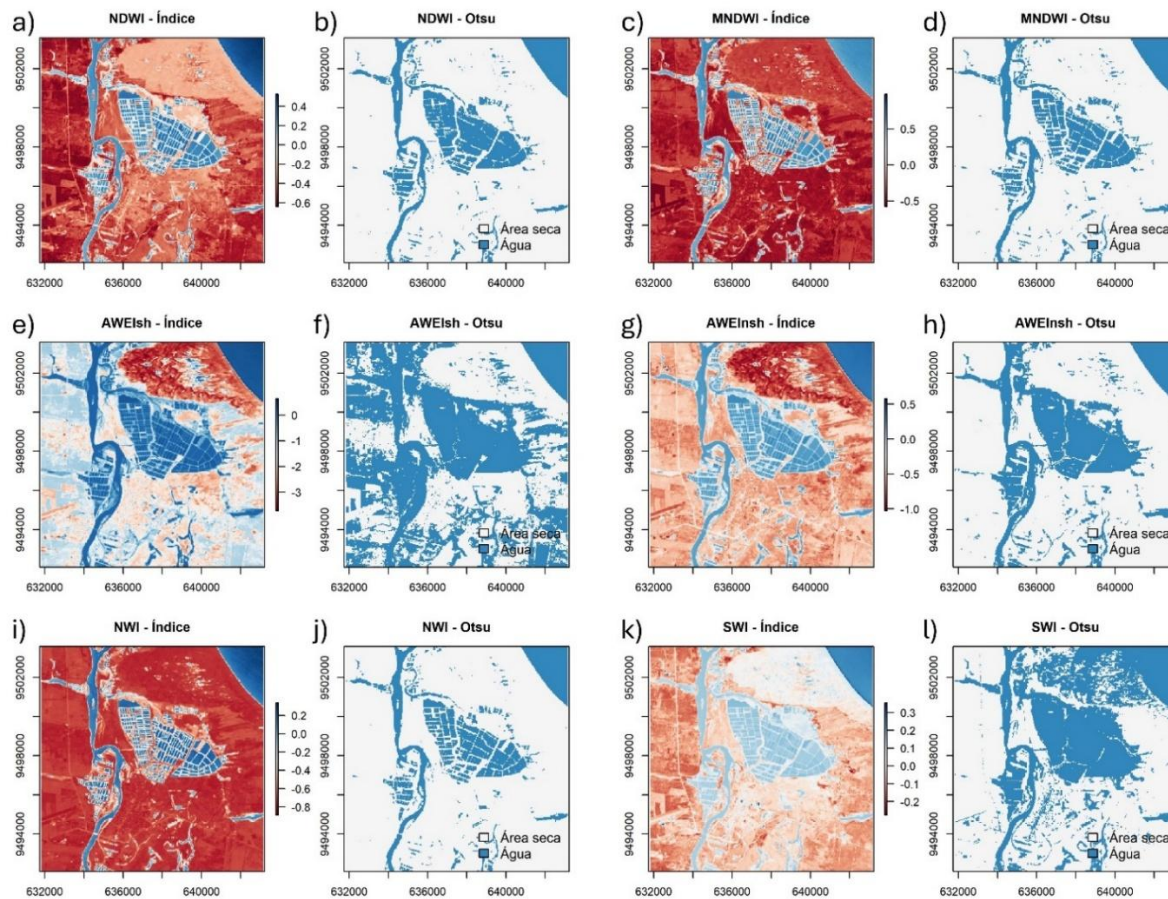
A Figura 2 apresenta os resultados visuais da aplicação dos índices espectrais NDWI, MNDWI, AWEIsh, AWEInsh, NWI e SWI (a, c, e, g, i, k), juntamente com o pixel de água (azul) detectados após as classificações binárias por meio do método de Otsu (b, d, f, h, j, l).

De modo geral, a espacialização dos índices revelou um contraste nítido entre os corpos d'água, representados pelo espelho d'água dos viveiros e o leito do rio, em tons frios (azuis), e as demais coberturas do solo, em tons quentes (vermelhos). Esse contraste é evidente nas imagens dos índices NDWI, MNDWI e NWI, com respostas espectrais mais estáveis e contornos bem definidos das superfícies com água. Já os resultados do AWEIsh e AWEInsh apresentaram um efeito de realce mais fraco, reforçando não apenas os espelhos d'água, mas também as regiões com sombras e áreas úmidas. O mesmo aconteceu com o SWI, com uma sensibilidade moderada à umidade residual do solo, revelando um contraste menos acentuado entre os valores de pixels de água e área seca.

Nas imagens classificadas após o limiar, observa-se que o NDWI-Otsu, MNDWI-Otsu e NWI-Otsu geraram resultados mais limpos, mantendo a consistência com a mínima inclusão de regiões secas. Ao analisar os taludes entre os viveiros, é perceptível o melhor desempenho entre o MNDWI-Otsu e NWI-Otsu. Por outro lado, os demais índices apresentaram maior propensão à sobreclassificação, com destaque para o AWEIsh-Otsu, cuja sensibilidade a áreas de sombra e solo úmido resultou em elevado número de falsos positivos.

Figura 2 – Índices espectrais e respectivas classificações binárias, obtidas pelo método Otsu, para delimitação de corpos d'água em toda a cena.

Figure 2 - Spectral indices and their respective binary classifications, obtained using the Otsu method, for the delineation of water bodies in the entire scene.



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Os valores estatísticos descritivos e limiares referentes aos índices espectrais da Figura 2 são apresentados na Tabela 2. Observa-se que os índices AWEIsh e AWEInsh apresentaram os maiores intervalos de variação (mínimos de -3,730 e -1,027, respectivamente), refletindo uma maior amplitude e sensibilidade a diferentes tipos de cobertura, especialmente em áreas com sombra ou solo úmido.

Em contrapartida, o SWI apresentou a menor amplitude de valores (mínimo de -0,276 e máximo de 0,354), com média próxima de zero (0,004) e o menor desvio-padrão entre os índices (0,094), indicando uma distribuição mais concentrada de valores e menor contraste espectral. Os limiares obtidos variaram entre -1,241 (AWEIsh) e 0,082 (MNDWI), refletindo as diferenças na resposta espectral de cada índice à presença de água. Esses resultados complementam a análise visual, demonstrando que índices com maior variabilidade interna tendem a apresentar maior propensão à sobreclassificação, enquanto aqueles com distribuições mais centradas e contrastes moderados, como o NDWI e NWI, resultaram em classificações mais consistentes.

Tabela 2 – Estatística descritiva e valores de limiar de Otsu para cada índice espectral na cena completa.

Table 2 – Descriptive statistics and Otsu threshold values for each spectral index in the full scene.

Índice	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão	Valor limiar
NDWI	-0,639	0,526	-0,271	0,275	-0,076
MNDWI	-0,579	0,982	-0,194	0,364	0,082
AWEIsh	-3,730	0,648	-1,228	0,932	-1,241
AWEInsh	-1,027	0,581	-0,345	0,322	-0,194
NWI	-0,891	0,337	-0,558	0,297	-0,312
SWI	-0,276	0,354	0,004	0,094	0,025

Fonte: Autores (2025)

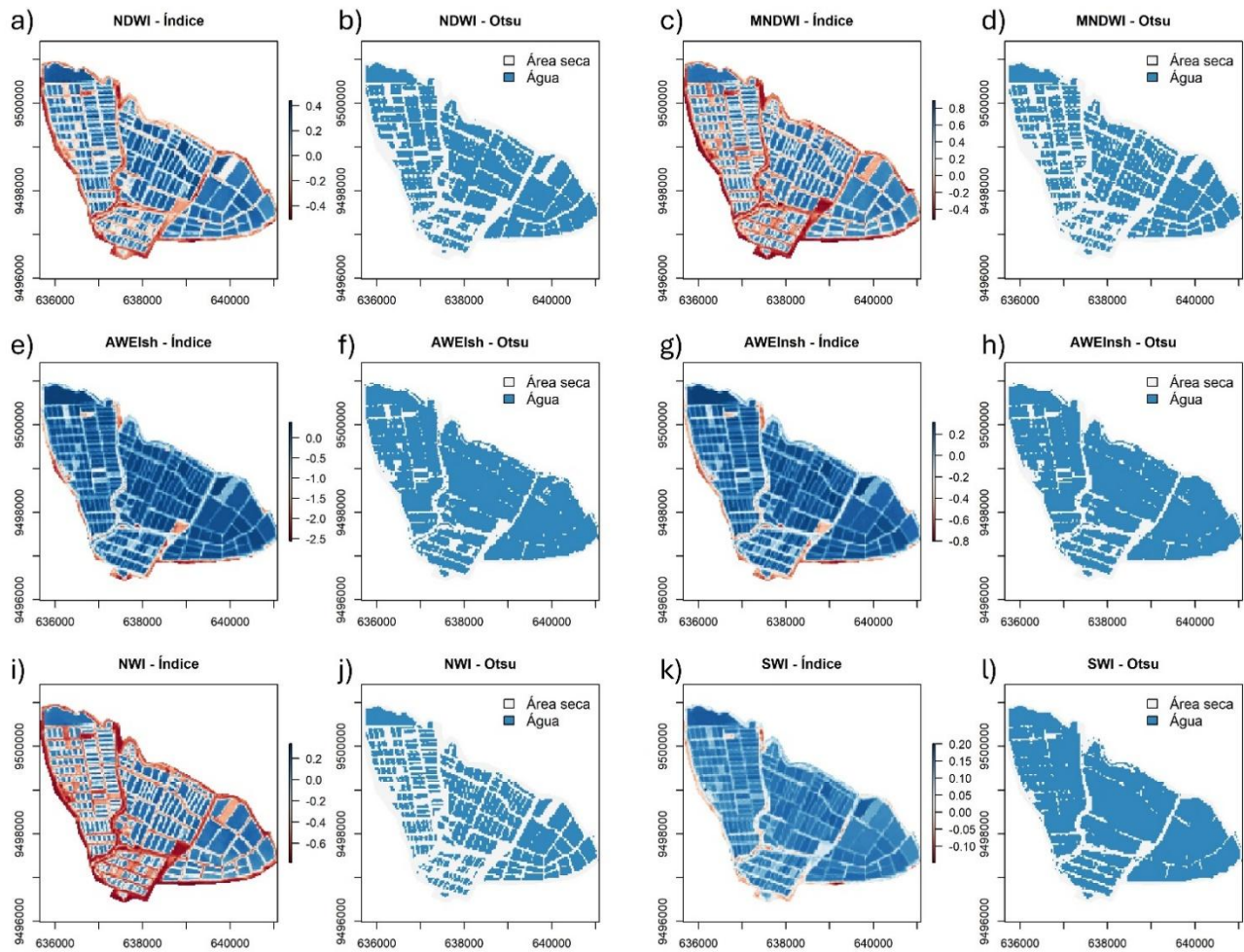
Source: Authors (2025)

Outras investigações utilizando índices espectrais para detecção de água sob diferentes cenários ambientais reforçam os padrões observados nesta pesquisa. Liu *et al.* (2023), ao utilizarem imagens do Landsat TM/OLI em duas regiões da província de Jilin, na China, observaram que o MNDWI e o NWI apresentaram respostas espectrais mais eficazes, com bom realce dos corpos d'água. Por outro lado, o SWI resultou em um desempenho inferior, com menor capacidade de contraste entre superfícies aquáticas e outros alvos da superfície, principalmente em áreas afetadas por nuvens e vegetação. Resultados reportados por Rad, Kreitler e Sadegh (2021), utilizando imagens do Landsat para detecção de corpos hídricos em diferentes regiões do mundo, demonstram baixo desempenho do AWEIsh quando comparado com outros índices. Os autores destacam que, antes da aplicação do limiar de Otsu, índices como WI e AWEIsh apresentaram alta taxa de falsos positivos, confundindo sombras e telhados com água, enquanto o MNDWI demonstrou desempenho mais consistente, embora ainda sensível a áreas de vegetação.

Com o intuito de avaliar uma possível melhoria na precisão e segmentação dos índices aplicados a uma região mais homogênea, são apresentados na Figura 3 os resultados espacializados dos índices e limiares Otsu à cena contendo exclusivamente a área dos viveiros aquícolas. É possível observar que os índices MNDWI, NWI e NDWI mantiveram bom contraste entre os viveiros (tons frios) e os diques (tons neutros e quentes), com contornos bem definidos. O SWI também apresentou realce satisfatório, embora com menor amplitude espectral. Por outro lado, os índices AWEIsh e AWEInsh reforçaram de forma intensa os viveiros, mas também responderam em algumas áreas dos taludes, sugerindo leve sobreposição entre alvos com alto teor de umidade e água. Nas cenas de aplicação do limiar de Otsu (b, d, f, h, j, l), nota-se uma melhor acurácia na separação dos alvos aquáticos (viveiros) e dos diques, quando comparado à cena completa (Figura 2).

Os índices NDWI-Otsu, MNDWI-Otsu e NWI-Otsu apresentaram segmentações bem definidas, com mínima ocorrência de ruídos e visível distinção entre tanques e bordas. O desempenho dos índices AWEIsh-Otsu e AWEInsh-Otsu também foi superior ao observado na Figura 2, com redução de falsos positivos, entretanto ainda ocorreram sobreclassificações nas regiões úmidas e nas extremidades dos tanques.

Figura 3 – Índices espectrais e respectivas classificações binárias, obtidas pelo método Otsu, para a área dos viveiros.
 Figure 3 - Spectral indices and their respective binary classifications, obtained using the Otsu method, for the pond area.



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Quanto aos valores estatísticos dos índices aplicados à área dos viveiros (Tabela 3), observa-se, de modo geral, uma tendência de elevação da média dos pixels e do limiar em comparação à cena completa, refletindo a homogeneidade espectral da região, com predominância de alvos aquáticos e zonas úmidas.

Os índices MNDWI e NDWI resultaram em uma considerável amplitude espectral, com valores máximos superiores a 0,43 e valores mínimos abaixo de -0,50, favorecendo o contraste entre os pixels de água e não aquáticos na região recortada. O índice com máximo valor (0,888) e maior desvio-padrão (0,373) foi o MNDWI, refletindo uma alta variabilidade dos valores de pixel e potencial para separar alvos com diferenças sutis de refletância. Já o SWI resultou na menor amplitude (máx = 0,200 e mín = -0,148) e o menor desvio-padrão (0,047), o que sugere uma baixa sensibilidade espectral e, consequentemente, limitada capacidade de segregação entre alvos com água e áreas úmidas, o que se confirma nos resultados visuais menos precisos, observados na Figura 3.

Tabela 3 – Estatística descritiva e valores de limiar de Otsu para cada índice espectral no recorte.

Table 3 – Descriptive statistics and Otsu threshold values for each spectral index in the subset.

Índice	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão	Valor limiar
NDWI	-0,510	0,439	0,102	0,234	0,0592
MNDWI	-0,521	0,888	0,274	0,373	0,252
AWEIsh	-2,560	0,387	-0,176	0,530	-0,4705
AWEInsh	-0,800	0,312	0,083	0,198	-0,0246
NWI	-0,781	0,337	-0,177	0,317	-0,180
SWI	-0,148	0,200	0,117	0,047	0,088

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

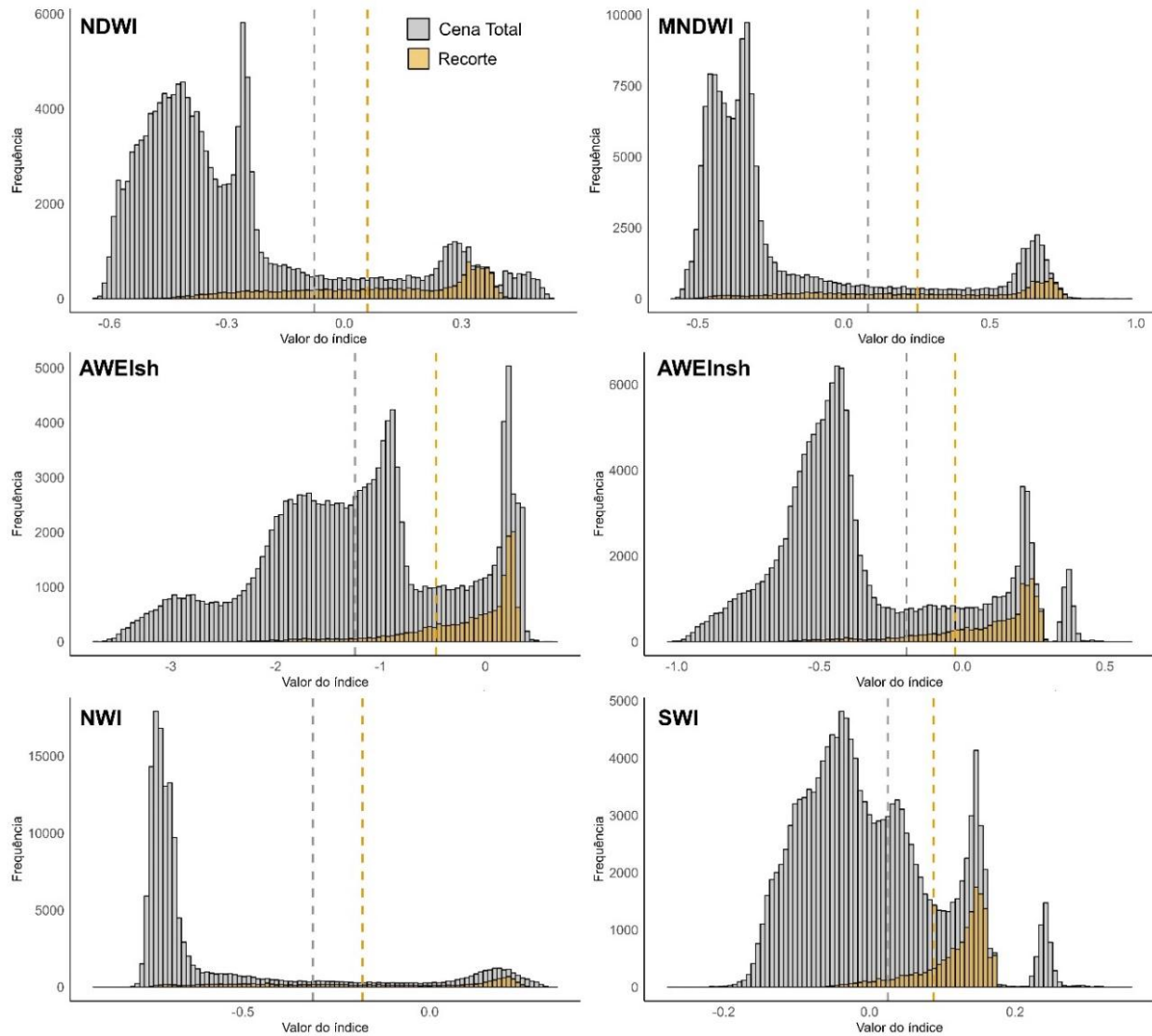
Os resultados das médias dos pixels refletem diferenças importantes na forma como os índices respondem aos alvos na região recortada. Valores positivos, resultantes dos índices NDWI, MNDWI, AWEInsh e SWI, demonstram predomínio de corpos d'água na cena, refletindo a capacidade das fórmulas em atribuir valores mais elevados aos pixels com água. Já o AWEIsh e o NWI apresentaram médias negativas, o que poderia erroneamente indicar uma menor sensibilidade para identificação de pixels com água. Entretanto, no caso do NWI, o desempenho visual (Figura 3 (i) e (j)) demonstra, como já mencionado anteriormente, segmentações bem definidas entre viveiros e taludes. Isso pode estar associado à maior amplitude do índice e à presença de valores fortemente negativos nas regiões de solo exposto e diques, favorecendo o contraste espectral com os viveiros, mesmo que os valores de pixels de água não estejam muito distantes de zero. Dessa forma, a média negativa resultante não reflete em um desempenho insatisfatório, mas em um padrão de distribuição onde os valores de solo são suficientemente distintos para permitir uma segmentação precisa, como foi observado após a aplicação do limiar de Otsu.

Ao comparar os parâmetros estatísticos da cena completa (Tabela 2) com os do recorte dos viveiros (Tabela 3), observa-se que a segmentação espacial mais homogênea (Figura 3) resultou, na maioria dos índices, em reduções na amplitude e no desvio-padrão, o que indica uma menor variabilidade espectral. Tal uniformidade demonstrou favorecer a aplicação do método de limiarização como o de Otsu nesse tipo de cena, visto que houve uma evidente segregação entre as classes. Destaca-se, por exemplo, a redução no valor do desvio-padrão dos índices AWEIsh (de 0,932 para 0,530) e AWEInsh (de 0,322 para 0,198), resultando em uma distribuição mais concentrada em torno do valor da média. Por outro lado, dois índices apresentaram comportamento diferente quanto o aumento do desvio-padrão após o recorte: MNDWI (de 0,364 para 0,373) e SWI (de 0,297 para 0,317). Essa elevação, embora discreta, possivelmente está associada a uma maior dispersão entre os pixels de água e áreas secas no recorte, o que pode reforçar o contraste espectral entre os viveiros e os taludes. A maior variabilidade local contribuiu para limiares de Otsu mais eficazes, como evidenciado pelo bom desempenho visual desses índices na Figura 3, com contornos bem definidos e baixa ocorrência de ruídos.

Os histogramas dos índices espectrais aplicados à cena e ao recorte da área dos viveiros é apresentada na Figura 4, juntamente com os respectivos resultados dos limiares Otsu representados pelas linhas tracejadas. De modo geral, o comportamento da frequência dos valores dos pixels na cena completa apresentou uma grande dispersão das classes devido à diversidade dos alvos presentes na cena. Já o recorte resultou em distribuições mais simples e concentradas, com separações evidentes entre as classes de interesse (água e área seca).

Figura 4 – Histogramas comparativos dos índices espectrais com limiares de Otsu para a cena total e com o recorte dos viveiros. Linhas tracejadas indicam os valores dos limiares.

Figure 4 - Comparative histograms of spectral indices with Otsu thresholds for the full scene and for the aquaculture ponds subset. Dashed lines indicate the threshold values.



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

Analisando as distribuições individualmente, observa-se que índices normalizados como o NDWI e o MNDWI apresentaram distribuições bimodais bem definidas e limiares posicionados próximos ao centro da faixa de valores, o que favorece a separação entre alvos. Resultados semelhantes foram obtidos por Wang et al. (2021), que aplicaram NDWI e MNDWI para identificação de corpos d'água em áreas costeiras da China, demonstrando que a configuração bimodal dos histogramas facilita o uso de limiares automáticos para distinguir água e superfícies secas.

Da mesma forma, Chang et al. (2022) validaram a robustez do MNDWI ao testar diferentes algoritmos de extração de água em cidades asiáticas, mostrando que a distribuição bem definida dos histogramas melhora a precisão dos limiares e a segmentação das áreas alagadas. O índice NWI, por sua vez, destacou-se pela capacidade de separação das classes no recorte, favorecendo visualmente a melhor segmentação entre água e diques.

Por outro lado, os índices subtrativos, como AWEIsh e AWEInsh, apresentaram histogramas mais assimétricos, com maior dispersão e sobreposição entre as classes, um padrão semelhante ao relatado por Bergsma et al. (2024). A redução do desvio-padrão observada na maioria dos índices após o recorte indica que ambientes mais homogêneos favorecem a segmentação precisa, como também evidenciado por Rad, Kreitler e Sadegh (2021), ao aplicarem o limiar de Otsu em áreas com vegetação aquática. Esses resultados reforçam a importância da escolha do índice espectral e da delimitação adequada da área de amostragem para maximizar a separabilidade, alinhando-se a abordagens recentes que propõem o refinamento adaptativo do limiar de Otsu com base nas características do histograma (Bergsma et al., 2024).

Complementando essa perspectiva, no contexto brasileiro, Silva Júnior (2024) avaliou a performance de quatro índices espectrais (NDWI, MNDWI, AWEI e o novo NGWI) aplicados a uma imagem Landsat-9 em uma região semiárida do Nordeste, demonstrando que todos os índices foram capazes de diferenciar pixels de água com desempenho satisfatório. O MNDWI mostrou-se particularmente eficaz na separação da água em relação à vegetação, beneficiado pela baixa interferência de sombras e alvos urbanos. Essa simplicidade espectral favoreceu resultados consistentes, mesmo na ausência do método de Otsu, o que reforça a relevância do contexto ambiental na segmentação espectral. Esses achados convergem com os de Tan et al. (2023), que analisaram a aplicação do limiar adaptativo em diferentes regiões do globo, incluindo a Amazônia (área 6), e identificaram que a variabilidade dos limiares e a eficácia do método de Otsu estão diretamente associadas à complexidade espectral e à distribuição do histograma local. Em ambos os estudos, destaca-se que ambientes mais homogêneos tendem a proporcionar limiares mais eficazes e segmentações mais consistentes, enquanto áreas complexas exigem abordagens mais refinadas.

Em síntese, as investigações atuais apontam que a configuração dos histogramas dos índices espectrais exerce influência direta na eficácia da segmentação automática por limiares, como o modelo de Otsu. Todavia, em cenários complexos, como aqueles compostos por áreas urbanas, agrícolas ou zonas de transição costeira, métodos complementares ou adaptativos têm sido propostos para superar limitações do limiar clássico, como o refinamento por mínimos locais sugerido por Bergsma et al. (2024). Tais avanços metodológicos revelam uma tendência promissora no uso combinado de índices otimizados e estratégias de limiarização mais flexíveis, especialmente úteis para segmentações mais precisas em imagens heterogêneas ou sujeitas a interferências de fundo.

4. Conclusão

Os resultados desta pesquisa demonstraram que a aplicação de índices espectrais para detecção de corpos hídricos, especialmente NDWI, MNDWI e NWI, combinados com um algoritmo de limiarização refinado baseado no limiar de Otsu, apresenta elevado potencial para mapeamento preciso de viveiros de camarão no rio Jaguaribe, Ceará. Através da análise dos histogramas, foi constatado que a escolha de áreas mais homogêneas, como o recorte dos viveiros, favorece a segmentação espectral entre água e áreas secas, otimizando a aplicação dos limiares automáticos. Os melhores resultados foram observados no índice NWI, que demonstrou a melhor capacidade de separação dos alvos tanto na cena maior como no recorte, seguido dos índices MNDWI e NDWI, enquanto índices subtrativos como AWEIsh, AWEInsh e SWI mostraram limitações devido à maior sensibilidade a sombras e superfícies úmidas não aquáticas.

As observações encontradas no estudo também apontam a importância da análise contextualizada, uma vez que ambientes complexos, com considerável heterogeneidade espectral e presença de elementos como vegetação marginal, taludes e áreas sombreadas, ainda representam desafios para a classificação automática baseada em índices espectrais tradicionais. A literatura recente, como demonstrado por Bergsma et al. (2024), direciona para a necessidade de abordagens adaptativas, como o refinamento do limiar de Otsu por mínimos locais ou métodos híbridos, especialmente em áreas costeiras e ambientes sujeitos a transições abruptas entre classes.

Destaca-se, finalmente, que a incorporação de imagens de satélite com o processamento automatizado e análise estatística dos dados configura uma importante estratégia para o monitoramento da aquicultura e dos recursos hídricos em larga escala. Recomenda-se que trabalhos futuros incluam as séries temporais, produtos com maior resolução espacial e abordagens com inteligência artificial, com o intuito de aprimorar ainda mais a acurácia das classificações, além de aumentar a aplicabilidade dos métodos em cenários mais complexos e dinâmicos.

5. Referências

- Bergsma, E. W., Klotz, A. N., Artigues, S., Graffin, M., Prenowitz, A., Delvit, J. M., & Almar, R. (2024). Shoreliner: A Sub-Pixel Coastal Waterline Extraction Pipeline for Multi-Spectral Satellite Optical Imagery. **Remote Sensing**, 16(15), 2795.
- Bishop-Taylor, R., Sagar, S., Lymburner, L., Alam, I., & Sixsmith, J. (2019). Sub-pixel waterline extraction: Characterising accuracy and sensitivity to indices and spectra. **Remote Sensing**, 11(24), 2984.
- Bungenstock, F., Irion, G., Machalett, B., de Souza Pinheiro, L., Wolters, S., & de Moraes, J. O. (2023). Change of sediment transport direction within the Rio Jaguaribe estuary, NE Brazil, by means of clay mineralogical analyses. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 287, 108323.
- Cavalcante, M. S., Marins, R. V., da Silva Dias, F. J., & de Rezende, C. E. (2021). Assessment of carbon fluxes to coastal area during persistent drought conditions. **Regional Studies in Marine Science**, 47, 101934.
- Chang, L., Cheng, L., Huang, C., Qin, S., Fu, C., & Li, S. (2022). Extracting urban water bodies from Landsat imagery based on mNDWI and HSV transformation. **Remote Sensing**, 14(22), 5785.
- Cotovicz Jr, L. C., Marins, R. V., & da Silva, A. R. F. (2022). Eutrophication amplifies the diel variability of carbonate chemistry in an equatorial, semi-arid, and negative estuary. **Frontiers in Marine Science**, 9, 767632.
- Dias, F. D. S., Marins, R. V., & Maia, L. P. (2009). Hydrology of a well-mixed estuary at the semi-arid Northeastern Brazilian coast. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 21(4), 377-385.
- Diniz, C., Cortinhas, L., Pinheiro, M. L., Sadeck, L., Fernandes Filho, A., Baumann, L. R., ... & Souza-Filho, P. W. M. (2021). A large-scale deep-learning approach for multi-temporal aqua and salt-culture mapping. **Remote Sensing**, 13(8), 1415.

- Edwards, P., Zhang, W., Belton, B., & Little, D. C. (2019). Misunderstandings, myths and mantras in aquaculture: Its contribution to world food supplies has been systematically over reported. **Marine Policy**, 106, 103547.
- FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Rome.
- Feng, D. (2009). A new method for fast information extraction of water bodies using remotely sensed data. **Remote Sensing Technology and Application**, 24(2), 167-171.
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. **Remote sensing of environment**, 140, 23-35.
- Gameiro, S., Nascimento, V., Facco, D., Sfredo, G., & Ometto, J. (2022). Multitemporal Spatial Analysis of Land Use and Land Cover Changes in the Lower Jaguaribe Hydrographic Sub-Basin, Ceará, Northeast Brazil. **Land**, 11(1), 103.
- Giri, S., Samanta, S., Mondal, P. P., Basu, O., Khorat, S., Chanda, A., & Hazra, S. (2022). A geospatial assessment of growth pattern of aquaculture in the Indian Sundarbans Biosphere Reserve. **Environment, Development and Sustainability**, 24(3), 4203-4225.
- Gumma, M. K., Amede, T., Getnet, M., Pinjarla, B., Panjala, P., Legesse, G., Whitbread, A. M. (2022). Assessing potential locations for flood-based farming using satellite imagery: a case study of Afar region, Ethiopia. **Renewable Agriculture and Food Systems**, 37(S1), S28-S42.
- Herndon, K., Muench, R., Cherrington, E., & Griffin, R. (2020). An assessment of surface water detection methods for water resource management in the Nigerien Sahel. **Sensors**, 20(2), 431.
- Islam, M. A., Thenkabail, P. S., Kulawardhana, R. W., Alankara, R., Gunasinghe, S., Edussriya, C., & Gunawardana, A. (2008). Semi-automated methods for mapping wetlands using Landsat ETM+ and SRTM data. **International Journal of Remote Sensing**, 29(24), 7077-7106.
- Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., Li, X., Ju, H., He, G., Qin, X. (2021). An effective water body extraction method with new water index for sentinel-2 imagery. **Water**, 13(12), 1647.
- Kolli, M. K., Opp, C., Karthe, D., & Pradhan, B. (2022). Automatic extraction of large-scale aquaculture encroachment areas using Canny Edge Otsu algorithm in Google Earth Engine—the case study of Kolleru Lake, South India. **Geocarto International**, 37(26), 11173-11189.
- Kurekin, A. A., Miller, P. I., Avillanosa, A. L., & Sumeldan, J. D. (2022). Monitoring of coastal aquaculture sites in the Philippines through automated time series analysis of Sentinel-1 SAR images. **Remote Sensing**, 14(12), 2862.
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. **Remote sensing of environment**, 106(1), 66-74.

- Lacerda, L. D., Ward, R. D., Godoy, M. D. P., de Andrade Meireles, A. J., Borges, R., & Ferreira, A. C. (2021). 20-years cumulative impact from shrimp farming on mangroves of Northeast Brazil. **Frontiers in Forests and Global Change**, 4, 653096.
- Li, B., Liu, K., Wang, M., Wang, Y., He, Q., Zhuang, L., & Zhu, W. (2023). High-spatiotemporal-resolution dynamic water monitoring using LightGBM model and Sentinel-2 MSI data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 118, 103278.
- Liu, S., Wu, Y., Zhang, G., Lin, N., & Liu, Z. (2023). Comparing water indices for landsat data for automated surface water body extraction under complex ground background: a case study in Jilin Province. **Remote Sensing**, 15(6), 1678.
- 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**, 17(7), 1425-1432.
- Oliveira Júnior, M. A. C., Gomes, É. R., Rocha, G. C. (2021). Impactos ambientais da carcinicultura em ambientes costeiros: avaliação a partir de análise bibliométrica. **Revista de Geociências do Nordeste**, 7(2), 193-201.
- Peng, Y., Sengupta, D., Duan, Y., Chen, C., & Tian, B. (2022). Accurate mapping of Chinese coastal aquaculture ponds using biophysical parameters based on Sentinel-2 time series images. **Marine Pollution Bulletin**, 181, 113901.
- Prasad, K. A., Ottinger, M., Wei, C., & Leinenkugel, P. (2019). Assessment of coastal aquaculture for India from Sentinel-1 SAR time series. **Remote sensing**, 11(3), 357.
- Rad, A. M., Kreitler, J., & Sadegh, M. (2021). Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring. **Environmental Modelling & Software**, 140, 105030.
- São José, F. D., Novo, Y. D. C., Farias, A. R., Magalhães, L. A., Fonseca, M. F., Flaviano Fernandes De São José, B. U. (2022). Mapeamento de viveiros escavados para aquicultura no Brasil por sensoriamento remoto. **Embrapa Territorial**, Campinas, São Paulo.
- Shiklomanov, A. N., Bradley, B. A., Dahlin, K. M., M Fox, A., Gough, C. M., Hoffman, F. M., ... & Smith, W. K. (2019). Enhancing global change experiments through integration of remote-sensing techniques. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 17(4), 215-224.
- Silva Júnior, J. A. (2024). Assessment of Water Spectral Indices Using a Landsat-9 scene: a Case Study in a Semi-arid Region. **Rev. Bras. Cartogr**, 76.
- Tan, J., Tang, Y., Liu, B., Zhao, G., Mu, Y., Sun, M., & Wang, B. (2023). A self-adaptive thresholding approach for automatic water extraction using sentinel-1 sar imagery based on otsu algorithm and distance block. **Remote Sensing**, 15(10), 2690.
- Wang, M., Mao, D., Xiao, X., Song, K., Jia, M., Ren, C., & Wang, Z. (2023). Interannual changes of coastal aquaculture ponds in China at 10-m spatial resolution during 2016–2021. **Remote Sensing of Environment**, 284, 113347.

Wang, Q., Zhang, Z., Hao, Z., Liu, B., & Xiong, J. (2021). Optical classification of coastal water body in China using hyperspectral imagery CHRIS/PROBA. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** (Vol. 668, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.

Wang, X., Xiao, X., Zou, Z., Hou, L., Qin, Y., Dong, J., ... & Li, B. (2020). Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 163, 312-326.

Ximenes, L. F., & de Fatima Vidal, M. (2023). PISCICULTURA. **Caderno Setorial ETENE**, 272(8).

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 27(14), 3025-3033.

Xu, X., Xu, S., Jin, L., & Song, E. (2011). Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. **Pattern recognition letters**, 32(7), 956-961.