UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONAL
EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS
MESTRADO PROFISSIONAL EM
GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Isaac Dias Soares

Sensoriamento remoto aplicado à avaliação de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico: estudo de caso na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, Ceará

PAU DOS FERROS - RN
2026

Isaac Dias Soares

Sensoriamento remoto aplicado à avaliação de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico: estudo de caso na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, Ceará

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos.

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

Orientador: Prof. Dr. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes

PAU DOS FERROS - RN

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D676s DIAS SOARES, ISAAC.
Sensoriamento remoto aplicado à avaliação de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico: estudo de caso na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, Ceará / ISAAC DIAS SOARES. - 2026.
136 f. : il.

Orientador: ROGERIO TAYGRA VASCONCELOS FERNANDES.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos, 2026.

1. monitoramento ambiental. 2. região semiárida. 3. sentinel-2. 4. reflectâncias. I. VASCONCELOS FERNANDES, ROGERIO TAYGRA, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC´s) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecasda Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Isaac Dias Soares

Sensoriamento remoto aplicado à avaliação de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico: estudo de caso na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, Ceará

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

Defendida em: _____ / _____ / _____.

BANCA EXAMINADORA:

_____

Professor Dr. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes (UFERSA)

Orientador

_____

Professora Dra. Daniela de Freitas Lima (UFERSA)

Membro Examinador

_____

Dr. Mário Ubirajara Gonçalves Barros (COGERH)

Membro Examinador

PAU DOS FERROS - RN

A Deus, minha fonte de força e sabedoria. Aos meus pais, Antônio (in memoriam) e Ivanilda. À minha irmã e ao meu sobrinho. À minha filha, Isabelle, e à minha esposa, Grasielle, pelo constante apoio e incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada, iluminando meus passos e permitindo que eu superasse os desafios encontrados durante esta jornada.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes, expresso minha sincera gratidão pelos ensinamentos, pela dedicação, pela orientação, pela confiança depositada em meu trabalho e pela paciência em todos os momentos do desenvolvimento desta pesquisa. Sua contribuição foi essencial para a concretização desta dissertação.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho, bem como pelas valiosas contribuições, sugestões e reflexões, que certamente enriqueceram esta pesquisa.

À minha família, deixo meu mais profundo agradecimento pelo amor incondicional, pelo apoio constante, pela compreensão, pela paciência diante das minhas ausências e pelos incentivos que nunca me deixaram desistir dos meus objetivos. Esta conquista também pertence a vocês.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Professor Dr. Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho, pelo compromisso com a qualidade do curso, pela dedicação ao programa e pelo apoio prestado durante esta trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pelo apoio ao Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, fundamental para a formação e qualificação dos profissionais da área.

À Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), agradeço pela autorização concedida para minha participação no mestrado, tornando possível conciliar minhas atividades profissionais com a formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, seja por meio de incentivo, apoio, amizade, compreensão ou palavras de encorajamento. Cada gesto de apoio foi importante para que este objetivo fosse alcançado.

A todos, minha sincera gratidão.

“O Senhor é a minha força e o meu escudo;
nele o meu coração confia”

Salmos 28:7

RESUMO

O monitoramento da qualidade da água é fundamental para a gestão dos recursos hídricos, especialmente no semiárido cearense, onde a variabilidade climática e a intensificação das pressões antrópicas tornam essa demanda ainda mais relevante. No baixo curso do rio Jaguaribe, a qualidade da água pode ser influenciada por atividades como agricultura irrigada, carcinicultura, abastecimento urbano e lançamento de efluentes, enquanto o monitoramento convencional apresenta limitações relacionadas aos custos operacionais e à frequência das coletas. Nesse contexto, esta pesquisa avaliou, em caráter exploratório, o potencial das imagens Sentinel-2/MSI como ferramenta complementar ao monitoramento da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará, com foco nos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. A área de estudo compreendeu os pontos JAG-14, em Quixeré, JAG-16, em Jaguaruana, e JAG-06, em Itaiçaba, monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará - Cogerh. Os dados de qualidade da água foram integrados às reflectâncias extraídas de imagens Sentinel-2/MSI. A análise concentrou-se na avaliação da relação entre os parâmetros monitorados e as bandas espectrais, razões entre bandas, índices normalizados e modelos exploratórios de regressão linear simples e múltipla. Os resultados indicaram correlações predominantemente fracas entre as bandas individuais e os parâmetros analisados. As melhores associações ocorreram com razões e índices espectrais, especialmente a razão B4/B3, que apresentou $r = 0,341$ para cor verdadeira, $r = 0,306$ para turbidez e $r = 0,296$ para sólidos totais. O índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3) apresentou $r = 0,317$, $r = 0,285$ e $r = 0,278$, respectivamente. Os modelos gerais de regressão apresentaram capacidade explicativa limitada, com melhor desempenho para cor verdadeira no modelo com razões e índices espectrais, cujo R^2 foi de 0,293. Por outro lado, os modelos por ponto de monitoramento apresentaram ajustes superiores em alguns trechos, especialmente para sólidos totais em JAG-14, com $R^2 = 0,833$, e para cor verdadeira e sólidos totais em JAG-16, com $R^2 = 0,755$ e $R^2 = 0,792$, respectivamente. Conclui-se que o Sentinel-2/MSI apresenta potencial como ferramenta complementar ao monitoramento convencional da qualidade da água, principalmente em análises exploratórias e em modelos específicos por trecho. Entretanto, sua aplicação em ambiente lótico semiárido apresenta limitações, não permitindo, nesta etapa, a adoção de modelos preditivos gerais ou a substituição das coletas *in situ*.

Palavras-chave: monitoramento ambiental; região semiárida; sentinel-2; reflectâncias.

ABSTRACT

Water quality monitoring is essential for water resources management, especially in the semi-arid region of Ceará, where climate variability and the intensification of anthropogenic pressures make this demand even more relevant. In the lower course of the Jaguaribe River, water quality may be influenced by activities such as irrigated agriculture, shrimp farming, urban water supply, and effluent discharge, while conventional monitoring presents limitations related to operational costs and sampling frequency. In this context, this research explored the potential of Sentinel-2/MSI images as a complementary tool for water quality monitoring in the lower course of the Jaguaribe River, Ceará, focusing on the parameters true color, turbidity, and total solids. The study area comprised the monitoring points JAG-14, in Quixeré, JAG-16, in Jaguaruana, and JAG-06, in Itaiçaba, monitored by the Water Resources Management Company of Ceará — COGERH. Water quality data were integrated with reflectance values extracted from Sentinel-2/MSI images. The analysis focused on evaluating the relationship between the monitored parameters and spectral bands, band ratios, normalized indices, and exploratory simple and multiple linear regression models. The results indicated predominantly weak correlations between individual bands and the analyzed parameters. The strongest associations were observed with spectral ratios and indices, especially the B4/B3 ratio, which presented $r = 0.341$ for true color, $r = 0.306$ for turbidity, and $r = 0.296$ for total solids. The normalized index (B4-B3)/(B4+B3) presented $r = 0.317$, $r = 0.285$, and $r = 0.278$, respectively. The general regression models showed limited explanatory capacity, with the best performance observed for true color in the model using spectral ratios and indices, with $R^2 = 0.293$. On the other hand, point-specific models showed better adjustments in some river stretches, especially for total solids at JAG-14, with $R^2 = 0.833$, and for true color and total solids at JAG-16, with $R^2 = 0.755$ and $R^2 = 0.792$, respectively. It is concluded that Sentinel-2/MSI has potential as a complementary tool to conventional water quality monitoring, mainly for exploratory analyses and stretch-specific models. However, its application in a semi-arid lotic environment presents limitations, not allowing, at this stage, the adoption of general predictive models or the replacement of *in situ* sampling.

Keywords: environmental monitoring; semi-arid region; Sentinel-2; reflectance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de monitoramento de qualidade da água em rios no estado do Ceará 22

Figura 2 – Representação esquemática das resoluções de sensores ópticos aplicadas ao sensoriamento remoto 25

Figura 3 – Bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Estado do Ceará 33

Figura 4 – Pontos de monitoramento utilizados na pesquisa 40

Figura 5 – Captura de tela do banco de dados de qualidade de água da Cogerh 42

Figura 6 – Disponibilidade de dados de monitoramento *in situ* realizado pela Cogerh no rio Jaguaribe 43

Figura 7 – Largura das bandas a serem utilizadas na obtenção de grandezas radiométricas para os sensores embarcados no Sentinel-2 (S2) 44

Figura 8 – Fluxograma do processamento dos dados orbitais Sentinel-2 e integração com os dados de qualidade da água 51

Figura 9 – Fluxograma de metodologia de pesquisa 52

Figura 10 – Boxplots com a distribuição dos valores dos principais parâmetros de qualidade da água 63

Figura 11 – Série temporal dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento no rio Jaguaribe 65

Figura 12 – Distribuição dos valores de reflectância nos pontos de monitoramento para as bandas Sentinel-2 utilizadas na pesquisa 67

Figura 13 – Relações entre cor verdadeira e reflectâncias Sentinel-2 70

Figura 14 – Relações entre turbidez e reflectâncias Sentinel-2 70

Figura 15 – Relações entre sólidos totais e reflectâncias Sentinel-2 71

Figura 16 – Correlação de Pearson entre variáveis espectrais Sentinel-2 e parâmetros de qualidade da água 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de monitoramento de qualidade no Baixo Jaguaribe utilizados na pesquisa 39
Tabela 2 – Largura estimada da lâmina d'água nos pontos de monitoramento utilizados na pesquisa . 40
Tabela 3 – Síntese da compatibilização entre dados de qualidade da água e imagens Sentinel-2 54
Tabela 4 – Distribuição dos registros válidos por ponto de monitoramento 55
Tabela 5 – Distribuição anual dos registros válidos 55
Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de qualidade da água 62
Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento 64
Tabela 8 – Estatísticas descritivas das reflectâncias extraídas das bandas Sentinel-2 66
Tabela 9 – Estatísticas dos parâmetros de qualidade da água por período sazonal 68
Tabela 10 – Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros de qualidade da água e bandas Sentinel-2 69
Tabela 11 – Principais variáveis espectrais mais correlacionadas com os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais 74
Tabela 12 – Melhores regressões simples com bandas individuais 76
Tabela 13 – Regressão linear múltipla com bandas B2, B3, B4 e B8 77
Tabela 14 – Regressão múltipla geral com índices espectrais 77
Tabela 15 – Regressão múltipla por ponto com índices espectrais 78

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reflectância de sensoriamento remoto 25

Equação 2 – Reflectância na coluna d’água 25

Equação 3 – Modelo de regressão linear simples 57

Equação 4 – Modelo de regressão linear múltipla 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
B2	Banda 2 do sensor MSI/Sentinel-2, faixa do azul
B3	Banda 3 do sensor MSI/Sentinel-2, faixa do verde
B4	Banda 4 do sensor MSI/Sentinel-2, faixa do vermelho
B8	Banda 8 do sensor MSI/Sentinel-2, faixa do infravermelho próximo
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CE	Ceará
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
ESA	European Space Agency
GEE	Google Earth Engine
GRH	Gestão de Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
JAG-06	Ponto de monitoramento da qualidade da água localizado em Itaiçaba
JAG-14	Ponto de monitoramento da qualidade da água localizado em Quixeré
JAG-16	Ponto de monitoramento da qualidade da água localizado em Jaguaruana
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	MultiSpectral Instrument
NIR	Near Infrared
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLI	Operational Land Imager
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PROGESTÃO	Programa de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas
RHNR	Rede Hidrológica Nacional de Referência
RNQA	Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água

SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGERH	Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
SWIR	Short-Wave Infrared
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
VIS	Visible

LISTA DE SÍMBOLOS

R — Reflectância

Rrs — Reflectância de sensoriamento remoto

Lw — Radiância emergente da coluna d'água

Es — Irradiância incidente na superfície

Eu — Irradiância espectral ascendente

Ed — Irradiância espectral descendente

θ — Ângulo zenital de observação

ϕ — Ângulo azimutal de observação

λ — Comprimento de onda

z — Profundidade na coluna d'água

r — Coeficiente de correlação de Pearson

R^2 — Coeficiente de determinação

β_0 — Coeficiente linear da regressão

β_1 — Coeficiente angular da regressão

βn — Coeficiente associado à n-ésima variável independente

Y — Variável dependente no modelo de regressão

X — Variável independente no modelo de regressão

ε — Termo de erro do modelo de regressão

n — Número de observações

p — Valor de p associado ao teste estatístico

% — Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 OBJETIVOS 13
2.1 Objetivo geral 13
2.2 Objetivos específicos 13
3 REFERENCIAL TEÓRICO 14
3.1 Gestão de recursos hídricos no Brasil 14
3.2 Gestão de recursos hídricos no Ceará 15
3.3 Objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) e gestão da qualidade da água 17
3.4 Qualidade da água e usos múltiplos 18
3.5 Monitoramento da qualidade da água 20
3.6 Geotecnologias aplicadas aos recursos hídricos 23
3.7 Sensoriamento remoto aplicado à qualidade da água 24
3.8 Sentinel-2 e o Sensor MSI 28
3.9 Resposta espectral da água e dos parâmetros avaliados 29
3.10 Mistura espectral e efeito de adjacência em corpos hídricos estreitos 31
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 33
4.1 Contexto histórico e ocupação do Baixo Jaguaribe 33
4.2 Dinâmica da gestão hídrica e conflitos pelo uso da água 34
4.3 Expansão econômica e pressões ambientais 35
4.3.1 Agricultura irrigada 35
4.3.2 Expansão da Carcinicultura no Baixo Jaguaribe 36
4.3.3 Atividades Industriais e Extração Mineral 36
4.4 Dinâmica hidrológica do rio Jaguaribe 37
4.5 Saneamento e lançamento de efluentes 37
4.6 Gestão e fiscalização dos recursos hídricos 38
5 MATERIAIS E MÉTODOS 39
5.1 Área de estudo 39
5.2 Dados utilizados 41
5.2.1 Dados de qualidade da água 41
5.2.2 Dados pluviométricos 43
5.2.3 Dados orbitais 43
5.3 Justificativa das variáveis analisadas 45
5.3.1 Cor verdadeira 45
5.3.2 Turbidez 46
5.3.3 Sólidos totais 46
5.3.4 Bandas Sentinel-2 e índices espectrais utilizados 47
5.3.5 Variáveis não selecionadas 49
5.4 Obtenção e processamento dos dados orbitais no Google Earth Engine 49
5.4.1 Fluxo metodológico da pesquisa 51
5.5 Compatibilização entre dados *in situ* e imagens orbitais 53
5.6 Organização e tratamento da base de dados 54
5.7 Análise estatística 56
5.8 Análise da sazonalidade e da influência da precipitação 58
5.9 Revisão e estruturação textual com apoio de ferramentas de inteligência artificial 59
6 RESULTADOS 61
6.1 Caracterização da base final de análise 61
6.2 Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água 61
6.3 Variação dos parâmetros por ponto de monitoramento 63
6.4 Estatística descritiva das reflectâncias Sentinel-2 65
6.5 Avaliação sazonal dos parâmetros de qualidade da água 67
6.6 Correlação entre parâmetros de qualidade da água e bandas individuais 68

6.7 Avaliação de índices e razões espectrais 72
6.8 Avaliação exploratória de modelos de regressão 75
6.9 Síntese dos principais resultados 79
7 DISCUSSÃO 81
7.1 Aplicações consolidadas em reservatórios e lagos 81
7.2 Desafios da aplicação em rios 83
7.3 Interpretação dos resultados no rio Jaguaribe 85
7.4 Índices espectrais e modelos exploratórios de regressão 87
7.5 Potencial e limitações do Sentinel-2 para o monitoramento complementar da qualidade da água 90
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 91
APÊNDICE A – VARIÁVEIS ESPECTRAIS SENTINEL-2/MSI 104
APÊNDICE B – TODAS AS IMAGENS PARA ITAIÇABA 107
APÊNDICE C – TODAS AS IMAGENS PARA QUIXERÉ 109
APÊNDICE D – TODAS AS IMAGENS PARA JAGUARUANA 111
ANEXO A – PLANILHA ORIGINAL DE DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DISPONIBILIZADA PELA COGERH 113

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos no Brasil envolve desafios relacionados à disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas, à variabilidade climática, à intensificação dos usos e à degradação dos corpos hídricos. Nesse contexto, a efetividade da estrutura institucional de gestão descentralizada e participativa depende também da transformação de dados de monitoramento em informações úteis ao planejamento e à tomada de decisão nas bacias hidrográficas (Nicollier; Kiperstok; Bernardes, 2023; Majeski; Trindade, 2023).

No semiárido brasileiro, a irregularidade das chuvas e a dependência de sistemas de armazenamento e regularização hídrica tornam especialmente relevante a avaliação conjunta da quantidade e da qualidade da água. O fortalecimento da governança, do planejamento e do monitoramento ambiental integra as estratégias discutidas para a redução das vulnerabilidades relacionadas à escassez hídrica (Dias; Teixeira; Pessoa, 2025).

O monitoramento sistemático da qualidade da água permite acompanhar as condições dos corpos hídricos, identificar tendências de alteração e subsidiar o planejamento, a fiscalização e a gestão dos usos múltiplos. As campanhas de campo e as análises laboratoriais fornecem dados diretamente associados aos locais e momentos de coleta, mas a cobertura espacial e temporal do monitoramento pode ser limitada pela periodicidade das campanhas, pelos custos operacionais e pela distribuição dos pontos amostrais (Von Sperling, 2014; ANA, 2019).

O sensoriamento remoto orbital constitui uma possibilidade de complementar essas observações, mediante o registro da resposta espectral da superfície da água. Estudos desenvolvidos em diferentes regiões do Brasil investigaram relações entre imagens orbitais e atributos limnológicos, sobretudo em ambientes lênticos, como lagos, reservatórios e açudes, caracterizados pela ausência de escoamento predominantemente unidirecional (Lopes *et al*., 2021; Maciel *et al*., 2021; Pompêo *et al*., 2021).

Em ambientes lóticos, como rios e córregos, nos quais a água apresenta escoamento ao longo do canal, a aplicação dessas técnicas enfrenta condições distintas. A dinâmica do fluxo, a variabilidade temporal e a largura reduzida de determinados trechos, quando comparada à resolução espacial dos sensores orbitais, podem comprometer a correspondência entre as medições *in situ* e a reflectância registrada por satélite. Essas questões justificam a investigação do potencial e das limitações do sensoriamento remoto em sistemas fluviais (Brito *et al*., 2022; Crioni; Teramoto; Chang, 2023; Frasson *et al*., 2024).

Na Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, no Ceará, a avaliação da qualidade da água possui relevância para a gestão regional. A regularização de vazões por reservatórios estratégicos, especialmente o Açude Castanhão, está associada à organização da oferta hídrica ao longo do médio e baixo curso do rio Jaguaribe, onde coexistem diferentes atividades e demandas de uso da água (COGERH, 2021).

Entre as pressões ambientais identificadas na região estão as atividades de agricultura irrigada, carcinicultura, usos urbanos e lançamentos de efluentes. Estudos sobre a carcinicultura em águas interiores discutem alterações relacionadas à salinização e ao lançamento de efluentes, reforçando a pertinência de acompanhar a qualidade dos corpos hídricos em áreas sujeitas a usos múltiplos (Figueirêdo *et al*., 2006; Cid; Reis; Souza Filho, 2018).

A experiência cearense de gestão dos recursos hídricos inclui a operação de reservatórios estratégicos, a alocação negociada de água e a atuação em escala de bacias hidrográficas. Nesse arranjo, a integração de informações sobre qualidade da água ao planejamento e à tomada de decisão é particularmente pertinente para rios perenizados e sujeitos a pressões de uso diversas (Ceará, 2010; COGERH, 2021; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024).

A integração de medições de campo com informações orbitais pode acrescentar uma dimensão espacial à avaliação das condições ambientais do rio Jaguaribe. O sensor MultiSpectral Instrument (MSI), a bordo dos satélites Sentinel-2, dispõe de bandas espectrais que permitem investigar associações entre reflectância e parâmetros de qualidade da água. Em trechos fluviais, porém, a interpretação dessas associações exige atenção à resolução espacial das imagens, à proximidade temporal entre a passagem do satélite e a coleta de campo, à influência das margens e à variabilidade hidrológica.

Nessa perspectiva, a questão central da pesquisa consiste em examinar em que medida as informações espectrais do Sentinel-2/MSI se relacionam com os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais, medidos por monitoramento convencional em pontos selecionados do baixo curso do rio Jaguaribe. A investigação deve considerar não apenas a presença de associações estatísticas, mas também as condições e limitações de sua interpretação em ambiente lótico semiárido.

Assim, este estudo avalia, em caráter exploratório, o potencial do sensoriamento remoto orbital como instrumento complementar ao monitoramento *in situ*, sem pressupor a substituição das campanhas de campo ou a obtenção de modelos preditivos de aplicação geral. A abordagem busca contribuir para o entendimento de possibilidades de integração entre dados orbitais e registros institucionais de qualidade da água.

A pesquisa também se relaciona à produção e à organização de informações para a gestão dos recursos hídricos, no âmbito da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A contribuição pretendida é oferecer evidências sobre as possibilidades e as restrições do uso complementar de imagens Sentinel-2 no monitoramento do Baixo Jaguaribe, sem antecipar sua adoção operacional ou extrapolar os resultados para outros trechos e períodos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o potencial do sensoriamento remoto orbital, por meio de imagens Sentinel-2/MSI, como ferramenta complementar ao monitoramento da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará, considerando os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a variabilidade espacial, temporal e sazonal dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais nos pontos de monitoramento selecionados no baixo curso do rio Jaguaribe;
- Analisar as relações entre os parâmetros de qualidade da água obtidos por monitoramento *in situ* e as respostas espectrais registradas pelo sensor MSI/Sentinel-2;
- Avaliar, em caráter exploratório, a aplicação de bandas individuais, razões espectrais, índices normalizados e modelos de regressão na representação dos parâmetros de qualidade da água estudados;
- Identificar e discutir as potencialidades e limitações técnicas e metodológicas da utilização do Sentinel-2/MSI no monitoramento complementar da qualidade da água em ambientes lóticos do semiárido brasileiro;
- Elaborar uma minuta de nota técnica com a sistematização dos resultados, das limitações identificadas e das recomendações para a aplicação complementar do sensoriamento remoto ao monitoramento da qualidade da água.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Gestão de recursos hídricos no Brasil

A gestão de recursos hídricos envolve instrumentos, instituições e práticas voltados à administração da disponibilidade, da qualidade e dos usos da água, bem como à mediação dos conflitos associados à sua utilização. No Brasil, sua organização se apoia na gestão descentralizada, na participação social e na bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento (Brasil, 1997; Jacobi, 2006; Porto; Porto, 2008).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, consolidou o marco federal de gestão das águas, ao estabelecer fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos para a atuação do poder público e dos usuários (Brasil, 1997).

A PNRH foi concebida em um contexto de reformulação dos modelos de gestão ambiental e de fortalecimento dos mecanismos participativos de tomada de decisão, incorporando princípios relacionados à gestão integrada e à governança das águas (Jacobi, 2006). Entre seus fundamentos, a legislação reconhece a água como bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico, estabelecendo diretrizes para a compatibilização dos usos múltiplos e para a promoção da segurança hídrica (Brasil, 1997).

A Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, também instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Sua composição abrange o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, os conselhos de recursos hídricos dos estados e do Distrito Federal, os comitês de bacia hidrográfica, os órgãos dos poderes públicos cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos e as agências de água (Brasil, 1997).

Para operacionalizar a política hídrica, foram estabelecidos instrumentos de gestão voltados ao planejamento, controle e monitoramento dos usos da água, incluindo os Planos de Recursos Hídricos, a outorga de direito de uso, a cobrança pelo uso da água, o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos e o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso (Brasil, 1997). A atuação integrada desses instrumentos é apresentada como elemento fundamental para a efetivação dos objetivos da política hídrica e para a promoção do uso sustentável da água (Porto; Porto, 2008).

O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes, é um dos instrumentos da PNRH. Ele orienta a definição de metas de qualidade a serem alcançadas

ou mantidas, de acordo com os usos pretendidos, e articula o planejamento hídrico às ações de monitoramento e controle da poluição (Brasil, 1997; Porto; Porto, 2008).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil está inserida em um contexto marcado por desigualdades regionais, expansão das atividades econômicas, crescimento urbano e limitações associadas à infraestrutura de saneamento básico (Pires do Rio; Moura; Sales, 2004).

Aspectos relacionados à participação social e à governança das águas são frequentemente abordados na literatura sobre gestão hídrica no Brasil. Os Comitês de Bacia Hidrográfica são reconhecidos como espaços institucionais voltados à negociação de conflitos, à articulação entre usuários e à construção de decisões compartilhadas sobre os recursos hídricos (Jacobi, 2006). Estudos realizados em diferentes regiões do país apontam distintos níveis de consolidação desses mecanismos participativos e diferentes graus de influência dos atores sociais nos processos decisórios (Morais; Fadul; Cerqueira, 2018; Abers; Keck, 2017).

A integração entre quantidade e qualidade da água constitui um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e está presente nos instrumentos de planejamento e gestão estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 1997). A relação entre disponibilidade hídrica, monitoramento ambiental, enquadramento dos corpos d'água e governança dos recursos hídricos tem sido amplamente discutida na literatura nacional como componente essencial para a implementação da gestão integrada das águas (Porto; Porto, 2008; Jacobi; Fracalanza, 2005).

3.2. Gestão de recursos hídricos no Ceará

A gestão dos recursos hídricos no Ceará está diretamente associada às características climáticas do semiárido nordestino, marcado pela elevada variabilidade espacial e temporal das precipitações, altas taxas de evapotranspiração e recorrência de secas prolongadas (Campos, 2014; Cirilo, 2008). Ao longo do século XX, as políticas públicas voltadas ao setor hídrico concentraram-se na ampliação da infraestrutura de armazenamento de água, especialmente por meio da construção de açudes, barragens e outras obras hidráulicas destinadas ao abastecimento humano e ao suporte das atividades produtivas (Rebouças, 1997; Garjulli, 2003).

A expansão da infraestrutura hídrica estadual resultou na formação de uma extensa rede de reservatórios artificiais, considerada uma das maiores do país em capacidade de acumulação de água (Campos, 2014). A partir da década de 1990, o gerenciamento dos recursos hídricos passou a incorporar instrumentos voltados ao planejamento integrado, à participação social e à gestão por bacias hidrográficas, em consonância com tendências observadas em diferentes estados brasileiros (Vieira, 2008).

A Política Estadual de Recursos Hídricos do Ceará foi inicialmente instituída pela Lei nº 11.996, de 24 de julho de 1992, antecedendo o marco federal de 1997 (Ceará, 1992). Esse antecedente histórico deve ser distinguido do regime jurídico estadual posteriormente atualizado pela Lei nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010 (Ceará, 2010).

A organização institucional cearense articula órgãos de formulação e gestão, instâncias colegiadas de participação e entidades operacionais. A Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH), a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), os comitês de bacia e as comissões gestoras desempenham atribuições distintas nesse arranjo. A atuação ambiental da Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) relaciona-se à proteção e ao controle ambiental, sem que essas atribuições se confundam com as funções de gerenciamento dos sistemas hídricos (Ceará, 2010, 2018).

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), criada pela Lei Estadual nº 12.217, de 18 de novembro de 1993, passou a desempenhar funções relacionadas à operação dos reservatórios estratégicos, monitoramento hidrológico, apoio aos processos de alocação de água e suporte às instâncias participativas de gestão (Ceará, 1993; Garjulli, 2003). A atuação da companhia está associada à implementação de instrumentos de gestão voltados ao acompanhamento da disponibilidade hídrica, operação dos sistemas de reservação e articulação entre usuários e poder público (COGERH, [s. d.]).

Entre os mecanismos de gestão adotados no estado destacam-se os processos de alocação negociada de água, desenvolvidos para compatibilizar as demandas dos diferentes usuários com a disponibilidade hídrica existente nos sistemas monitorados (Garjulli, 2003; Campos, 2014). Esses processos envolvem a participação de instituições governamentais, usuários e representantes da sociedade civil, sendo amplamente utilizados na definição de estratégias operacionais para reservatórios e sistemas hídricos durante períodos de escassez (COGERH, [s. d.]).

A gestão participativa constitui um dos princípios estruturantes do modelo cearense de recursos hídricos. Os Comitês de Bacias Hidrográficas são instâncias colegiadas responsáveis por promover a articulação entre usuários, sociedade civil e poder público, atuando em temas relacionados ao planejamento, à mediação de conflitos e à gestão das águas em escala de bacia hidrográfica (Vieira, 2008; Abers; Keck, 2017). As Comissões Gestoras complementam esse arranjo institucional por meio da participação direta de usuários vinculados aos sistemas hídricos monitorados (COGERH, [s. d.]).

Além dos instrumentos voltados à gestão quantitativa, o sistema estadual contempla atividades relacionadas ao monitoramento hidrológico, monitoramento da qualidade da água,

operação de reservatórios, fiscalização dos usos e implementação de instrumentos previstos nas legislações federal e estadual (Ceará, 2018).

Em 2026, o Ceará adota a divisão em doze regiões hidrográficas para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Entre elas, a região hidrográfica do Baixo Jaguaribe apresenta usos associados ao abastecimento humano, à irrigação, à carcinicultura e às atividades industriais (Ceará, 2010, 2018; Campos, 2014). A delimitação da área de estudo e a posição dos pontos monitorados são apresentadas no Capítulo 4.

3.3. Objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) e gestão da qualidade da água

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável foi instituída pela Organização das Nações Unidas em 2015, contemplando 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e 169 metas voltadas à integração entre desenvolvimento econômico, inclusão social e proteção ambiental (ONU, 2015). Os ODS abrangem temas relacionados à erradicação da pobreza, segurança alimentar, saúde, educação, igualdade, água, saneamento, energia, cidades, consumo, clima, ecossistemas terrestres e aquáticos (ONU, 2015).

Entre os objetivos relacionados aos recursos hídricos, o ODS 6 trata da disponibilidade e da gestão sustentável da água e do saneamento. Suas metas incluem aspectos relacionados ao acesso à água potável, saneamento, qualidade da água, eficiência no uso dos recursos hídricos, gestão integrada, proteção dos ecossistemas aquáticos e cooperação institucional (ONU, 2015; IPEA, 2018).

A meta 6.3 está relacionada à melhoria da qualidade da água, à redução da poluição, ao tratamento de efluentes e à ampliação da reutilização segura dos recursos hídricos (ONU, 2015; IPEA, 2018). No contexto da gestão ambiental, essa meta está associada ao acompanhamento de parâmetros físicos, químicos e biológicos da água, bem como à produção de informações destinadas ao monitoramento dos corpos hídricos (ANA, 2019; Von Sperling, 2014).

A meta 6.5 aborda a implementação da gestão integrada dos recursos hídricos em diferentes escalas, incluindo bacias hidrográficas, sistemas nacionais e cooperação entre instituições (ONU, 2015; IPEA, 2018). A gestão integrada está relacionada à articulação entre disponibilidade hídrica, qualidade da água, usos múltiplos, participação social, instrumentos de planejamento e informações ambientais produzidas por redes de monitoramento (Porto; Porto, 2008; ANA, 2019).

A meta 6.6 contempla a proteção e restauração de ecossistemas relacionados à água, incluindo rios, aquíferos, lagos, áreas úmidas e demais ambientes aquáticos (ONU, 2015; IPEA,

2018). Estudos sobre recursos hídricos associam a conservação desses ecossistemas ao monitoramento da qualidade da água, ao controle das fontes de poluição, ao uso adequado do solo e à gestão ambiental das bacias hidrográficas (Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011; Esteves, 2011).

No Brasil, a adaptação das metas globais dos ODS ao contexto nacional foi discutida pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, considerando indicadores, políticas públicas e instrumentos de planejamento voltados ao desenvolvimento sustentável (IPEA, 2018). No caso do ODS 6, os indicadores nacionais contemplam dimensões relacionadas ao abastecimento de água, esgotamento sanitário, qualidade dos corpos hídricos, eficiência do uso da água e gestão integrada dos recursos hídricos (IPEA, 2018; ANA, 2019).

Aspectos como a variabilidade climática, a irregularidade das precipitações, a dependência de reservatórios, os usos múltiplos e a vulnerabilidade dos sistemas hídricos dialogam com metas dos ODS relacionadas à segurança hídrica, adaptação às mudanças climáticas, sustentabilidade dos usos da água e proteção dos ecossistemas associados aos corpos hídricos (ONU, 2015; IPEA, 2018).

O monitoramento da qualidade da água produz informações que podem subsidiar políticas públicas, instrumentos de gestão e o acompanhamento de indicadores ambientais relacionados à Agenda 2030 (ANA, 2019; IPEA, 2018). As observações de campo e as informações geoespaciais oferecem perspectivas complementares sobre a condição dos corpos hídricos, desde que respeitadas as limitações metodológicas de cada fonte (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

Dessa forma, a combinação de medições *in situ* e observações orbitais pode contribuir para ampliar a compreensão espacial das condições ambientais, sem substituir as redes convencionais de monitoramento (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

3.4. Qualidade da água e usos múltiplos

A diversidade de usos atribuídos aos recursos hídricos está associada a diferentes exigências quanto à sua qualidade, tornando necessário o estabelecimento de padrões e critérios para avaliação das condições dos corpos d'água (Von Sperling, 2014; Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011).

A qualidade da água pode ser compreendida como o conjunto de características físicas, químicas e biológicas que determinam sua adequação para determinados usos (Braga *et al*., 2005). Essas características são influenciadas por fatores naturais, como clima, geologia,

relevo, cobertura vegetal e dinâmica hidrológica, bem como por fatores antrópicos associados à ocupação do território e às atividades econômicas desenvolvidas na bacia hidrográfica (Esteves, 2011; Von Sperling, 2014).

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água, estabelece diretrizes ambientais para o enquadramento e define condições e padrões associados à qualidade das águas superficiais. Sua aplicação deve considerar a classe do corpo hídrico e os usos previstos (Brasil, 2005).

A relação entre qualidade da água e usos múltiplos constitui elemento central da gestão integrada dos recursos hídricos. Diferentes atividades podem demandar padrões específicos de qualidade, ao mesmo tempo em que exercem influência sobre as condições ambientais dos corpos hídricos (Porto; Porto, 2008).

A expansão das atividades urbanas, industriais e agropecuárias tem sido apontada como um dos principais fatores associados às alterações da qualidade da água em bacias hidrográficas brasileiras (Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011). O lançamento de efluentes domésticos, o aporte de nutrientes oriundos da agricultura, a disposição inadequada de resíduos sólidos e os processos erosivos associados ao uso do solo figuram entre as principais fontes de degradação dos recursos hídricos superficiais (Esteves, 2011; Braga *et al*., 2005).

No semiárido brasileiro, a qualidade da água apresenta estreita relação com as características hidrológicas da região. A elevada evaporação, a concentração de sais dissolvidos, a intermitência dos cursos d'água e a dependência de reservatórios artificiais influenciam diretamente a dinâmica físico-química das águas superficiais (Cirilo, 2008; Suassuna, 2007). Aspectos relacionados à salinidade, turbidez, eutrofização e concentração de matéria orgânica são frequentemente abordados em estudos realizados em sistemas hídricos do Nordeste brasileiro (Esteves, 2011; Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011).

No estado do Ceará, a qualidade da água está associada à interação entre fatores climáticos, hidrológicos e antrópicos. O uso intensivo dos recursos hídricos para abastecimento humano, irrigação, carcinicultura e atividades industriais ocorre em um contexto marcado pela forte dependência dos reservatórios e pela elevada variabilidade hidrológica regional (Campos, 2014; Ceará, 2018).

Na bacia do rio Jaguaribe, a água atende a usos como abastecimento humano, irrigação, dessedentação animal, carcinicultura e atividades industriais (COGERH, 2023a). A construção de reservatórios, entre eles o Açude Castanhão, alterou a dinâmica de regularização das vazões e de atendimento às demandas da região (Campos, 2014; Garjulli, 2003). Estudos sobre uso e

ocupação da terra discutem processos de transformação das margens fluviais e de áreas estuarinas, inclusive a expansão de atividades aquícolas, cujos efeitos dependem das condições locais (Assis *et al*., 2024; Silva Neto *et al*., 2025).

3.5. Monitoramento da qualidade da água

O monitoramento da qualidade da água consiste na obtenção sistemática, padronizada e contínua de informações sobre as características físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos, permitindo acompanhar suas condições ambientais ao longo do tempo e do espaço. Essa atividade constitui uma das principais bases técnicas para a gestão dos recursos hídricos, pois permite identificar alterações na qualidade da água, avaliar tendências de degradação, verificar a compatibilidade com os usos preponderantes e subsidiar decisões relacionadas ao planejamento, fiscalização, enquadramento e controle da poluição (Von Sperling, 2014; Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011).

No Brasil, o monitoramento da qualidade da água está associado aos instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos e às diretrizes estabelecidas pela legislação ambiental. Informações produzidas por programas de monitoramento subsidiam atividades relacionadas ao enquadramento dos corpos d'água, concessão de outorgas, controle da poluição, fiscalização ambiental e avaliação das condições dos ecossistemas aquáticos (Brasil, 1997; Brasil, 2005).

As redes de monitoramento são constituídas por estações distribuídas em bacias hidrográficas, reservatórios, rios e demais corpos hídricos, nas quais são realizadas coletas periódicas destinadas à determinação de parâmetros físicos, químicos e biológicos (ANA, 2024).

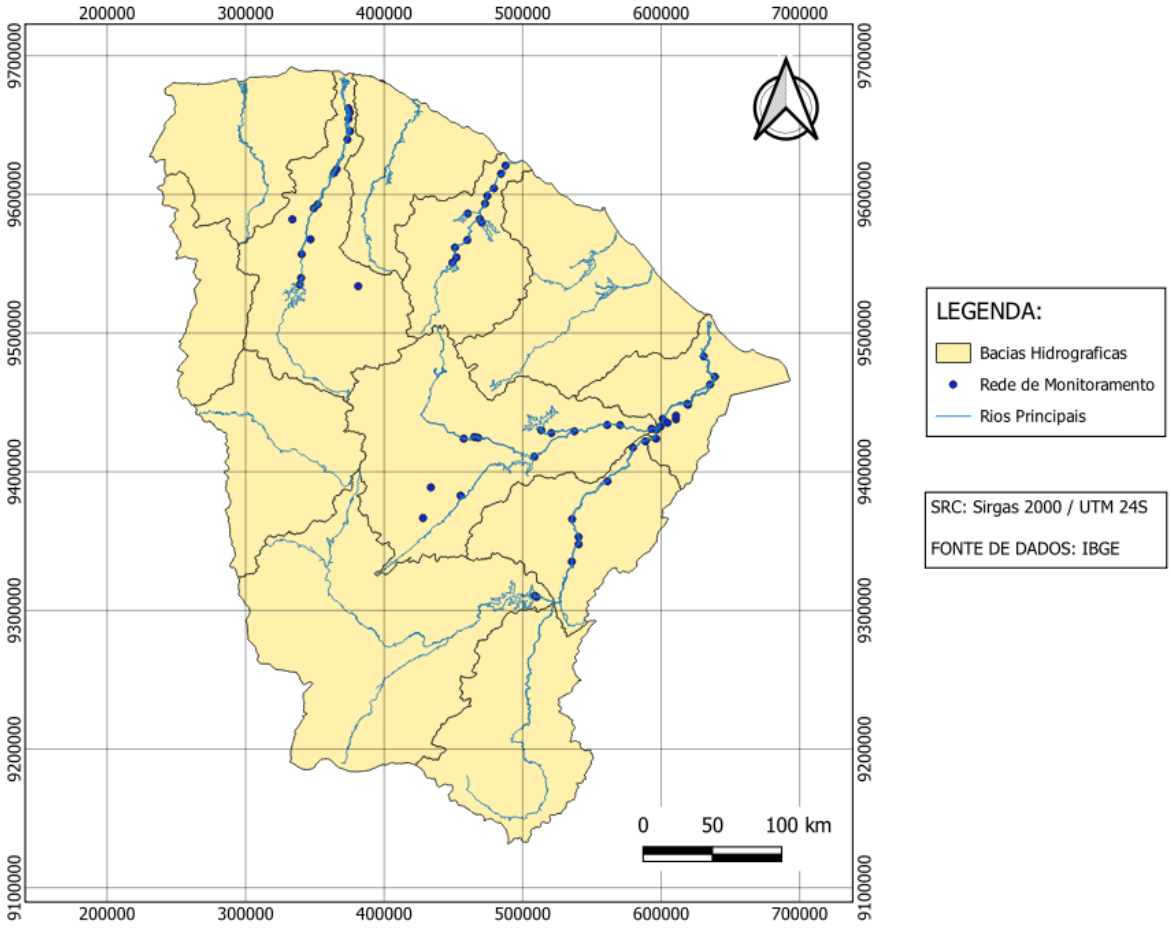
Entre os parâmetros frequentemente avaliados nas redes de qualidade da água estão temperatura, potencial hidrogeniônico, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, cor, sólidos totais, nutrientes, matéria orgânica, clorofila-a e indicadores microbiológicos. A escolha desses parâmetros depende dos objetivos do monitoramento, das características do corpo hídrico e das pressões existentes na bacia hidrográfica. Em rios submetidos a múltiplos usos, esses dados permitem avaliar alterações associadas ao lançamento de efluentes, ao carreamento de sedimentos, à atividade agropecuária e a outras formas de uso e ocupação do solo (Esteves, 2011; Von Sperling, 2014).

No âmbito da qualidade da água, a estruturação de redes de monitoramento envolve a definição de pontos de amostragem, parâmetros analisados, frequência de coleta, métodos

laboratoriais e formas de armazenamento e divulgação dos dados. Segundo a ANA (2024), essas redes são fundamentais para a produção de informações sistemáticas sobre a condição dos corpos hídricos, permitindo acompanhar alterações espaciais e temporais, subsidiar diagnósticos ambientais, apoiar o enquadramento dos corpos d'água e orientar ações de planejamento, fiscalização e gestão.

A Figura 1 apresenta a rede de monitoramento da qualidade da água em rios no Ceará, contextualizando a abrangência espacial do acompanhamento realizado no estado.

Figura 1 – Rede de monitoramento de qualidade da água em rios no estado do Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No estado do Ceará, a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água contempla 187 pontos de monitoramento, dos quais 49 estão localizados em rios e 138 em reservatórios (ANA, 2024). Essa distribuição evidencia a importância dos açudes na gestão hídrica estadual, reflexo da dependência de reservatórios para o armazenamento e a regularização da oferta hídrica no semiárido. Ao mesmo tempo, os pontos em rios são fundamentais para acompanhar ambientes lóticos perenizados submetidos a múltiplos usos.

Na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, a rede de monitoramento de qualidade da água operada pela COGERH contempla 11 pontos, distribuídos entre o rio Jaguaribe, o Açude Santo Antônio de Russas e o Canal do Trabalhador. Desse total, nove pontos estão localizados diretamente no rio Jaguaribe: JAG-05, JAG-06, JAG-12, JAG-13, JAG-14, JAG-15, JAG-16, JAG-20 e JAG-21 (COGERH, 2021). Essa configuração reforça a importância do rio Jaguaribe como eixo de acompanhamento da qualidade da água no baixo curso, especialmente por se tratar de um rio perenizado, regulado por reservatórios estratégicos e submetido a usos como abastecimento, irrigação, carcinicultura e lançamento de efluentes.

Apesar de sua importância, o monitoramento convencional apresenta limitações relacionadas à frequência de amostragem, à distribuição espacial dos pontos de coleta, aos custos operacionais, à dependência de equipes de campo e à dificuldade de representar a variabilidade espacial e temporal dos sistemas aquáticos. Essas limitações são particularmente relevantes em rios, onde alterações de vazão, precipitação e lançamentos locais podem modificar rapidamente as condições da água entre uma campanha de coleta e outra (Novo, 2010; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

As limitações de cobertura espacial e de frequência das campanhas convencionais ajudam a explicar o interesse em fontes complementares de informação. Nesse contexto, geotecnologias podem associar registros pontuais das redes de monitoramento à representação espacial dos corpos hídricos, sem substituir as medições realizadas em campo. A seção seguinte apresenta essas ferramentas e suas aplicações em recursos hídricos (Novo, 2010; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020; ANA, 2024).

3.6. Geotecnologias aplicadas aos recursos hídricos

As geotecnologias compreendem um conjunto de técnicas, métodos e ferramentas destinadas à aquisição, armazenamento, processamento, análise e representação de informações georreferenciadas, incluindo Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto, cartografia digital, geoprocessamento e sistemas de posicionamento por satélite (Câmara; Davis; Monteiro, 2001; Fitz, 2008).

Os Sistemas de Informações Geográficas correspondem a ambientes computacionais voltados à integração, manipulação e análise de dados espaciais, possibilitando o tratamento conjunto de informações ambientais, hidrológicas, climáticas, territoriais e socioeconômicas (Câmara; Davis; Monteiro, 2001; Fitz, 2008). No campo dos recursos hídricos, aplicações de geotecnologias são registradas em estudos sobre delimitação de bacias hidrográficas,

caracterização morfométrica, monitoramento de reservatórios, avaliação de áreas inundáveis, análise de processos erosivos, acompanhamento do uso do solo e avaliação das condições ambientais dos corpos hídricos (Novo, 2010; Florenzano, 2011).

A ampliação da disponibilidade de imagens orbitais gratuitas contribuiu para o uso das geotecnologias em estudos hidrológicos e ambientais no Brasil. Entre os programas e instrumentos utilizados estão Landsat, Sentinel, os satélites sino-brasileiros de recursos terrestres (CBERS, do inglês China-Brazil Earth Resources Satellite) e o espectrorradiômetro MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Essas fontes fornecem imagens e séries temporais empregadas em pesquisas sobre recursos hídricos, vegetação, uso e ocupação da terra e dinâmica ambiental (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

As plataformas de processamento em nuvem integram os recursos contemporâneos utilizados em análises geoespaciais. O Google Earth Engine (GEE) reúne coleções de imagens orbitais, bases geográficas e ferramentas de processamento destinadas à análise de grandes volumes de dados espaciais e séries temporais ambientais (Gorelick *et al*., 2017).

No monitoramento da qualidade da água, essas ferramentas permitem integrar a localização das estações de coleta, os registros obtidos em campo e as imagens orbitais. A seção seguinte apresenta o fundamento do sensoriamento remoto e as condições para interpretar a resposta espectral dos ambientes aquáticos (Novo, 2010; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

3.7. Sensoriamento remoto aplicado à qualidade da água

O sensoriamento remoto corresponde à obtenção de informações sobre objetos, áreas ou fenômenos sem contato físico direto, a partir do registro da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos observados (Lorenzzetti, 2015; Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012). Em ambientes aquáticos, essa abordagem está relacionada à interação entre a radiação solar e os constituintes presentes na coluna d’água, permitindo a análise de propriedades ópticas associadas à composição física, química e biológica dos corpos hídricos (Barbosa; Novo; Martins, 2019).

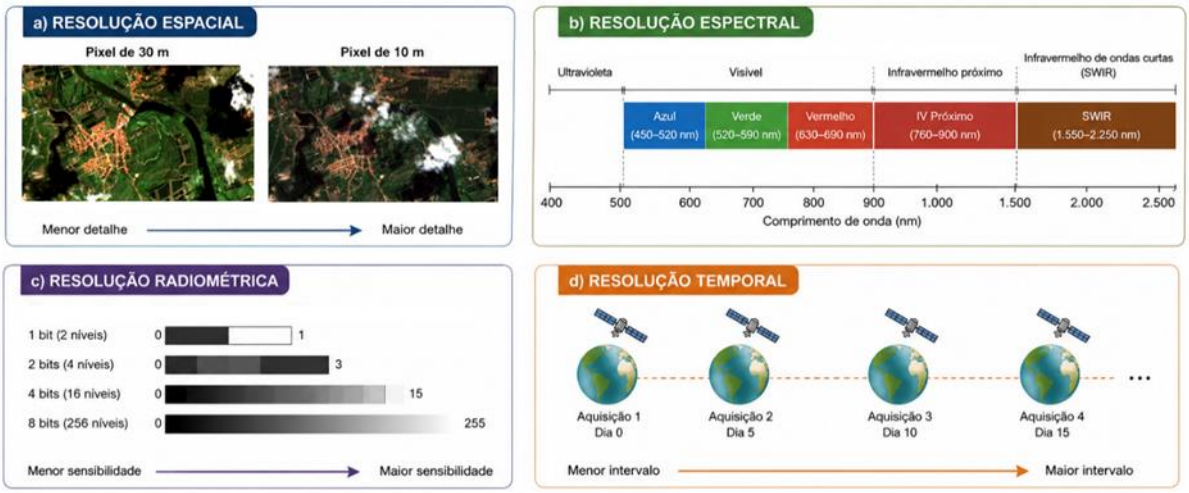
Em estudos de qualidade da água, sensores ópticos passivos são utilizados para registrar a energia solar refletida pelos corpos hídricos, cuja resposta espectral varia conforme a presença de partículas em suspensão, matéria orgânica dissolvida, fitoplâncton, sedimentos e outros constituintes opticamente ativos (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

A qualidade das informações obtidas por sensoriamento remoto depende das resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal dos sensores. A resolução espacial corresponde à

dimensão da área representada por cada pixel da imagem; a resolução espectral está relacionada ao número e à largura das bandas registradas no espectro eletromagnético; a resolução radiométrica corresponde à capacidade do sensor de discriminar diferentes níveis de energia; e a resolução temporal refere-se à frequência de revisita do sensor sobre uma mesma área (Barbosa; Novo; Martins, 2019).

A Figura 2 ilustra as diferentes resoluções dos sensores ópticos, características que condicionam a aplicação das imagens de satélite ao monitoramento de corpos hídricos.

Figura 2 – Representação esquemática das resoluções de sensores ópticos aplicadas ao sensoriamento remoto.



Legenda: a) representa o tamanho do pixel no terreno; b) refere-se ao número e à largura das bandas no espectro eletromagnético; c) corresponde à capacidade do sensor em discriminar variações de energia; d) refere-se ao intervalo de tempo entre duas aquisições do sensor sobre a mesma área.

Fonte: Adaptado de Barbosa, Novo e Martins (2019) e Radiant Earth Foundation (2017), com apoio de IA generativa na edição visual.

A reflectância de sensoriamento remoto, representada por (R_rs), corresponde à razão entre a radiância emergente da coluna d'água e a irradiância incidente sobre a superfície, sendo utilizada na caracterização da energia que deixa o corpo hídrico em direção ao sensor (Barbosa; Novo; Martins, 2019). Essa relação pode ser expressa pela Equação 1:

$$R_{rs}(\theta, \phi, \lambda) = \frac{L_w(\theta,\phi,\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (1)$$

Em que R_{rs} representa a reflectância de sensoriamento remoto; (L_w) corresponde à radiância emergente da coluna d'água; (E_s) representa a irradiância incidente; (θ) e (ϕ) indicam

os ângulos de observação; e (λ) corresponde ao comprimento de onda (Barbosa; Novo; Martins, 2019).

A reflectância, representada por (R), também pode ser expressa como a razão entre a irradiância espectral ascendente e a irradiância espectral descendente em determinada profundidade da coluna d'água, conforme a Equação 2:

$$R_{rs}(z,\lambda) = \frac{E_u(z,\lambda)}{E_d(z,\lambda)} \quad (2)$$

Em que (R) corresponde à reflectância ; (E_u) representa a irradiância espectral ascendente; (E_d) representa a irradiância espectral descendente; (z) indica a profundidade considerada; e (λ) corresponde ao comprimento de onda (Barbosa; Novo; Martins, 2019).

A resposta espectral da água apresenta comportamento distinto em relação a alvos terrestres, em razão da elevada absorção da radiação eletromagnética pela água em determinadas faixas do espectro. A presença de constituintes opticamente ativos modifica esse comportamento, alterando os processos de absorção e espalhamento da radiação e influenciando os valores de reflectância registrados pelos sensores (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; LOPES, 2013).

As partículas em suspensão, os sólidos suspensos, a matéria orgânica dissolvida colorida, os pigmentos fitoplanctônicos e os sedimentos interferem na resposta espectral dos ambientes aquáticos, especialmente nas faixas do visível e do infravermelho próximo (Barbosa; Novo; Martins, 2019). Parâmetros como turbidez, sólidos suspensos, transparência da água, matéria orgânica dissolvida e estado trófico têm sido relacionados a informações espectrais obtidas por sensores orbitais e de campo em diferentes ambientes aquáticos (Lopes, 2013).

A correção atmosférica busca reduzir a influência da atmosfera sobre a radiação registrada pelo sensor; a correção da reflexão especular trata interferências da luz refletida na superfície da água; e a correção do efeito de adjacência busca reduzir a contribuição de alvos próximos, como as margens, sobre o sinal atribuído ao corpo hídrico. Esses procedimentos são relevantes para comparar a informação orbital com as medições de campo, sobretudo em águas continentais com variabilidade óptica e influência de superfícies adjacentes (Barbosa; Novo; Martins, 2019; Lopes, 2013).

Entre os sistemas orbitais utilizados em estudos de qualidade da água, destacam-se sensores com diferentes resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais. Satélites como MODIS, MERIS e Sentinel-3 apresentam ampla cobertura espacial e elevada frequência

temporal, sendo aplicados principalmente em grandes corpos hídricos, ambientes costeiros e sistemas aquáticos de maior extensão. Sensores como Landsat-8/OLI, Landsat-9/OLI-2 e Sentinel-2/MSI apresentam maior resolução espacial, com aplicações em reservatórios, rios, lagos e corpos hídricos continentais de menor porte (Barbosa; Novo; Martins, 2019; Lopes, 2013).

A literatura internacional recente demonstra avanços importantes na aplicação do sensoriamento remoto orbital ao monitoramento da qualidade da água em rios, reservatórios e demais águas interiores. Virdis *et al*. (2022), em estudo desenvolvido no rio Chao Phraya, na Tailândia, utilizaram imagens Sentinel-2/MSI e observações de campo para avaliar parâmetros de qualidade da água em ambiente fluvial tropical, destacando o potencial do sensor para representar variações espaciais e temporais em rios. Salas *et al*. (2022), no Little Miami River, nos Estados Unidos, aplicaram imagens Sentinel-2 e algoritmos de aprendizado de máquina para mapear oxigênio dissolvido, evidenciando a possibilidade de ampliar a leitura espacial de parâmetros de qualidade da água em sistemas lóticos.

Em reservatórios, Meng, Zhang e Zheng (2022) utilizaram imagens Landsat 8/9 OLI e Sentinel-2/MSI para estimar clorofila-a, densidade de algas e turbidez no reservatório Shanmei, na China, por meio de regressão multivariada. Mamun, Hasan e An (2024) também aplicaram imagens Sentinel-2/MSI e Landsat-8/OLI, integradas ao Google Earth Engine e a algoritmos de aprendizado de máquina, para estimar clorofila-a, profundidade de Secchi e sólidos suspensos totais em reservatórios. Esses estudos indicam que ambientes lênticos tendem a favorecer o uso de modelos orbitais pela maior estabilidade espacial da lâmina d’água e pela melhor compatibilidade entre dados de campo e imagens orbitais.

No caso dos sólidos suspensos totais, Jiang *et al*. (2023) desenvolveram abordagem semi-analítica para estimativa desse parâmetro em águas interiores e costeiras a partir de imagens Sentinel-2/MSI, demonstrando a utilidade do sensor para representar corpos hídricos de menor dimensão espacial. Diehl *et al*. (2024), ao avaliarem pequenos rios tributários da bacia do Lago Champlain, nos Estados Unidos, observaram que a estimativa de sólidos suspensos por Sentinel-2 depende de fatores como largura do canal, carga de sedimentos, sazonalidade, vazão e influência das margens, aspectos particularmente relevantes em ambientes lóticos estreitos.

Em escala regional, Zhao *et al*. (2024) integraram imagens Sentinel-2 a dados de 311 estações automáticas de monitoramento na província de Zhejiang, na China, construindo grande volume de pareamentos entre reflectância orbital e parâmetros de qualidade da água, incluindo turbidez, nitrogênio total, fósforo total, nitrogênio amoniacal e índice de permanganato. O

estudo demonstra que bases institucionais densas e bem estruturadas podem fortalecer a modelagem remota da qualidade da água em rios e reservatórios, especialmente quando associadas a algoritmos de aprendizado de máquina.

No contexto do semiárido brasileiro, o sensoriamento remoto tem sido aplicado ao monitoramento de corpos hídricos sujeitos à elevada variabilidade climática, redução de volumes armazenados, concentração de constituintes na coluna d'água e intensificação dos usos múltiplos. Em estudo desenvolvido no semiárido brasileiro, dados de sensoriamento remoto foram utilizados como suporte ao monitoramento da qualidade das águas superficiais, com análise de variáveis limnológicas e respostas espectrais em sistemas aquáticos da região (Lopes, 2013).

No âmbito da Universidade Federal do Ceará, no reservatório Castanhão, imagens Sentinel-2, dados de campo da COGERH, algoritmos espectrais e o índice de Lamparelli foram empregados na identificação de classes de estado trófico e na análise da eutrofização em ambiente lêntico do semiárido (Maia *et al*., 2025).

A integração entre dados de campo e informações espectrais derivadas de sensores remotos envolve seleção de imagens, correção dos dados orbitais, extração de reflectância, compatibilização temporal com as coletas, organização das bases de dados e aplicação de métodos estatísticos. Em estudos de qualidade da água, esse procedimento é utilizado para avaliar relações entre parâmetros limnológicos e bandas espectrais, índices ou produtos derivados das imagens (Barbosa; Novo; Martins, 2019; Lopes, 2013).

3.8. Sentinel-2 e o Sensor MSI

A missão Sentinel-2 integra o Programa Copernicus, iniciativa europeia de observação da Terra voltada à aquisição sistemática de imagens multiespectrais da superfície terrestre (Drusch *et al*., 2012; ESA, 2017). A missão foi estruturada para o fornecimento de dados destinados a estudos sobre cobertura da terra, agricultura, vegetação, áreas costeiras, águas interiores e monitoramento ambiental (Drusch *et al*., 2012).

Os satélites Sentinel-2 transportam o sensor MSI responsável pela aquisição de imagens em treze bandas espectrais distribuídas nas regiões do visível, borda do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (Drusch *et al*., 2012; ESA, 2017). As bandas do sensor apresentam resoluções espaciais de 10 m, 20 m e 60 m, conforme a faixa espectral registrada (ESA, 2017).

As bandas de 10 m compreendem a banda 2, na região do azul; a banda 3, na região do verde; a banda 4, na região do vermelho; e a banda 8, na região do infravermelho próximo (ESA, 2017). Essas faixas espectrais são utilizadas em estudos ambientais por registrarem respostas associadas a alvos como vegetação, solos expostos, áreas urbanas e corpos hídricos (Novo, 2010; Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

As bandas de 20 m incluem faixas espectrais localizadas na borda do vermelho, no infravermelho próximo estreito e no infravermelho de ondas curtas, enquanto as bandas de 60 m são voltadas principalmente a aplicações atmosféricas, como avaliação de aerossóis, vapor d'água e nuvens cirrus (Drusch *et al*., 2012; ESA, 2017). A configuração espectral do sensor MSI é descrita na literatura como adequada a aplicações relacionadas à vegetação, solos, águas interiores, áreas costeiras e monitoramento ambiental (Drusch *et al*., 2012).

As imagens Sentinel-2 apresentam periodicidade de aquisição associada à revisita orbital da missão, característica utilizada em análises temporais de fenômenos ambientais e no acompanhamento de alterações na superfície terrestre (Drusch *et al*., 2012; ESA, 2017). Em estudos hidrológicos e ambientais, séries temporais de imagens orbitais são empregadas na análise de variações espaciais e temporais de corpos hídricos, áreas inundáveis, cobertura da terra e condições ambientais das bacias hidrográficas (Novo, 2010; Florenzano, 2011).

As bandas B2, B3, B4 e B8 foram destacadas neste estudo por sua aplicação em investigações do comportamento óptico de corpos hídricos, incluindo análises relacionadas à turbidez e aos materiais presentes na água (Novo, 2010). A fundamentação das relações entre bandas e os parâmetros efetivamente avaliados é detalhada na seção seguinte.

Os produtos Sentinel-2 disponibilizados para análise ambiental incluem imagens com diferentes níveis de processamento, entre eles produtos corrigidos geometricamente e produtos com correção atmosférica destinados à obtenção de reflectância de superfície (ESA, 2017). Em estudos de qualidade da água por sensoriamento remoto, a reflectância de superfície é utilizada em procedimentos de comparação com dados obtidos em campo, especialmente em análises que relacionam bandas espectrais e variáveis limnológicas (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

3.9. Resposta espectral da água e dos parâmetros avaliados

A aplicação do sensoriamento remoto ao monitoramento da qualidade da água fundamenta-se na capacidade dos sensores orbitais registrarem alterações na energia refletida pela superfície dos corpos hídricos. Essas alterações decorrem da presença e concentração de diferentes constituintes presentes na água, que influenciam os processos de absorção e

espalhamento da radiação eletromagnética. Dessa forma, determinados parâmetros de qualidade da água podem apresentar relações com a resposta espectral observada pelos sensores, possibilitando sua avaliação de forma indireta por meio de dados orbitais (Novo, 2010).

As alterações na composição da água modificam seu comportamento espectral, especialmente quando associadas à presença de partículas em suspensão, matéria orgânica dissolvida, sedimentos e substâncias opticamente ativas (Novo, 2010; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020). A variação desses constituintes influencia os padrões de reflectância registrados em faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo, utilizadas em estudos de qualidade da água por sensoriamento remoto (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

A interpretação da reflectância aquática requer considerar que os constituintes presentes na coluna d'água influenciam de maneira distinta as faixas do espectro visível e do infravermelho próximo. Por esse motivo, a escolha de combinações espectrais deve levar em conta tanto a sensibilidade óptica aos materiais dissolvidos e particulados quanto os limites impostos pelas características do corpo hídrico. A correspondência das bandas B2, B3, B4 e B8 às respectivas regiões do espectro e suas resoluções espaciais foi apresentada na seção 3.8 (Novo, 2010; Florenzano, 2011; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

A cor da água está associada à presença de substâncias dissolvidas e particuladas capazes de alterar a absorção e o espalhamento da radiação na coluna d'água (Esteves, 2011; Von Sperling, 2014). A cor verdadeira corresponde à coloração da água após a remoção da turbidez, estando relacionada principalmente à presença de substâncias dissolvidas, matéria orgânica, compostos húmicos e íons metálicos (Von Sperling, 2014; Esteves, 2011).

A matéria orgânica dissolvida colorida apresenta influência sobre a absorção da radiação, sobretudo em comprimentos de onda mais curtos do espectro visível, com efeitos registrados nas faixas do azul e do verde (Novo, 2010; Esteves, 2011).

A turbidez representa uma propriedade óptica da água relacionada à presença de partículas em suspensão, como argila, silte, matéria orgânica particulada, microrganismos e outros materiais dispersos na coluna d'água (Von Sperling, 2014; Esteves, 2011). O aumento da turbidez está associado à redução da transparência da água e à intensificação dos processos de espalhamento da radiação eletromagnética, especialmente em faixas do visível e do infravermelho próximo (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

Estudos de qualidade da água por sensoriamento remoto frequentemente relacionam a turbidez às respostas espectrais registradas nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, em razão da influência das partículas em suspensão sobre o espalhamento da radiação

(Novo, 2010). Em ambientes com maior concentração de material particulado, as variações de reflectância tendem a ser mais evidentes nas faixas espectrais associadas ao vermelho e ao infravermelho próximo (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

Os sólidos totais correspondem ao conjunto de materiais dissolvidos e suspensos presentes na água, abrangendo frações minerais e orgânicas que permanecem após processos de evaporação e secagem da amostra (Von Sperling, 2014). A fração dissolvida dos sólidos totais está associada a processos químicos e físico-químicos da água, enquanto a fração particulada apresenta maior relação com alterações ópticas registradas por sensores remotos (Esteves, 2011; Von Sperling, 2014).

A análise conjunta de cor verdadeira, turbidez e sólidos totais permite abordar diferentes dimensões da qualidade da água, envolvendo substâncias dissolvidas, partículas em suspensão e materiais orgânicos e inorgânicos presentes nos corpos hídricos (Esteves, 2011; Von Sperling, 2014). Em estudos baseados em imagens orbitais, a relação entre essas variáveis e as bandas espectrais depende das propriedades ópticas da água, das características dos sensores utilizados, das condições atmosféricas e da correspondência temporal entre coletas de campo e aquisição das imagens (Novo, 2010; Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2020).

No contexto de corpos hídricos do semiárido, variações sazonais de precipitação, escoamento superficial, aporte de sedimentos, evaporação e concentração de constituintes na água são abordadas em estudos sobre dinâmica hidrológica e qualidade da água (Cirilo, 2008; Esteves, 2011). Esses fatores interferem nas características físicas e químicas dos sistemas aquáticos e compõem o conjunto de variáveis consideradas em análises ambientais de reservatórios, rios e demais corpos hídricos superficiais (Cirilo, 2008; Von Sperling, 2014).

3.10. Mistura espectral e efeito de adjacência em corpos hídricos estreitos

A aplicação do sensoriamento remoto em corpos hídricos estreitos apresenta limitações associadas à resolução espacial dos sensores orbitais e à composição radiométrica dos pixels analisados. No caso do Sentinel-2/MSI, as bandas do visível e do infravermelho próximo apresentam resolução espacial de 10 m, enquanto bandas do infravermelho de ondas curtas possuem resolução de 20 m, condição que pode limitar a representação exclusiva da coluna d’água em rios com largura reduzida, margens irregulares ou variação sazonal da lâmina d’água (DRUSCH *et al*., 2012; ESA, 2024; PAULINO *et al*., 2022).

A mistura espectral de pixels ocorre quando diferentes alvos contribuem simultaneamente para a resposta registrada pelo sensor. Em ambientes fluviais estreitos, um

mesmo pixel pode conter, além da água, componentes como vegetação de margem, solo exposto, bancos arenosos, áreas úmidas adjacentes e materiais presentes na calha do rio. Como a água apresenta baixa reflectância, especialmente nas faixas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas, pequenas contribuições de alvos terrestres podem modificar a resposta espectral observada sobre o corpo hídrico (PAULINO *et al*., 2022; WU *et al*., 2024).

A vegetação marginal tende a apresentar elevada reflectância no infravermelho próximo, enquanto solos expostos, bancos arenosos e áreas agrícolas podem interferir nas respostas registradas nas faixas do visível e do infravermelho de ondas curtas. Dessa forma, em rios estreitos, a reflectância extraída sobre a lâmina d'água pode incorporar sinais que não pertencem exclusivamente à água, reduzindo a associação direta entre os dados orbitais e parâmetros de qualidade da água medidos em campo, como cor verdadeira, turbidez e sólidos totais (PAN; BÉLANGER; HUOT, 2022; DIEHL *et al*., 2024).

Além da mistura espectral interna ao pixel, o efeito de adjacência também interfere na resposta registrada por sensores ópticos. Esse efeito está relacionado à contribuição radiométrica de alvos próximos ao pixel de interesse, especialmente quando superfícies vizinhas, como vegetação, solo exposto, áreas urbanizadas ou margens descobertas, refletem radiação que é espalhada na atmosfera e registrada pelo sensor sobre o alvo aquático. Em corpos hídricos pequenos ou estreitos, essa influência tende a ser mais relevante devido à proximidade entre a lâmina d'água e os alvos terrestres adjacentes (PAULINO *et al*., 2022; PAN; BÉLANGER; HUOT, 2022).

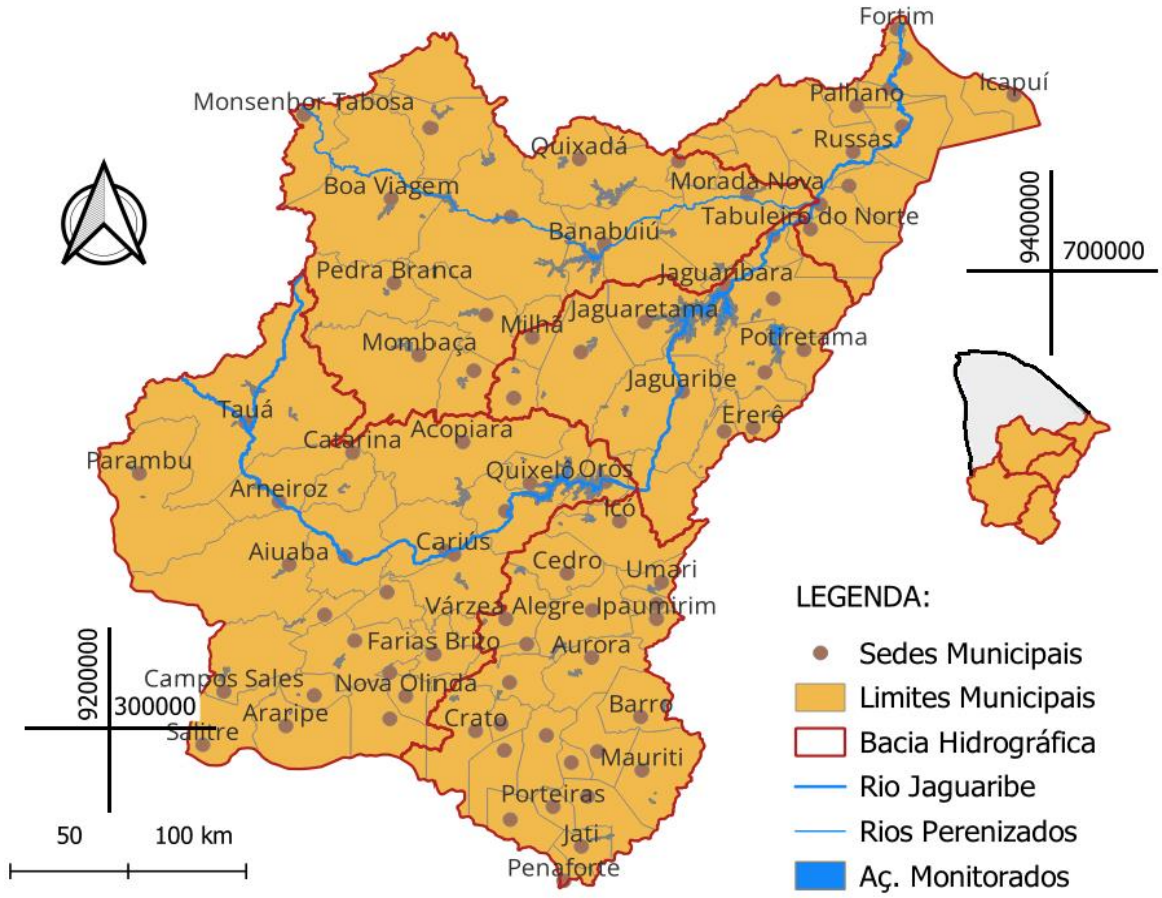
Estudos recentes têm destacado a importância da correção do efeito de adjacência em águas interiores, sobretudo em áreas de alto contraste espectral entre água e superfícies terrestres. Paulino *et al*. (2022), ao avaliarem imagens Sentinel-2/MSI em águas interiores brasileiras, destacaram que alvos terrestres próximos aos pixels de água podem introduzir incertezas significativas na recuperação da reflectância aquática. De modo semelhante, Wu *et al*. (2024) demonstraram que a influência de alvos adjacentes pode comprometer a acurácia da reflectância derivada de satélite em ambientes aquáticos continentais e costeiros.

A influência da largura do canal e da proximidade das margens foi discutida por Diehl *et al*. (2024), ao avaliarem a estimativa de sólidos suspensos totais em pequenos rios com imagens Sentinel-2. Os autores observaram que a aplicação de algoritmos de sensoriamento remoto em rios estreitos depende de fatores como largura do canal, regime de sedimentos, sazonalidade, vazão e características das margens. Jiang *et al*. (2023) também ressaltaram que a estimativa de sólidos suspensos totais por Sentinel-2 em águas interiores e costeiras depende das condições ópticas locais e da variabilidade entre diferentes corpos hídricos.

Ansari, Wu e Knudby (2026), ao avaliarem o impacto da correção de adjacência na estimativa de turbidez no rio São Lourenço, no Canadá, verificaram que esse pré-processamento pode melhorar o desempenho dos modelos, especialmente em áreas próximas às margens. Em rios do semiárido, a variação sazonal da vazão, a exposição de bancos de areia, a presença de vegetação ripária, solos de calha e usos antrópicos adjacentes podem intensificar a mistura espectral e o efeito de adjacência, dificultando o isolamento da resposta espectral da água em pixels Sentinel-2 (DIEHL *et al*., 2024; ANSARI; WU; KNUDBY, 2026).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Figura 3 - Bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Estado do Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 3 situa a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe no estado do Ceará e fornece a contextualização espacial da região em que se insere o Baixo Jaguaribe. A localização dos pontos amostrais utilizados nesta pesquisa é detalhada na seção 5.1.

4.1. Contexto histórico e ocupação do Baixo Jaguaribe

O rio Jaguaribe constitui um dos principais sistemas hidrográficos do Ceará e exerce papel relevante na formação territorial e econômica de seu vale. A ocupação regional esteve associada à disponibilidade de água em uma área de precipitação irregular, favorecendo núcleos urbanos, criação de animais e atividades agropecuárias ao longo do sistema fluvial (Campos, 2014; COGERH, 2023a).

A interiorização da ocupação cearense esteve relacionada à expansão da pecuária e à utilização dos vales fluviais como eixos de organização econômica e territorial. No vale do Jaguaribe, a presença de áreas planas, solos agricultáveis e disponibilidade hídrica sazonal contribuiu para a formação de fazendas, povoados e centros regionais vinculados às atividades agropecuárias, em um contexto de adaptação às limitações climáticas do semiárido (COGERH, 2023a).

As políticas públicas de enfrentamento das secas no Nordeste brasileiro foram historicamente orientadas pela ampliação da infraestrutura hídrica, com destaque para a construção de açudes, barragens e sistemas de armazenamento de água. No Ceará, essas ações integraram estratégias de aumento da oferta hídrica e de redução da vulnerabilidade das populações aos efeitos das estiagens, especialmente ao longo do século XX (Campos, 2014; Cirilo, 2008).

A construção de reservatórios estratégicos alterou a dinâmica de uso da água no semiárido cearense. No caso do rio Jaguaribe, a implantação do Açude Castanhão modificou o regime hidrológico a jusante da barragem, com efeitos sobre a regularização de vazões, a redução de interrupções no fluxo superficial e a alteração de processos morfológicos e sedimentares no canal fluvial (COGERH, 2023a).

A regularização das vazões no vale do Jaguaribe esteve associada à expansão de atividades econômicas dependentes da disponibilidade hídrica, especialmente agricultura irrigada, fruticultura, carcinicultura e abastecimento urbano. No Baixo e Médio Jaguaribe, a agricultura irrigada passou a demandar informações técnicas para subsidiar outorga, planejamento e critérios de uso da água em áreas de produção intensiva (Gondim *et al*., 2004).

A carcinicultura passou a integrar a organização econômica e territorial do Baixo Jaguaribe a partir da expansão da criação de camarão em cativeiro, com ocupação de áreas próximas aos corpos hídricos e transformação de espaços vinculados à planície fluvial. A atividade apresenta relação direta com o uso intensivo da água e com a geração de efluentes contendo matéria orgânica, nutrientes e sólidos suspensos, conforme características dos

sistemas produtivos e das práticas de manejo adotadas (Araújo, 2009; FIGUEIRÊDO *et al*., 2006).

Em áreas dos terraços semiáridos do Baixo Jaguaribe, a substituição de coberturas naturais por usos antrópicos intensivos foi associada à intensificação de processos erosivos e à alteração da paisagem regional (Assis *et al*., 2024).

A expansão da infraestrutura hídrica e a diversificação das atividades produtivas ajudam a explicar a ocupação atual do Baixo Jaguaribe. Esse contexto orienta a caracterização dos usos múltiplos e das pressões ambientais discutidas a seguir.

4.2. Dinâmica da gestão hídrica e conflitos pelo uso da água

A gestão dos recursos hídricos no Ceará foi estruturada em torno de instrumentos institucionais voltados ao planejamento, operação de sistemas hídricos, participação dos usuários e negociação dos usos da água. A experiência cearense incorporou mecanismos de gestão participativa, com destaque para comitês de bacia, comissões gestoras e processos de alocação negociada em cenários de disponibilidade hídrica variável (Ceará, 2010; Pinheiro; Campos; Studart, 2011; COGERH, [s. d.]).

Em períodos de seca, a diminuição dos volumes armazenados intensifica a competição entre usuários e a necessidade de negociar prioridades e regras de uso da água. Segundo o diagnóstico regional citado no trabalho, entre 2012 e 2014 houve conflitos no Baixo Jaguaribe envolvendo áreas irrigadas, pequenos produtores, comunidades e demandas urbanas (COGERH, 2023a).

A alocação negociada de água no Ceará está vinculada à definição participativa de regras de uso em períodos de escassez, considerando volumes armazenados, demandas setoriais e participação de usuários e instituições gestoras. Esse instrumento foi desenvolvido como procedimento de apoio à tomada de decisão em contextos marcados por variabilidade climática, competição entre usos e necessidade de regulação do acesso à água (Ceará, 2010; Pinheiro; Campos; Studart, 2011; COGERH, [s. d.]).

As disputas regionais não se restringem à distribuição quantitativa da água: a manutenção de condições adequadas de qualidade também é relevante para a compatibilização dos usos. As pressões associadas às atividades produtivas, ao saneamento e às mudanças de uso do solo são descritas nas próximas seções (Araújo, 2009; Figueirêdo *et al*., 2006).

A coexistência de usos agrícolas, aquícolas, urbanos e industriais reforça a necessidade de integrar informações de quantidade e qualidade da água ao planejamento regional (COGERH, 2023a).

4.3. Expansão econômica e pressões ambientais

4.3.1. Agricultura irrigada

A agricultura irrigada integra a base produtiva do Baixo Jaguaribe, especialmente em áreas favorecidas pela regularização hídrica, pela presença de perímetros irrigados e pela disponibilidade de solos utilizados para produção agrícola intensiva. No Baixo e Médio Jaguaribe, os sistemas irrigados abrangem diferentes métodos de aplicação de água (Gondim *et al*., 2004).

A fruticultura irrigada integra as cadeias produtivas regionais e mobiliza práticas de irrigação, manejo fitossanitário, conservação do solo e organização da produção (Pinheiro; Amaral, 2010).

A expansão da agricultura irrigada ampliou a demanda por água em uma região caracterizada por usos múltiplos e competição entre setores usuários. A necessidade de critérios técnicos para outorga, planejamento e otimização do uso hídrico está associada à dependência regional da regularização das vazões do rio Jaguaribe e dos reservatórios estratégicos (Gondim *et al*., 2004).

As atividades agrícolas também se relacionam a fontes difusas de alteração da qualidade da água. O escoamento superficial em áreas cultivadas pode transportar sedimentos, nutrientes e defensivos agrícolas para os corpos hídricos, especialmente em períodos chuvosos e em áreas com manejo inadequado do solo. No Baixo Jaguaribe, a avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura identificou compostos com diferentes graus de mobilidade, persistência e risco ambiental, considerando suas propriedades físico-químicas e as condições ambientais regionais (Milhome *et al*., 2009).

Assim, a agricultura irrigada exerce pressão quantitativa, associada às demandas de captação, e pode representar pressão qualitativa, conforme as práticas de manejo do solo e de aplicação de insumos (Gondim *et al*., 2004; Milhome *et al*., 2009).

4.3.2. Expansão da Carcinicultura no Baixo Jaguaribe

A carcinicultura de águas interiores passou a compor a dinâmica econômica do Baixo Jaguaribe a partir da expansão da criação de camarão em áreas próximas ao rio Jaguaribe e a outros sistemas hídricos interiores. Em municípios como Quixeré, Russas, Jaguaruana e Itaiçaba, fazendas de camarão utilizam águas vinculadas ao rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude Castanhão, e a outros corpos hídricos locais (FIGUEIRÊDO *et al*., 2006).

Os efluentes gerados pela produção de camarão em cativeiro podem conter matéria orgânica, nutrientes, sólidos suspensos e resíduos associados ao manejo dos viveiros, variando conforme densidade de cultivo, alimentação, renovação de água e tecnologias empregadas (FIGUEIRÊDO *et al*., 2006).

A expansão da carcinicultura no Baixo Jaguaribe esteve relacionada à reorganização territorial de áreas rurais, à ocupação de espaços próximos aos corpos hídricos e à transformação de ambientes vinculados à planície fluvial. A atividade passou a integrar a economia regional por meio da instalação de empreendimentos aquícolas, da alteração do uso da terra e da ampliação da demanda por água em áreas de baixa disponibilidade hídrica natural (Araújo, 2009).

Nos terraços fluviais semiáridos do Baixo Jaguaribe, a área ocupada por viveiros de carcinicultura passou de 2,34 km², em 1985, para 7,83 km², em 2021, o que corresponde a aumento aproximado de 234,6% em relação à área inicial. Essa expansão ocorreu em conjunto com alterações na cobertura vegetal, ampliação de usos produtivos e intensificação de processos erosivos em setores dos terraços fluviais (Assis *et al*., 2024).

4.3.3. Atividades Industriais e Extração Mineral

As atividades industriais do Baixo Jaguaribe incluem a produção cerâmica e a extração de argila em áreas associadas à planície fluvial do rio Jaguaribe. No município de Russas, a fabricação de telhas e tijolos utiliza jazidas de argila localizadas em depósitos sedimentares da planície fluvial, onde a indústria cerâmica apresenta concentração expressiva de unidades produtivas (Lucena, 2014).

A planície fluvial do rio Jaguaribe apresenta depósitos argilosos formados por processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos. Em Russas, a avaliação das jazidas de argila identificou volume total estimado em 866.347.846,5 m³, com parte significativa das áreas classificadas como de alto potencial para uso pela atividade ceramista (Lucena, 2014).

A extração de argila destinada à cerâmica vermelha envolve remoção de vegetação, abertura de frentes de lavra e alteração da superfície da planície fluvial. Em áreas de extração

no Baixo Jaguaribe, foram registrados processos associados à modificação da paisagem, supressão vegetal, erosão hídrica, transporte de sedimentos, exposição do lençol freático e desvalorização de terras (Fernandes Silva; Moreira dos Santos, 2014).

A mineração de materiais utilizados na construção civil também participa da degradação dos terraços fluviais. A extração de piçarra nesses ambientes envolve abertura de clareiras, escavação de trincheiras e exposição do solo, favorecendo a formação de incisões erosivas e o transporte de sedimentos em áreas submetidas à perda de cobertura vegetal (Assis *et al*., 2024).

A agricultura irrigada, a carcinicultura, a produção cerâmica, a extração mineral e os usos urbanos geram pressões de naturezas distintas sobre o Baixo Jaguaribe. Entre seus possíveis efeitos estão a demanda por água, as alterações na cobertura do solo, a geração de efluentes e a mobilização de sedimentos. Esta caracterização contextual não permite, por si só, atribuir causalidade às variações dos parâmetros observados na presente pesquisa (Fernandes Silva; Moreira dos Santos, 2014; Assis *et al*., 2024).

4.4. Dinâmica hidrológica do rio Jaguaribe

A bacia do rio Jaguaribe situa-se predominantemente no domínio semiárido, no qual a irregularidade das chuvas e as secas recorrentes condicionam o regime hidrológico. Historicamente, trechos do rio apresentavam escoamento sazonal, com alternância entre fluxo superficial e interrupções ao longo do canal (Campos, 2014; Cirilo, 2008).

A operação do Açude Castanhão possibilitou a regularização de vazões em trechos a jusante da barragem, modificando a dinâmica hidrológica anteriormente marcada pela sazonalidade. As condições de escoamento e de transporte de sedimentos constituem fatores relevantes para interpretar a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de qualidade da água, sem que se estabeleça, nesta pesquisa, relação causal direta entre a operação do reservatório e os valores medidos (COGERH, 2023a).

4.5. Saneamento e lançamento de efluentes

As condições de saneamento básico exercem influência direta sobre a qualidade ambiental dos corpos hídricos, especialmente em áreas onde a coleta e o tratamento de esgotos não acompanham o ritmo de crescimento urbano e de ocupação territorial. A infraestrutura de abastecimento de água e esgotamento sanitário integra o conjunto de serviços associados à

saúde pública, à proteção ambiental e à redução da carga poluidora lançada nos corpos receptores (Leoneti; Prado; Oliveira, 2011).

O lançamento de esgotos domésticos em cursos d'água está associado ao aumento de matéria orgânica, nutrientes, sólidos, microrganismos indicadores de contaminação fecal e alterações em parâmetros como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total e nitrogênio. Em rios urbanos brasileiros, esses parâmetros são utilizados para avaliar a influência de efluentes domésticos e a condição ambiental dos corpos hídricos submetidos à pressão antrópica (Von Sperling, 2014; ANA, 2019).

No Baixo Jaguaribe, a presença de núcleos urbanos ao longo do sistema fluvial insere o saneamento básico entre os fatores associados à qualidade da água. Em trecho urbano do rio Jaguaribe, a ocupação das margens, a redução da vegetação ciliar e a poluição por esgotos domésticos foram relacionadas às alterações das condições ambientais do corpo hídrico (Fernandes *et al*., 2019).

O diagnóstico da Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, publicado em 2023 com indicadores do SNIS referentes a 2021, registrou atendimento urbano de esgotamento sanitário de 78,8% em Ibicuitinga, 63,94% em Quixeré, 47,53% em Limoeiro do Norte, 26,09% em Russas, 21,45% em Aracati, 9,84% em Tabuleiro do Norte, 5,4% em Palhano e 3,99% em Morada Nova, enquanto Fortim, Icapuí, Itaiçaba e Jaguaruana aparecem sem percentual informado. O levantamento também identificou cinco estações de tratamento de esgoto na região e seis outorgas para lançamento de efluentes, das quais quatro estavam localizadas em Aracati, uma em Russas e uma em Tabuleiro do Norte (COGERH, 2023a).

As fontes domésticas, agrícolas e produtivas integram o conjunto de pressões potenciais sobre a qualidade da água no Baixo Jaguaribe. Sua presença na região, entretanto, não demonstra contribuição específica para os valores medidos nos pontos desta pesquisa (Fernandes *et al*., 2019).

4.6. Gestão e fiscalização dos recursos hídricos

Os comitês de bacia hidrográfica (CBHs) integram o modelo de gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos. Esses colegiados discutem usos da água e articulam usuários e poder público em processos de gestão e planejamento (Morais; Fadul; Cerqueira, 2018).

A gestão dos recursos hídricos envolve instrumentos como planos de recursos hídricos, enquadramento dos corpos d'água, outorga de direito de uso, cobrança pelo uso da água e

sistemas de informações. Esses instrumentos organizam a administração dos usos múltiplos, a regulação do acesso à água e a produção de dados destinados ao planejamento e à tomada de decisão (Brasil, 1997).

No planejamento regional, o fortalecimento da fiscalização é associado à ampliação e capacitação das equipes técnicas, bem como à articulação entre instituições responsáveis pelo acompanhamento dos usos da água (COGERH, 2023b; Ceará, 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

A área de estudo compreende o baixo curso do rio Jaguaribe, no leste do estado do Ceará. A caracterização territorial e socioambiental da região hidrográfica foi apresentada no Capítulo 4; nesta seção delimitam-se os pontos de monitoramento utilizados na análise orbital.

O estudo concentrou-se em três pontos de monitoramento da qualidade da água pertencentes à rede da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), distribuídos ao longo do baixo curso do rio Jaguaribe. Os pontos selecionados foram JAG-14, localizado no município de Quixeré; JAG-16, localizado em Jaguaruana; e JAG-06, localizado em Itaiçaba. A escolha desses pontos fundamentou-se na disponibilidade de séries históricas de monitoramento e na representatividade espacial ao longo do trecho estudado.

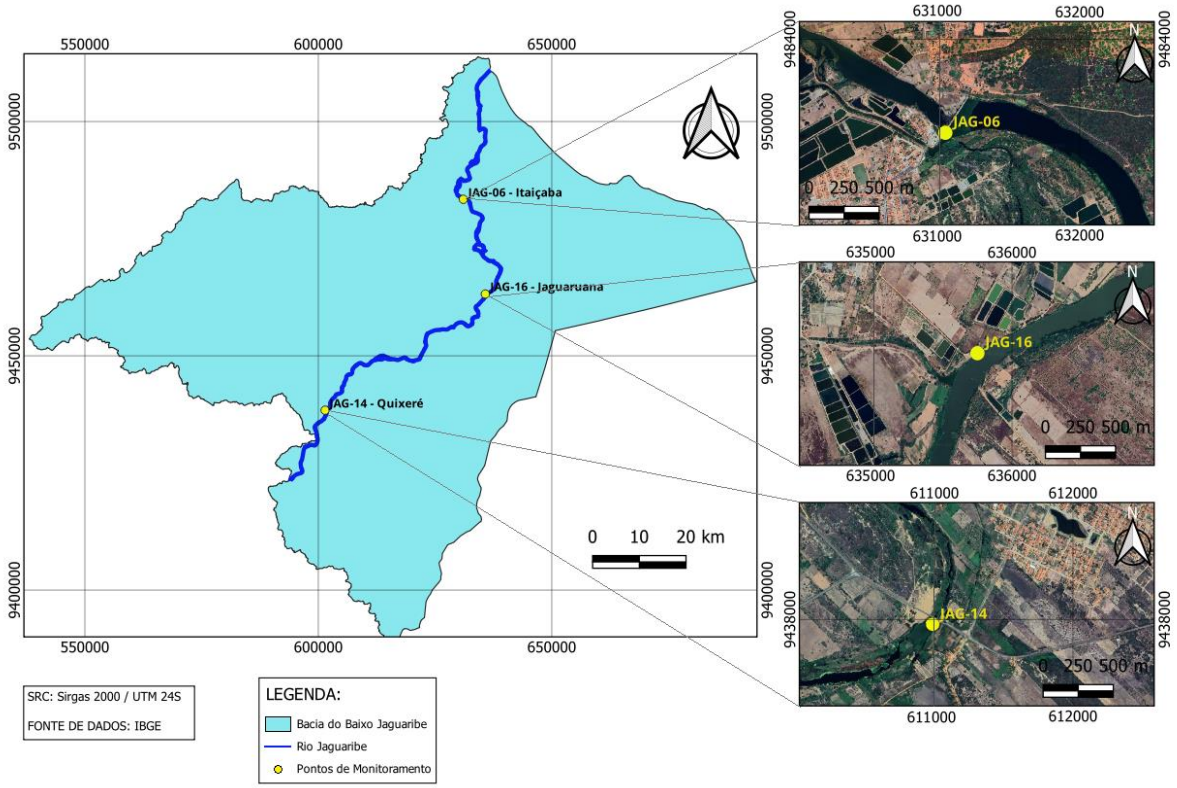
A localização dos pontos de monitoramento é apresentada na Figura 4 e na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos de monitoramento de qualidade no Baixo Jaguaribe utilizados na pesquisa

Ponto	Latitude	longitude	Município
JAG-14	-4.671470	-37.816081	Quixeré
JAG-16	-4.856101	-37.775765	Jaguaruana
JAG-06	-5.084036	-37.998652	Itaiçaba

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4 – Pontos de monitoramento utilizados na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além da localização geográfica dos pontos de monitoramento, a largura da lâmina d'água nos trechos analisados constitui uma informação relevante para a interpretação dos resultados obtidos por sensoriamento remoto. Em ambientes lóticos, a relação entre a largura do canal e a resolução espacial do sensor influencia diretamente a possibilidade de obtenção de pixels compostos predominantemente por água. Dessa forma, em trechos estreitos, a quantidade de pixels com resposta espectral predominantemente aquática tende a ser reduzida, aumentando a possibilidade de mistura espectral.

Para avaliar essa condição, foi estimada a largura aparente da lâmina d'água nas proximidades dos três pontos de monitoramento utilizados na pesquisa: JAG-14, em Quixeré; JAG-16, em Jaguaruana; e JAG-06, em Itaiçaba. Essa estimativa teve como objetivo verificar a compatibilidade entre a largura do canal e a resolução espacial das imagens Sentinel-2/MSI utilizadas na extração das reflectâncias. As estimativas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Largura estimada da lâmina d'água nos pontos de monitoramento utilizados na pesquisa

Ponto	Município	Largura mínima estimada (m)	Largura média estimada (m)	Largura máxima estimada (m)

JAG-14	Quixeré	20	38	70
JAG-16	Jaguaruana	80	145	183
JAG-06	Itaiçaba	202	209	218

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A estimativa da largura aparente da lâmina d'água permitiu contextualizar a relação entre a dimensão transversal do rio e a resolução espacial das imagens Sentinel-2/MSI. Essa avaliação tem caráter auxiliar e não substitui a verificação do pixel efetivamente amostrado nem assegura ausência de mistura espectral com as margens.

Essa avaliação foi utilizada como critério auxiliar de interpretação, sem pressupor que um único pixel represente integralmente as condições da seção transversal ou a amostra coletada em campo.

5.2. Dados utilizados

Foram utilizados registros institucionais de qualidade da água disponibilizados pela COGERH, informações pluviométricas da FUNCEME e valores espectrais extraídos de imagens Sentinel-2/MSI. As três fontes têm funções distintas na pesquisa: os registros da COGERH representam as observações de campo, as imagens fornecem as variáveis espectrais e a precipitação contribui para a contextualização sazonal.

5.2.1. Dados de qualidade da água

Os dados de qualidade da água foram obtidos junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), responsável pelo monitoramento sistemático dos recursos hídricos do estado do Ceará. Foram utilizados registros referentes ao período compreendido entre março de 2016 e junho de 2025, abrangendo três pontos localizados no baixo curso do rio Jaguaribe.

Foram selecionados os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais, em razão de sua disponibilidade na série histórica e de sua relação com alterações físicas e ópticas da água. Esses parâmetros podem refletir mudanças associadas ao aporte de sedimentos, à presença de matéria orgânica, à variação da transparência da água e a pressões antrópicas sobre os corpos hídricos, apresentando potencial de investigação por meio de sensoriamento remoto.

Foram organizados 115 registros de monitoramento dos pontos JAG-14, JAG-16 e JAG-06, referentes à série histórica disponível entre 2016 e 2025, com distribuição temporal descontínua. A Figura 5 ilustra a estrutura da base fornecida pela COGERH. A quantidade de registros compatibilizados com imagens orbitais e sua distribuição temporal são apresentadas no capítulo de Resultados.

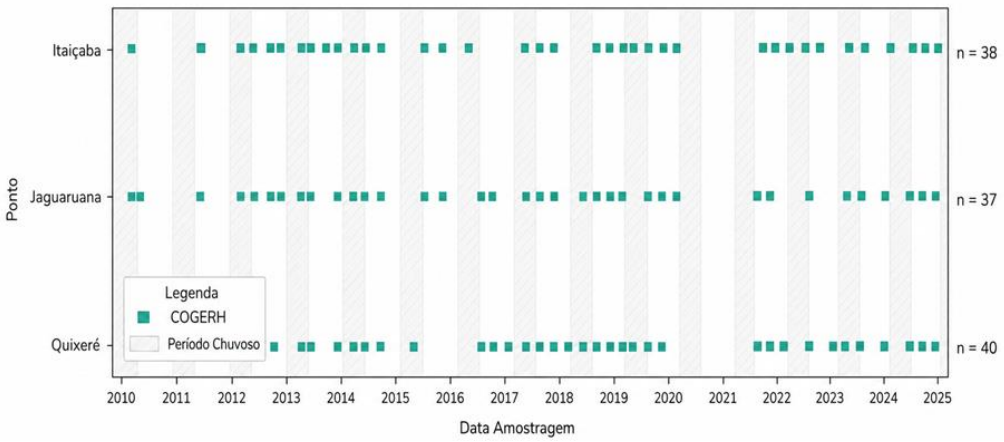
Figura 5 – Captura de tela do banco de dados de qualidade de água da Cogerh

	Ponto	Data Coleta	Cor Verdadeira	Turbidez	Sólidos Totais Lab	Sólidos Diss. Totais Lab
			mg Pt/L	NTU	mg/L	mg/L
1	JAG-06	09/03/2016	225	48,72	676,5	618,5
2	JAG-14	08/06/2016	50	1,54	291	291
3	JAG-16	08/06/2016	75	46,87	1206	1156,5
4	JAG-16	18/08/2016	125	55,15	1905	1837
5	JAG-14	23/08/2016	30	1,99	338	338
...	...	...	...	...	...	...
68	JAG-16	12/12/2024	20	1,3	370	336
69	JAG-06	12/12/2024	25	8	1.846,00	1.561,00
70	JAG-14	13/03/2025	5	0,6	296	275
71	JAG-14	11/06/2025	15	0,8	217	208
72	JAG-16	11/06/2025	20	6	530	499

Fonte: Adaptado de Cogerh (2026).

A distribuição temporal das campanhas de monitoramento não ocorreu de forma contínua ao longo da série histórica, apresentando variações na frequência de amostragem entre os pontos. A Figura 6 apresenta a disponibilidade dos dados de monitoramento *in situ* realizados pela COGERH no rio Jaguaribe, bem como sua relação com os períodos chuvosos ao longo da série temporal.

Figura 6 – Disponibilidade de dados de monitoramento *in situ* realizado pela Cogerh no rio Jaguaribe



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

A disponibilidade de registros apresentou descontinuidade temporal nos pontos avaliados. Essa condição foi considerada na compatibilização com as imagens orbitais e na interpretação da representatividade da base integrada; sua distribuição é apresentada em Resultados.

5.2.2. Dados pluviométricos

Com o objetivo de contextualizar as condições hidrológicas observadas durante o período de estudo, foram utilizados dados pluviométricos disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Essas informações foram empregadas como variável auxiliar para interpretação das variações dos parâmetros de qualidade da água e da resposta espectral observada nas imagens Sentinel-2/MSI.

A seleção dos postos pluviométricos considerou a conexão hidrológica com os trechos do rio representados pelos pontos de monitoramento, não apenas a proximidade geográfica. A identificação dos postos e os critérios de exclusão de áreas de contribuição com escoamento retido por reservatórios são detalhados na seção 5.7.

Os dados pluviométricos foram empregados na contextualização das condições sazonais associadas aos registros analisados, sem constituir variável explicativa dos modelos de regressão espectral. A seleção dos postos e as limitações de inferência hidrológica são detalhadas na seção 5.8.

5.2.3. Dados orbitais

Os dados orbitais utilizados na pesquisa foram obtidos a partir da missão Sentinel-2, integrante do Programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA). Foram utilizadas imagens do sensor Multispectral Instrument (MSI), que apresenta resolução espacial de 10 metros nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, além de frequência de revisita compatível com aplicações de monitoramento ambiental.

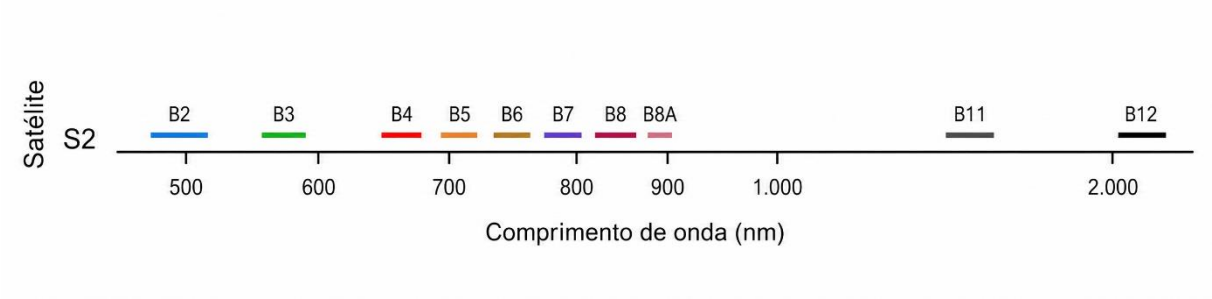
As imagens foram acessadas e processadas em ambiente Google Earth Engine (GEE), por meio da coleção Sentinel-2 Surface Reflectance, correspondente ao produto Level-2A, que disponibiliza imagens previamente corrigidas atmosfericamente. A utilização desse produto permitiu trabalhar com valores de reflectância de superfície, mais adequados para a comparação com os dados de qualidade da água obtidos em campo.

Foram selecionadas como variáveis espectrais principais as bandas B2, B3, B4 e B8 do Sentinel-2/MSI. A identificação das faixas espectrais e as características técnicas dessas bandas foram apresentadas na seção 3.8; aqui, sua indicação delimita o conjunto efetivamente empregado na extração das reflectâncias e na construção das razões e dos índices analisados.

De forma complementar, também foram avaliadas as bandas B11 e B12, correspondentes ao infravermelho de ondas curtas, denominadas nesta pesquisa como SWIR1 e SWIR2. Essas bandas apresentam resolução espacial de 20 m e foram incorporadas de forma exploratória, considerando sua possível contribuição para a interpretação de sólidos totais, efeitos de mistura espectral e influência de margens em corpos hídricos estreitos. Em razão da diferença de resolução espacial em relação às bandas de 10 m, seus resultados foram interpretados com cautela, especialmente no contexto de um ambiente lótico como o rio Jaguaribe.

A Figura 7 apresenta a distribuição espectral das bandas Sentinel-2 consideradas nesta pesquisa, destacando as faixas utilizadas para extração das reflectâncias e análise das variáveis espectrais.

Figura 7 – Largura das bandas a serem utilizadas na obtenção de grandezas radiométricas para os sensores embarcado no Sentinel-2 (S2)



Fonte: Adaptado de (ESA,2016).

5.3. Justificativa das variáveis analisadas

A seleção das variáveis considerou a relevância para o monitoramento da qualidade da água, a disponibilidade dos registros históricos da COGERH e a possibilidade de examinar associações com a resposta espectral das imagens Sentinel-2/MSI. A presença de uma associação estatística, contudo, não implica relação causal nem garante desempenho preditivo.

A escolha dessas variáveis também está associada às características ópticas dos corpos hídricos, uma vez que alterações em suas concentrações podem modificar a absorção e o espalhamento da radiação eletromagnética, influenciando os valores de reflectância observados pelos sensores remotos. Dessa forma, esses parâmetros apresentam potencial para serem

avaliados por meio da integração entre dados convencionais de monitoramento e informações obtidas por sensoriamento remoto.

5.3.1. Cor verdadeira

A cor verdadeira é um parâmetro físico utilizado na caracterização da qualidade da água e corresponde à coloração atribuída às substâncias dissolvidas, após a retirada da interferência provocada por partículas em suspensão. De acordo com Von Sperling (2014), a avaliação da cor deve distinguir a cor aparente da cor verdadeira, uma vez que esta última está relacionada principalmente à fração dissolvida presente na água. Em ambientes aquáticos continentais, a coloração da água pode estar associada à presença de matéria orgânica dissolvida, compostos húmicos e outros constituintes naturais ou antrópicos presentes na bacia hidrográfica (Esteves,2011; Libânio, 2016).

No contexto do sensoriamento remoto, alterações na cor da água decorrem da interação entre a radiação eletromagnética e os constituintes opticamente ativos presentes no meio aquoso, sendo registradas principalmente nas faixas do espectro visível, como as regiões do azul e do verde (Galo *et al*., 2002).

Sua inclusão na pesquisa também se justifica pela importância operacional desse parâmetro para os processos de tratamento da água destinada ao abastecimento humano, uma vez que alterações significativas na coloração podem demandar ajustes nos procedimentos de tratamento e elevar os custos operacionais dos sistemas de abastecimento.

5.3.2. Turbidez

A turbidez é um parâmetro físico utilizado na caracterização da qualidade da água e está associada à redução da transparência provocada pela presença de partículas em suspensão na coluna d’água. Esse parâmetro está relacionado à interferência exercida por materiais particulados sobre a passagem da luz, incluindo sedimentos minerais, matéria orgânica particulada, algas, microrganismos e outros constituintes dispersos no meio aquático (Von Sperling, 2014; Libânio, 2016).

Em estudos de sensoriamento remoto aplicado à água, a turbidez é analisada em função da interação entre a radiação eletromagnética e os constituintes opticamente ativos presentes no corpo hídrico. Lopes *et al*. (2014), ao modelarem variáveis limnológicas em reservatório no Ceará, relacionaram dados radiométricos hiperespectrais com atributos como turbidez,

transparência de Secchi e sedimentos inorgânicos em suspensão, evidenciando o uso de informações espectrais na estimativa desses parâmetros.

No contexto do baixo curso do rio Jaguaribe, a turbidez também apresenta elevada relevância por estar associada a processos erosivos, transporte de sedimentos, aporte de materiais provenientes do escoamento superficial e interferências decorrentes das atividades antrópicas desenvolvidas na bacia hidrográfica.

5.3.3. Sólidos totais

Os sólidos totais correspondem ao conjunto de materiais presentes na água, abrangendo as frações dissolvida e em suspensão. Esse parâmetro é utilizado na caracterização físico-química da qualidade da água e pode estar relacionado à presença de sais dissolvidos, partículas minerais, matéria orgânica e outros resíduos incorporados ao corpo hídrico. Em ambientes fluviais, a concentração de sólidos pode refletir processos de erosão, transporte de sedimentos, lançamento de efluentes, atividades agropecuárias e modificações no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica (Von Sperling, 2014; Libânio, 2016).

Lopes *et al*. (2014), em estudo realizado no reservatório Orós, no Ceará, utilizaram dados radiométricos para estimar variáveis limnológicas associadas à qualidade da água, incluindo sedimentos inorgânicos em suspensão, turbidez e transparência de Secchi. De forma semelhante, Barbosa, Novo e Martins (2019) descrevem que os constituintes opticamente ativos presentes na água, como partículas em suspensão e matéria orgânica dissolvida, influenciam a reflectância registrada por sensores remotos.

5.3.4. Bandas Sentinel-2 e índices espectrais utilizados

Além dos parâmetros de qualidade da água obtidos junto à base de monitoramento da COGERH, foram utilizadas variáveis espectrais derivadas das imagens Sentinel-2/MSI, com o objetivo de avaliar a associação entre a resposta espectral da superfície hídrica e os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.

Foram consideradas as bandas espectrais já descritas na seção 5.2.3, incluindo as faixas do visível e do infravermelho próximo. Sua seleção foi orientada pela finalidade exploratória de examinar relações entre resposta espectral e os parâmetros de qualidade da água avaliados.

As bandas SWIR1 e SWIR2 foram avaliadas apenas como bandas individuais. Sua inclusão teve caráter complementar, considerando a possibilidade de auxiliar na interpretação de sólidos totais, mistura espectral e influência de margens.

Além das bandas individuais, foram calculadas razões simples e índices normalizados entre bandas, com o objetivo de verificar se combinações espectrais apresentariam maior associação com os parâmetros de qualidade da água do que as bandas analisadas isoladamente. As razões espectrais foram utilizadas para representar contrastes entre diferentes regiões do espectro eletromagnético, enquanto os índices normalizados foram empregados para realçar diferenças relativas entre bandas e reduzir efeitos de escala.

A seleção das razões e índices espectrais considerou combinações de bandas utilizadas em estudos de sensoriamento remoto aplicados à qualidade da água. As relações entre bandas do azul, verde e vermelho foram consideradas em razão de sua associação com variações ópticas da água, como coloração, turbidez e constituintes opticamente ativos, conforme abordagens discutidas por Arias-Rodriguez *et al*. (2021). As combinações envolvendo as bandas do vermelho e do infravermelho próximo foram incorporadas por sua recorrência em estudos voltados à turbidez, sólidos suspensos e material particulado, como observado em Nechad, Ruddick e Park (2010) e Hossain, Mathias e Blanton (2021). O índice normalizado verde-NIR foi incluído por seguir a lógica do NDWI, originalmente proposto por McFeeters (1996) para realce de corpos d’água, sendo aqui utilizado de forma exploratória para avaliar contrastes espectrais associados à superfície hídrica.

Quadro 1 – Índices e razões espectrais utilizados na pesquisa

Variável espectral	**Fórmula adaptada ao Sentinel-2**	**Parâmetro associado**	**Justificativa**	**Referência**
Razão verde/azul	(B3/B2)	Cor verdadeira	Avalia o contraste entre as bandas do verde e do azul, podendo representar variações ópticas associadas à coloração da água.	Arias-Rodriguez et al. (2021)
Razão vermelho/verde	(B4/B3)	Turbidez; sólidos totais	Avalia o contraste entre as bandas do vermelho e do verde, faixas associadas à presença de partículas, sedimentos e alterações ópticas da água.	Hossain; Mathias; Blanton (2021)
Razão NIR/vermelho	(B8/B4)	Turbidez; sólidos totais	Testa a relação entre o infravermelho próximo e o vermelho, podendo indicar variações associadas à presença de materiais em suspensão.	Nechad; Ruddick; Park (2010)
Razão NIR/verde	(B8/B3)	Turbidez; sólidos totais	Avalia o contraste entre a resposta no verde e no infravermelho próximo, podendo indicar alterações espectrais em águas com maior presença de partículas ou influência de margens.	Nechad; Ruddick; Park (2010)

Variável espectral	Fórmula adaptada ao Sentinel-2	Parâmetro associado	Justificativa	Referência
Índice normalizado vermelho-verde	((B4-B3)/(B4+B3))	Turbidez; sólidos totais	Corresponde ao contraste normalizado entre vermelho e verde, sendo associado à avaliação da turbidez e de materiais particulados na água.	Hossain; Mathias; Blanton (2021)
Índice normalizado verde-azul	((B3-B2)/(B3+B2))	Cor verdadeira	Avalia a diferença normalizada entre verde e azul, podendo indicar variações ópticas relacionadas à cor da água.	Arias-Rodriguez et al. (2021)
Índice normalizado verde-NIR	((B3-B8)/(B3+B8))	Condição óptica da água; turbidez; sólidos totais	Avalia o contraste entre a resposta da água no verde e no infravermelho próximo, podendo auxiliar na interpretação de mistura espectral e influência de materiais presentes na coluna d'água.	McFeeters (1996)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As razões B3/B2, B4/B3, B8/B4 e B8/B3 foram utilizadas como variáveis espectrais empíricas, com o objetivo de avaliar contrastes entre bandas do visível e do infravermelho próximo. O índice normalizado vermelho-verde ((B4-B3)/(B4+B3)) apresenta relação com abordagens utilizadas para avaliação de turbidez e material particulado em suspensão, enquanto o índice normalizado verde-NIR ((B3-B8)/(B3+B8)) segue a lógica do NDWI, originalmente proposto para realce e identificação de corpos d'água.

Ressalta-se que, nesta pesquisa, os índices e razões espectrais foram utilizados como variáveis explicativas exploratórias, e não como modelos físicos diretos para estimativa dos parâmetros de qualidade da água. As referências indicadas na tabela correspondem à base metodológica para seleção e adaptação das combinações espectrais, não significando a reprodução integral dos algoritmos originais. Essa cautela é necessária especialmente porque parte da literatura trabalha com sólidos suspensos, material particulado ou turbidez, enquanto esta pesquisa utiliza os parâmetros disponíveis na base de monitoramento, incluindo sólidos totais.

5.3.5. Variáveis não selecionadas

Outros parâmetros de qualidade da água, como sólidos dissolvidos totais, nutrientes e indicadores biológicos, também possuem relevância para o monitoramento ambiental. Entretanto, sua utilização nesta pesquisa não foi priorizada devido às limitações relacionadas à disponibilidade de dados compatíveis e, principalmente, ao reduzido potencial de detecção direta por sensores ópticos orbitais.

No caso dos sólidos dissolvidos totais, por exemplo, a influência sobre a resposta espectral da água tende a ser significativamente menor quando comparada àquela produzida por materiais particulados em suspensão. Dessa forma, optou-se por concentrar as análises nos parâmetros que apresentam maior potencial de relação com as informações espectrais obtidas pelo sensor Sentinel-2, aumentando a consistência metodológica e a robustez das análises propostas.

5.4. Obtenção e processamento dos dados orbitais no Google Earth Engine

O processamento das imagens Sentinel-2/MSI ocorreu no Google Earth Engine (GEE). As características do sensor e as bandas utilizadas já foram apresentadas nas seções 3.8 e 5.2.3; esta seção descreve a seleção das cenas, a extração das reflectâncias e a associação das imagens aos registros da COGERH.

A escolha do Sentinel-2 fundamenta-se na disponibilidade gratuita das imagens, na resolução espacial das bandas do visível e do infravermelho próximo e na frequência de revisita aproximada de cinco dias. Essas características favorecem aplicações voltadas ao monitoramento de corpos hídricos continentais, especialmente quando se busca relacionar dados de campo com a resposta espectral registrada por sensores orbitais.

O processamento dos dados orbitais foi realizado em ambiente Google Earth Engine (GEE), plataforma computacional baseada em nuvem que disponibiliza acesso a coleções de imagens de satélite e ferramentas para processamento geoespacial em larga escala. A utilização do GEE permitiu automatizar a busca, a seleção, o mascaramento de nuvens e a extração das informações espectrais correspondentes aos pontos de monitoramento da qualidade da água.

Para este estudo, foi utilizada a coleção Sentinel-2 Surface Reflectance, correspondente ao produto Level-2A, que disponibiliza imagens previamente corrigidas atmosfericamente. A utilização desse produto reduz interferências associadas aos efeitos atmosféricos e fornece valores de reflectância mais adequados para análises ambientais e aplicações relacionadas ao monitoramento da qualidade da água.

A seleção das imagens considerou a disponibilidade de cenas adequadas para os pontos de monitoramento. Inicialmente, as imagens Sentinel-2/MSI foram filtradas no Google Earth Engine com base nos metadados de cobertura de nuvens da cena. Em seguida, foi aplicada máscara automática de nuvens no processamento das imagens, com o objetivo de remover pixels afetados por nuvens e interferências atmosféricas. Após esse procedimento, as cenas foram verificadas nos pontos de monitoramento, sendo desconsideradas aquelas que ainda

apresentavam nuvens, sombras, falhas radiométricas ou interferências visuais sobre o pixel correspondente ao corpo hídrico ou sobre o trecho do rio analisado.

Após a seleção das imagens válidas, foram extraídos os valores de reflectância das bandas selecionadas e descritas na seção 5.2.3, mantendo a associação de cada observação à sua data e ao respectivo ponto de monitoramento.

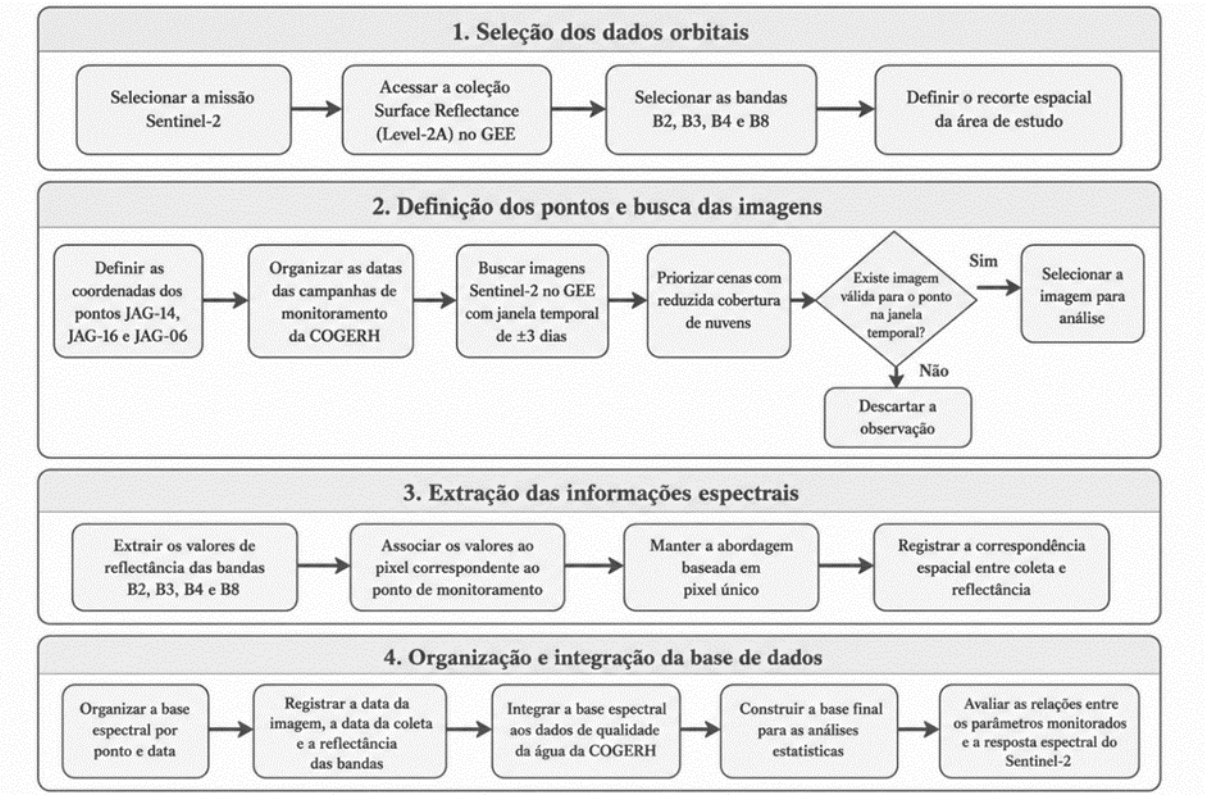
De forma complementar, também foram extraídos os valores das bandas SWIR1 e SWIR2. Em razão da menor resolução espacial, os resultados associados a essas bandas foram interpretados com cautela.

A extração espectral foi realizada no pixel correspondente à posição geográfica de cada ponto de monitoramento. Essa escolha operacional não elimina possíveis efeitos de mistura espectral, posicionamento do ponto, variação da largura do rio e influência das margens, que devem ser considerados na interpretação das associações observadas.

Os valores extraídos foram organizados em uma base de dados contendo a identificação do ponto monitorado, a data da coleta *in situ*, a data da imagem orbital correspondente e os respectivos valores de reflectância das bandas analisadas. Essa base serviu de suporte para o cálculo das razões espectrais, dos índices normalizados e das análises estatísticas realizadas nas etapas posteriores da pesquisa.

O encadeamento das etapas de processamento dos dados orbitais e sua integração com as observações de campo está representado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do processamento dos dados orbitais Sentinel-2 e integração com os dados de qualidade da água



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

5.4.1. Fluxo metodológico da pesquisa

A metodologia adotada nesta pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais, envolvendo a obtenção dos dados de qualidade da água, a seleção e processamento das imagens orbitais, a integração das bases de dados e a realização das análises estatísticas. O procedimento metodológico teve como objetivo avaliar as relações entre os parâmetros monitorados pela COGERH e as informações espectrais obtidas a partir das imagens Sentinel-2, visando investigar o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta complementar ao monitoramento da qualidade da água.

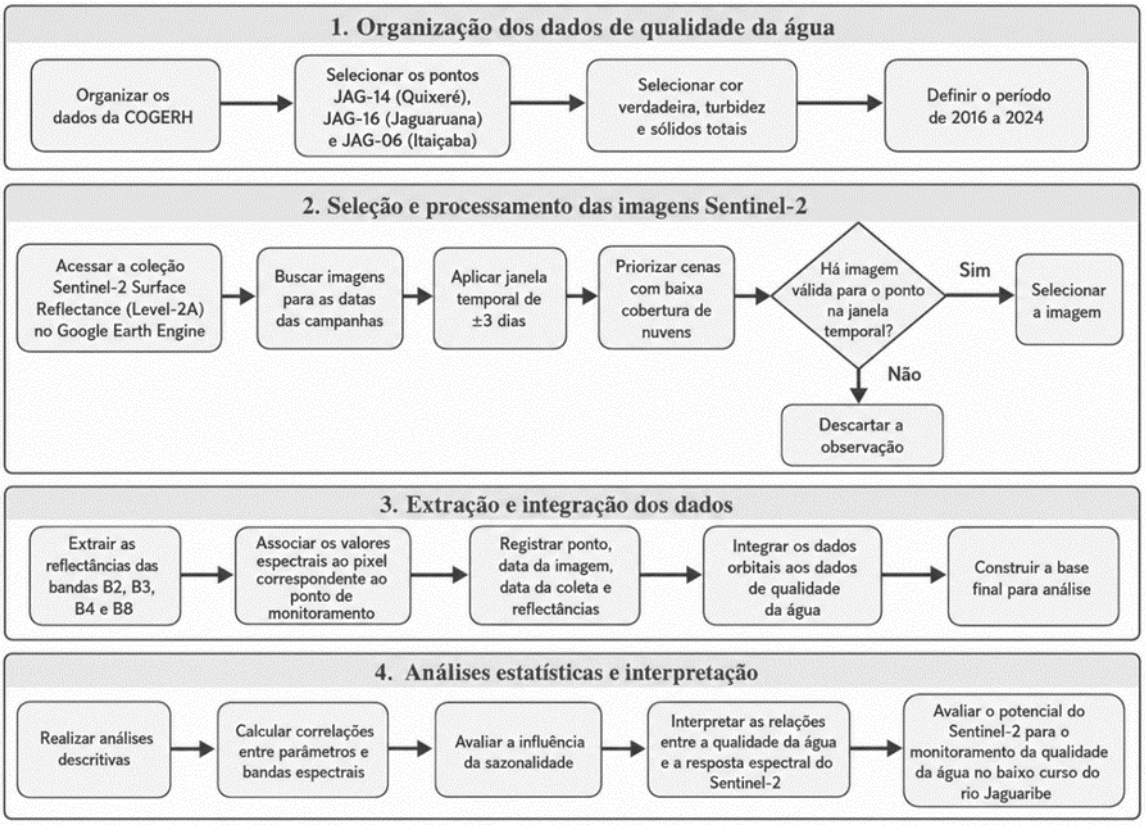
Inicialmente foram organizados os dados de qualidade da água referentes aos pontos JAG-14 (Quixeré), JAG-16 (Jaguaruana) e JAG-06 (Itaiçaba), contemplando as variáveis cor verdadeira, turbidez e sólidos totais para o período de 2016 a 2025. Em seguida, foram identificadas e selecionadas as imagens Sentinel-2 compatíveis com as datas das campanhas de monitoramento, adotando-se uma janela temporal máxima de ±3 dias entre a coleta em campo e a aquisição da imagem orbital.

Posteriormente, realizou-se a extração dos valores de reflectância das bandas B2, B3, B4 e B8 em ambiente Google Earth Engine, utilizando as coordenadas dos pontos de monitoramento. Os dados espectrais foram então integrados às informações obtidas pela COGERH, formando uma base única destinada às análises estatísticas.

Como procedimento complementar, foi realizada a estimativa da largura aparente da lâmina d'água nos trechos correspondentes aos pontos JAG-14, JAG-16 e JAG-06. As medições foram efetuadas de forma transversal ao eixo principal do canal, nas proximidades das coordenadas dos pontos de monitoramento, utilizando imagens orbitais ou imagens de alta resolução disponíveis em ambiente geoespacial. A partir dessas medições, foram calculados os valores mínimo, médio e máximo de largura da lâmina d'água em cada trecho, os quais foram utilizados como informação auxiliar para avaliar a possibilidade de ocorrência de pixels mistos e de interferência das margens na resposta espectral extraída das imagens Sentinel-2/MSI.

A Figura 9 sintetiza o fluxo metodológico da pesquisa, desde a obtenção dos dados até a avaliação das relações entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis espectrais.

Figura 9 – Fluxograma de metodologia de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

5.5. Compatibilização entre dados *in situ* e imagens orbitais

A associação entre observações de campo da COGERH e imagens Sentinel-2/MSI foi realizada por ponto e por data. A proximidade temporal entre as duas observações foi tratada como critério de compatibilização, e não como garantia de equivalência das condições físicas da água.

Nesta pesquisa, foi adotada uma janela temporal de até três dias antes ou depois da data da coleta. Para cada registro de qualidade da água, foram buscadas imagens Sentinel-2/MSI adquiridas nesse intervalo, priorizando-se a imagem com menor diferença temporal em relação à amostragem de campo e com condições adequadas para análise no ponto de monitoramento.

A exigência de coincidência exata entre coleta e passagem do satélite poderia reduzir o número de registros pareados, em função da frequência de revisita e da disponibilidade de cenas sem interferências. Não foi executada nesta pesquisa uma comparação estatística alternativa restrita a imagens do mesmo dia ou de até ±1 dia.

Por outro lado, janelas temporais muito amplas podem comprometer a representatividade da associação entre os dados de campo e a reflectância registrada. Feitoza (2022), ao comparar janelas de até três e até sete dias entre coletas *in situ* e imagens Sentinel-2 na Lagoa da Pampulha, observou melhor desempenho estatístico nas associações realizadas com menor defasagem temporal. Embora esse estudo tenha sido desenvolvido em ambiente lêntico, sua abordagem reforça a necessidade de reduzir o intervalo entre campo e satélite. Em ambientes lóticos, essa cautela torna-se ainda mais relevante, pois o fluxo contínuo, a precipitação e as variações de vazão podem alterar rapidamente parâmetros como turbidez e sólidos em suspensão, influenciando a resposta espectral registrada por sensores orbitais (Brito *et al*., 2022; Maeda *et al*., 2024).

Adotou-se a janela de até três dias antes ou depois da coleta como compromisso entre proximidade temporal e disponibilidade de pares válidos. Esse intervalo não garante estabilidade da qualidade da água entre as datas, sobretudo em ambientes lóticos. Assim, a janela de ±3 dias constitui limitação metodológica e deve ser considerada na leitura dos resultados.

5.6. Organização e tratamento da base de dados

Após a obtenção dos dados de qualidade da água e das informações espectrais derivadas das imagens Sentinel-2/MSI, foi realizada a integração das bases em um único banco de dados destinado às análises estatísticas, espectrais e sazonais. Essa etapa teve como finalidade

organizar os registros de monitoramento da COGERH e associá-los às informações orbitais previamente selecionadas conforme os critérios descritos nas seções anteriores.

A base inicial foi composta pelos registros de qualidade da água referentes aos pontos JAG-14, JAG-16 e JAG-06, considerando os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. Em seguida, foram incorporadas as informações relativas às imagens Sentinel-2/MSI compatíveis, incluindo a data da imagem orbital, a diferença temporal em relação à coleta de campo, as bandas espectrais extraídas e as variáveis espectrais calculadas.

Com o objetivo de reduzir inconsistências e garantir maior confiabilidade às análises, foram realizadas verificações de integridade da base, considerando a presença das informações essenciais, a correspondência entre data de coleta e imagem orbital, a disponibilidade de reflectância válidas e a ausência de interferências que comprometessem a extração espectral. Os registros que não apresentaram imagem adequada dentro da janela temporal estabelecida ou que não atenderam às condições mínimas para extração das reflectâncias foram excluídos da base integrada.

A Tabela 3 reúne os resultados da compatibilização entre os registros de campo e as imagens Sentinel-2.

Tabela 3 – Síntese da compatibilização entre dados de qualidade da água e imagens Sentinel-2

Situação da base de dados	**Quantidade de registros**	**Percentual**
Campanhas de monitoramento disponíveis	115	100,00%
Registros com imagem Sentinel-2 compatível	56	48,70%
Registros sem imagem compatível	59	51,30%
Base final utilizada nas análises	56	48,70%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os registros foram submetidos aos critérios de verificação de integridade, disponibilidade de imagens e compatibilização temporal e espacial descritos nesta seção. A síntese quantitativa da seleção é apresentada na Tabela 3; sua interpretação em conjunto com a distribuição final da base é desenvolvida no Capítulo 6.

A comparação da disponibilidade de registros entre os pontos de monitoramento foi realizada após a aplicação dos critérios de seleção. As quantidades efetivamente utilizadas em cada trecho são apresentadas em Resultados.

Tabela 4 – Distribuição dos registros válidos por ponto de monitoramento

Ponto	Município	Quantidade de registros
JAG-06	Itaiçaba	20
JAG-14	Quixeré	19
JAG-16	Jaguaruana	17
Total	—	56

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A distribuição anual dos registros compatibilizados foi examinada para caracterizar a cobertura temporal da base. Os quantitativos obtidos são apresentados na Tabela 5, enquanto as consequências para a representatividade das análises são discutidas nos resultados.

A Tabela 5 apresenta a distribuição anual dos registros compatibilizados.

Tabela 5 – Distribuição anual dos registros válidos

Ano	Quantidade de registros
2016	2
2017	3
2018	6
2019	10
2021	9
2022	5
2023	9
2024	9
2025	3
Total	**56**

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A base integrada foi organizada de modo a reunir, em cada registro válido, as informações espaciais, temporais, hidrológicas, espectrais e estatísticas necessárias às etapas seguintes da pesquisa. Essa estrutura permitiu analisar tanto o conjunto geral dos dados quanto as variações por ponto de monitoramento e por período sazonal.

Quadro 2 – Estrutura da base integrada utilizada nas análises

Grupo de informação	Variável incluídas	Finalidade da análise
Identificação espacial	Ponto de monitoramento, município e coordenadas geográficas	Permitir a análise por ponto e a associação espacial com as imagens Sentinel-2/MSI
Informação temporal	Data da coleta, data da imagem orbital e diferença temporal entre coleta e imagem	Controlar a compatibilização entre dados *in situ* e dados orbitais
Qualidade da água	Cor verdadeira, turbidez e sólidos totais	Variáveis dependentes analisadas na pesquisa
Bandas espectrais	B2, B3, B4 e B8	Variáveis independentes utilizadas para avaliar a resposta espectral da água
Razões espectrais	B3/B2, B4/B3, B8/B4 e B8/B3	Avaliar contrastes entre bandas do visível e do infravermelho próximo

Índices normalizados	Índice normalizado verde-azul, vermelho-verde e verde-NIR	Testar combinações espectrais normalizadas como variáveis explicativas exploratórias
Informação sazonal	Classificação do período seco ou chuvoso	Apoiar a análise da influência sazonal sobre os parâmetros de qualidade da água
Precipitação	Precipitação acumulada ou representativa da área de influência dos pontos	Auxiliar a interpretação das variações temporais e sazonais

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os dados consolidados foram utilizados nas análises descritivas, sazonais, de correlação e nos modelos exploratórios de regressão. A organização da base permitiu avaliar as relações entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis espectrais, respeitando as limitações associadas ao número de observações compatibilizadas, à distribuição temporal irregular dos registros e ao caráter exploratório da aplicação do sensoriamento remoto em ambiente lótico.

5.7. Análise estatística

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de avaliar a relação entre os parâmetros de qualidade da água medidos em campo e as variáveis espectrais obtidas a partir das imagens Sentinel-2/MSI. Para isso, foram aplicadas estatísticas descritivas, correlação linear de Pearson, regressão linear simples e regressão linear múltipla, considerando o caráter exploratório da pesquisa.

A correlação de Pearson e os modelos de regressão linear simples e múltipla foram adotados para examinar associações no conjunto de dados pareados. Diante do número limitado e da distribuição desigual das observações, os ajustes foram interpretados como exploratórios, sem validação independente de capacidade preditiva.

Dessa forma, a correlação de Pearson foi empregada como procedimento preliminar para identificar associações lineares entre bandas, razões espectrais, índices normalizados e os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais, enquanto os modelos lineares foram utilizados como instrumentos exploratórios de interpretação, sem finalidade preditiva definitiva.

Inicialmente, foram calculadas estatísticas descritivas dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais, bem como das reflectâncias das bandas Sentinel-2/MSI utilizadas no estudo. Foram considerados valores mínimos, máximos, médias, medianas e desvios padrão, com o objetivo de caracterizar a distribuição dos dados, identificar a variabilidade dos parâmetros analisados e comparar o comportamento observado entre os pontos de monitoramento.

Em seguida, foi aplicada a correlação linear de Pearson para avaliar a intensidade e o sentido da associação entre as variáveis espectrais e os parâmetros de qualidade da água. Essa etapa permitiu identificar quais bandas, razões espectrais e índices normalizados apresentaram maior associação linear com cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. A análise foi realizada tanto para o conjunto geral de dados quanto de forma individualizada por ponto de monitoramento, considerando a possibilidade de variações locais na relação entre resposta espectral e qualidade da água.

Após a análise de correlação, foram ajustados modelos de regressão linear simples e regressão linear múltipla. Na regressão linear simples, cada parâmetro de qualidade da água foi relacionado individualmente a uma variável espectral. Na regressão linear múltipla, foram avaliadas combinações de bandas, razões e índices espectrais, com o objetivo de verificar se o uso conjunto dessas variáveis poderia ampliar a capacidade explicativa dos modelos.

A regressão linear simples foi representada pela seguinte expressão:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (3)$$

Em que Y representa o parâmetro de qualidade da água, X representa a variável espectral, β_0 corresponde ao intercepto, β_1 corresponde ao coeficiente angular e ε representa o erro do modelo.

A regressão linear múltipla foi representada por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (4)$$

Em que Y representa o parâmetro de qualidade da água, X_1, X_2, ..., X_n correspondem às bandas, razões ou índices espectrais utilizados como variáveis independentes, β_0 corresponde ao intercepto, β_1, β_2,..., β_n representam os coeficientes associados às variáveis independentes e ε representa o termo de erro do modelo.

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação R^2, do coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} e do valor de significância estatística associado aos modelos. O R^2 foi utilizado para indicar a proporção da variabilidade dos parâmetros de qualidade da água explicada pelas variáveis espectrais. O R^2_{aj} foi considerado especialmente nos modelos de regressão múltipla, por levar em conta o número de variáveis independentes incluídas e reduzir o risco de interpretação superestimada dos ajustes.

Os modelos foram analisados como instrumentos exploratórios de associação entre parâmetros de qualidade da água e informações espectrais, não como equações operacionais validadas para previsão. A interpretação considerou o tamanho da amostra, a heterogeneidade espacial e temporal e a compatibilização em janela de ±3 dias.

5.8. Análise da sazonalidade e da influência da precipitação

A precipitação exerce papel fundamental na dinâmica hidrológica e na qualidade da água dos sistemas fluviais do semiárido, influenciando processos como escoamento superficial, transporte de sedimentos, aporte de matéria orgânica e renovação dos volumes hídricos. Em função dessa característica, a análise da sazonalidade foi incorporada à pesquisa com o objetivo de subsidiar a interpretação das variações observadas nos parâmetros de qualidade da água e nas respostas espectrais obtidas por sensoriamento remoto.

Para caracterização das condições pluviométricas da área de estudo foram utilizados dados disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), provenientes de postos pluviométricos distribuídos ao longo da área de influência dos pontos monitorados no baixo curso do rio Jaguaribe.

A seleção dos postos não se baseou exclusivamente na proximidade geográfica aos pontos de monitoramento, mas principalmente na sua relação hidrológica com o trecho fluvial analisado. Foram priorizados postos localizados em áreas com potencial contribuição direta para os pontos de monitoramento, considerando a dinâmica de propagação dos fluxos ao longo do rio Jaguaribe.

Não foram incluídos postos situados em áreas de contribuição de reservatórios cuja afluência permanece retida nos sistemas hídricos, como os açudes Castanhão, Figueiredo, Riacho da Serra e Santo Antônio de Russas. Considerando que a presente pesquisa desconsidera situações de vertimento desses reservatórios, as precipitações registradas em suas áreas de contribuição não representam necessariamente aporte hídrico efetivo aos trechos analisados do rio Jaguaribe, podendo superestimar a influência da chuva sobre os parâmetros monitorados.

Para o ponto JAG-14 (Quixeré), foram considerados os postos pluviométricos localizados nos municípios de São João do Jaguaribe, Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte e Quixeré. Para o ponto JAG-16 (Jaguaruana), foram utilizados os postos considerados para Quixeré, acrescidos dos postos localizados no município de Russas e Jaguaruana. Para o ponto JAG-06 (Itaiçaba), foram considerados os postos utilizados para Jaguaruana, acrescidos dos postos localizados em Palhano e Itaiçaba.

Os dados pluviométricos foram utilizados para contextualizar as condições hidrológicas e classificar os registros segundo a sazonalidade adotada na pesquisa. Essa análise tem natureza descritiva; não foi realizado teste que permita atribuir à precipitação uma relação causal com os valores dos parâmetros de qualidade da água.

A precipitação foi tratada como informação complementar e interpretativa, sem inclusão nos modelos de regressão espectral. Por isso, os resultados sazonais descrevem diferenças observadas entre agrupamentos e não demonstram, isoladamente, efeitos diretos da chuva.

5.9. Revisão e estruturação textual com apoio de ferramentas de inteligência artificial

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foi utilizada ferramenta de inteligência artificial generativa como apoio complementar em etapas de busca preliminar de informações, organização de referências, revisão textual e aprimoramento visual de algumas figuras. A ferramenta utilizada foi o ChatGPT, em sua versão disponível durante o período de elaboração e revisão da pesquisa.

O uso de ferramentas de inteligência artificial na pesquisa acadêmica tem sido discutido como recurso auxiliar para a revisão de literatura, a organização de ideias, a síntese preliminar de estudos e o apoio à escrita acadêmica. No campo das revisões sistemáticas, Jesus e Santarem Segundo (2023) indicam que o ChatGPT pode auxiliar na estruturação de protocolos de pesquisa, desde que suas respostas sejam avaliadas criticamente pelo pesquisador. Em perspectiva semelhante, Santana, Souza e Viana (2024) destacam que ferramentas de inteligência artificial podem apoiar etapas de triagem, leitura orientada e organização de informações na revisão de literatura, sem substituir a análise humana. Silva (2025), ao discutir letramentos acadêmicos e inteligência artificial, ressalta que o ChatGPT pode contribuir para a compreensão e organização formal de textos acadêmicos, mas exige postura crítica diante das respostas geradas. Cunha *et al*. (2026), por sua vez, observam que o uso da inteligência artificial na produção científica demanda atenção à confiabilidade das informações, à autoria, à integridade acadêmica e à verificação das fontes utilizadas.

Nesta pesquisa, o uso da inteligência artificial ocorreu de forma instrumental e supervisionada. A ferramenta auxiliou na identificação preliminar de possíveis referências, na revisão da fluidez textual, na proposição de alternativas de redação e na estruturação lógica de seções da dissertação. Também foi utilizada no apoio ao aprimoramento visual de figuras produzidas originalmente pelo autor, especialmente quanto à legibilidade, organização visual e padronização gráfica. Esse uso não alterou dados, valores, coordenadas, mapas, resultados ou interpretações científicas.

Quadro 3 – Síntese do uso de inteligência artificial generativa na pesquisa

Etapa	Uso realizado	Controle adotado

Literatura	Identificação preliminar de referências, temas e estudos relacionados ao objeto da pesquisa.	Verificação das fontes em bases acadêmicas, periódicos científicos, repositórios institucionais ou páginas oficiais.
Revisão textual	Apoio à melhoria da fluidez e coesão.	Revisão, ajuste e aprovação final pelo autor.
Estruturação do texto	Organização lógica de seções e transições textuais.	Definição final da estrutura pelo autor, em diálogo com as orientações do professor orientador.
Síntese de estudos	Organização preliminar de informações comparativas entre artigos, métodos e resultados.	Conferência das interpretações nos textos originais antes da incorporação à dissertação.
Figuras	Aprimoramento visual, legibilidade e padronização gráfica de figuras elaboradas pelo autor.	Ausência de alteração de dados, mapas, valores, coordenadas, resultados ou interpretações.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As contribuições geradas com apoio da ferramenta foram submetidas à verificação antes de sua utilização, especialmente quanto à consistência das referências e à coerência com os objetivos da pesquisa. Dessa forma, a inteligência artificial foi utilizada apenas como recurso auxiliar, sem substituir as decisões metodológicas, a análise dos dados e a responsabilidade científica pela interpretação dos resultados e pelas conclusões apresentadas.

Os materiais complementares estão organizados nos Apêndices A a D. O Apêndice A reúne informações das variáveis espectrais do Sentinel-2/MSI, enquanto os Apêndices B, C e D documentam registros de seleção de imagens de Itaiçaba, Quixeré e Jaguaruana, respectivamente.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterização da base final de análise

As análises apresentadas neste capítulo foram realizadas a partir da base integrada de registros de qualidade da água medidos *in situ* pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e de reflectâncias extraídas das imagens Sentinel-2/MSI, conforme os procedimentos de compatibilização descritos no Capítulo 5. Cada registro integrado corresponde a uma associação válida entre a observação de campo e a informação orbital, respeitados os critérios de seleção adotados na pesquisa.

Essa base contempla os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais, além das variáveis espectrais extraídas e calculadas a partir das imagens orbitais. Embora o conjunto de dados permita avaliar relações entre os parâmetros de qualidade da água e a resposta espectral

registrada pelo sensor, sua distribuição temporal e espacial recomenda cautela na interpretação dos resultados, sobretudo nas análises por ponto de monitoramento e por período sazonal.

Dessa forma, os resultados são apresentados com enfoque exploratório, iniciando pela caracterização estatística dos parâmetros de qualidade da água, seguida da análise das reflectâncias, da avaliação sazonal, das correlações espectrais e dos modelos exploratórios de regressão.

6.2. Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água

A análise descritiva caracterizou a variação dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais medidos *in situ* pela COGERH e reunidos na base integrada às imagens Sentinel-2/MSI. A cor verdadeira apresentou valores entre 5,0 e 125,0 mg Pt/L, com média de 46,8 mg Pt/L e mediana de 35,0 mg Pt/L. A turbidez variou entre 0,5 e 216,9 NTU, com média de 31,1 NTU e mediana de 11,8 NTU. Os sólidos totais apresentaram valores entre 166,0 e 5.631,0 mg/L, com média de 1.171,1 mg/L e mediana de 582,0 mg/L.

A Tabela 6 reúne as estatísticas descritivas dos parâmetros medidos em campo.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de qualidade da água

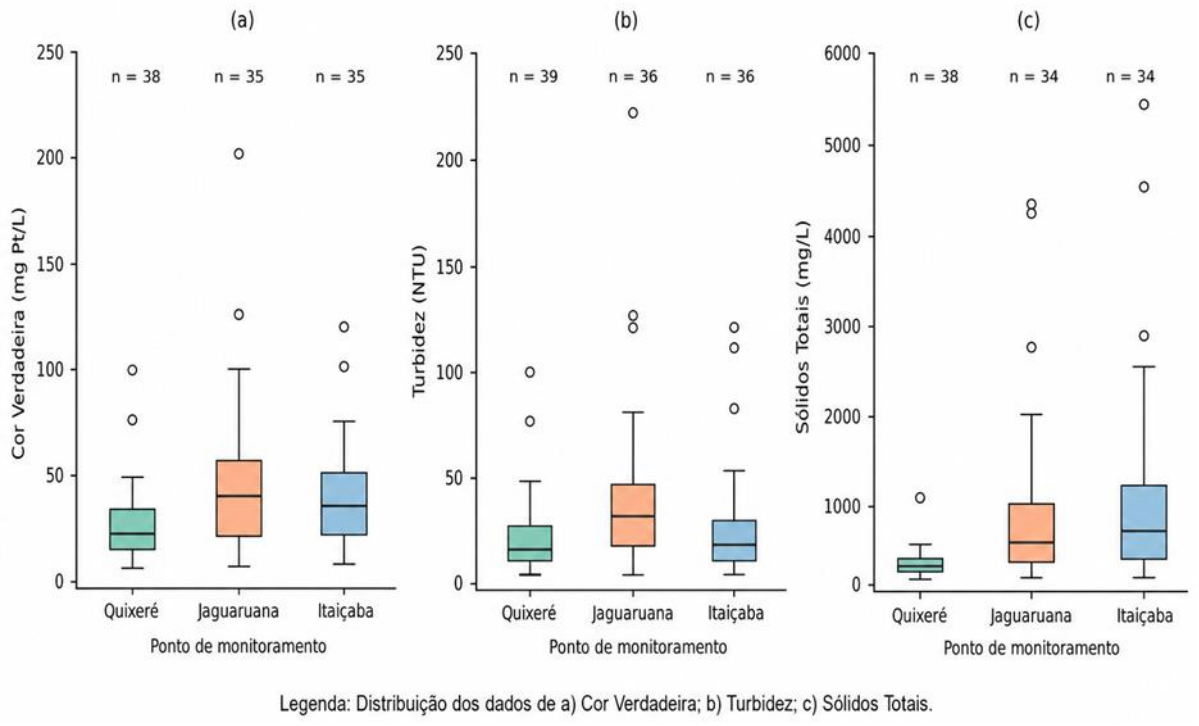
Parâmetro	N	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
Cor verdadeira (mg Pt/L)	56	5,0	125,0	46,8	35,0	32,6
Turbidez (NTU)	56	0,5	216,9	31,1	11,8	45,7
Sólidos totais (mg/L)	53	166,0	5.631,0	1.171,1	582,0	1.343,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A diferença entre média e mediana, principalmente para turbidez e sólidos totais, evidencia assimetria na distribuição dos registros, com valores elevados em parte da amostra. Os dados descritivos, isoladamente, não permitem identificar quais processos ou condições locais produziram esses valores.

A distribuição dos valores dos principais parâmetros de qualidade da água foi avaliada por meio de boxplots, permitindo visualizar a mediana, a dispersão dos dados e a presença de valores extremos em cada ponto de monitoramento. A Figura 10 apresenta a distribuição dos valores de cor verdadeira, turbidez e sólidos totais nos pontos Quixeré, Jaguaruana e Itaiçaba.

Figura 10 – Boxplots com a distribuição dos valores dos principais parâmetros de qualidade da água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

Nos registros representados nos boxplots, Quixeré apresentou menor dispersão observada, principalmente para turbidez e sólidos totais, em comparação com os outros pontos. Esse comportamento descreve a distribuição da amostra disponível e, isoladamente, não demonstra estabilidade hidrológica nem diferença estatisticamente significativa entre trechos.

6.3. Variação dos parâmetros por ponto de monitoramento

A análise por ponto de monitoramento permitiu identificar diferenças espaciais entre os trechos avaliados do baixo curso do rio Jaguaribe. O ponto JAG-14 apresentou os menores valores médios de turbidez e sólidos totais. A turbidez média nesse ponto foi de 2,2 NTU, enquanto JAG-16 apresentou média de 65,1 NTU e JAG-06 apresentou média de 29,5 NTU.

Para sólidos totais, JAG-14 também apresentou a menor média, com 273,2 mg/L. Em JAG-16, a média foi de 1.382,9 mg/L, enquanto em JAG-06 foi de 1.843,3 mg/L. Esses resultados indicam maior carga média de materiais totais nos pontos JAG-16 e JAG-06, especialmente no trecho mais a jusante.

A Tabela 7 apresenta a distribuição dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento.

Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento

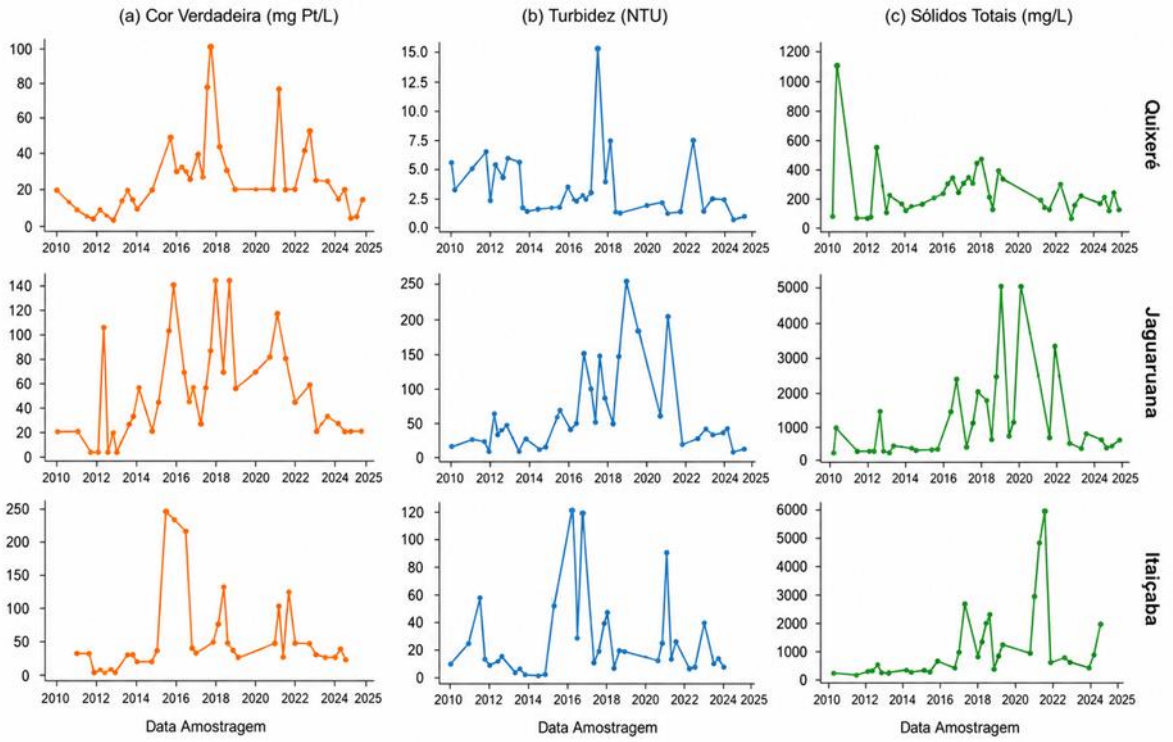
Ponto	Município	Parâmetro	N	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
JAG-06	Itaiçaba	Cor verdadeira	20	25,0	125,0	51,3	40,0	30,2
JAG-06	Itaiçaba	Turbidez	20	6,6	109,0	29,5	18,4	29,3
JAG-06	Itaiçaba	Sólidos totais	19	405,0	5.631,0	1.843,3	1.224,0	1.551,5
JAG-14	Quixeré	Cor verdadeira	19	5,0	100,0	31,1	25,0	23,3
JAG-14	Quixeré	Turbidez	19	0,5	7,4	2,2	1,5	2,0
JAG-14	Quixeré	Sólidos totais	18	166,0	413,0	273,2	265,0	68,7
JAG-16	Jaguaruana	Cor verdadeira	17	20,0	125,0	59,1	50,0	38,6
JAG-16	Jaguaruana	Turbidez	17	1,3	216,9	65,1	37,8	62,7
JAG-16	Jaguaruana	Sólidos totais	16	313,0	4.301,0	1.382,9	653,5	1.330,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As estatísticas por ponto mostram diferenças na distribuição dos registros que podem ser ocultadas por medidas calculadas para o conjunto dos três locais. JAG-14 apresentou menor dispersão amostral de turbidez e sólidos totais que JAG-16 e JAG-06. Essa descrição não constitui, por si só, teste de significância das diferenças entre trechos.

Com o objetivo de complementar a análise descritiva por ponto de monitoramento, foi elaborada a série temporal dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais para os pontos Quixeré, Jaguaruana e Itaiçaba. Essa representação permite visualizar a variação dos valores ao longo do período monitorado, bem como identificar oscilações, picos e diferenças de comportamento entre os trechos analisados do rio Jaguaribe. A Figura 11 apresenta a série temporal dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento.

Figura 11 – Série temporal dos parâmetros de qualidade da água por ponto de monitoramento no rio Jaguaribe



Legenda: A linha representa a variação temporal dos parâmetros de qualidade da água em cada ponto de monitoramento.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise da série temporal evidencia comportamentos distintos entre os pontos de monitoramento. Em Quixeré, observa-se menor amplitude de variação, especialmente para turbidez e sólidos totais, indicando maior estabilidade relativa desses parâmetros ao longo da série. Em Jaguaruana, nota-se maior oscilação temporal, com ocorrência de valores elevados de turbidez e sólidos totais em diferentes momentos da série. Em Itaiçaba, a variabilidade também se mostrou expressiva, com ocorrência de picos mais acentuados, principalmente para sólidos totais e cor verdadeira. De forma geral, a figura permite identificar que os parâmetros de qualidade da água não apresentaram comportamento uniforme ao longo do tempo, reforçando a influência de condições locais e de eventos específicos sobre a dinâmica da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe.

6.4. Estatística descritiva das reflectância s Sentinel-2

As reflectâncias extraídas das bandas Sentinel-2 apresentaram ampla variação entre os registros analisados. As bandas do visível, B2, B3 e B4, apresentaram médias de 0,2049, 0,2179 e 0,2083, respectivamente. A banda B8, correspondente ao infravermelho próximo, apresentou a maior média entre as bandas avaliadas, com valor de 0,2614. As bandas SWIR1 e SWIR2 apresentaram médias de 0,2225 e 0,1721, respectivamente, sendo avaliadas de forma complementar em razão de sua possível relação com mistura espectral, influência de margens e variações associadas à umidade e à presença de materiais na superfície.

A Tabela 8 reúne as estatísticas descritivas das reflectâncias extraídas das imagens Sentinel-2.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas das reflectância s extraídas das bandas Sentinel-2

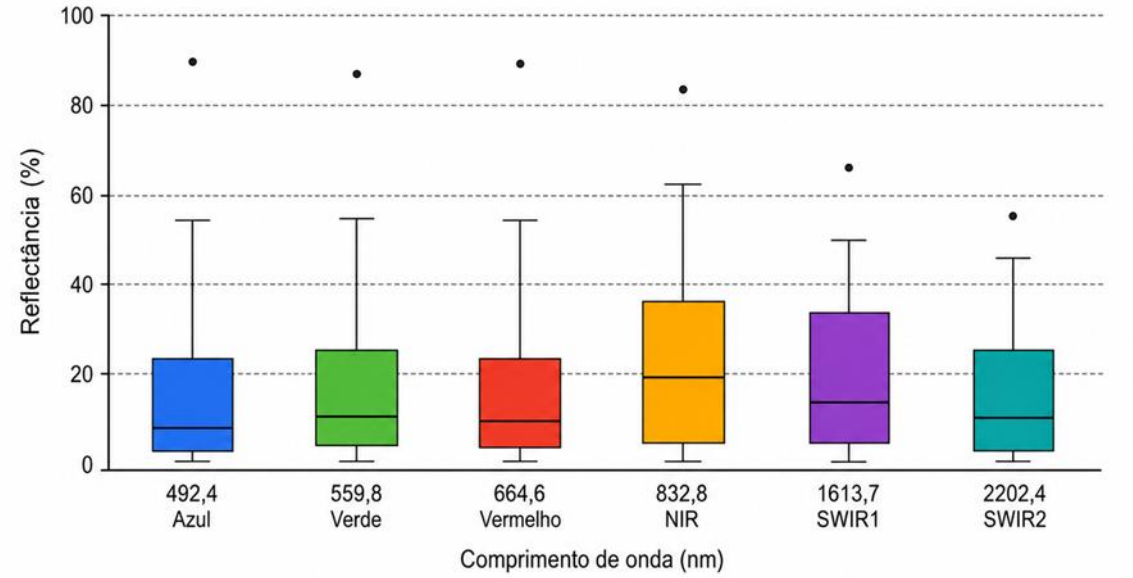
Banda	Região espectral	N	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
B2	Azul	56	0,0143	0,8952	0,2049	0,0759	0,2723
B3	Verde	56	0,0187	0,8696	0,2179	0,1107	0,2544
B4	Vermelho	56	0,0161	0,8944	0,2083	0,0875	0,2524
B8	Infravermelho próximo	56	0,0113	0,8336	0,2614	0,1909	0,2537
SWIR1	Infravermelho de ondas curtas 1	56	0,0121	0,6555	0,2225	0,1387	0,2040
SWIR2	Infravermelho de ondas curtas 2	56	0,0095	0,5529	0,1721	0,1001	0,1632

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores de reflectância variaram entre os registros analisados. A descrição estatística não permite atribuir essa variação exclusivamente às condições da água, uma vez que a resposta extraída pode incluir efeitos das margens, da resolução espacial, da geometria de aquisição e de outras condições de observação.

Para complementar a análise descritiva das reflectâncias extraídas das imagens Sentinel-2, foi elaborada a distribuição dos valores por banda espectral, permitindo visualizar a mediana, a dispersão dos dados e a ocorrência de valores extremos. A Figura 12 apresenta a distribuição dos valores de reflectância para as bandas B2, B3, B4, B8, SWIR1 e SWIR2 utilizadas na pesquisa.

Figura 12 – Distribuição dos valores de reflectância nos pontos de monitoramento para as bandas Sentinel-2 utilizadas na pesquisa



Nota: Dados Sentinel-2 com 56 dados de reflectância por banda.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

Observa-se que as bandas Sentinel-2 apresentaram distribuições distintas de reflectância, com variações na mediana e na dispersão dos valores. As bandas do visível (azul, verde e vermelho) apresentaram comportamento relativamente semelhante, enquanto a banda do infravermelho próximo (NIR) apresentou maior mediana e maior amplitude de variação. As bandas SWIR1 e SWIR2 também apresentaram dispersão expressiva, porém com valores centrais inferiores aos observados para o NIR. A presença de valores extremos em algumas bandas indica a ocorrência de observações com respostas espectrais mais elevadas, possivelmente associadas a condições específicas da superfície da água ou à variabilidade dos pontos monitorados.

6.5. Avaliação sazonal dos parâmetros de qualidade da água

Conforme o critério de classificação sazonal apresentado na seção 5.8, os 56 registros compatibilizados dos pontos JAG-14 (Quixeré), JAG-16 (Jaguaruana) e JAG-06 (Itaiçaba) foram agrupados em período chuvoso e período seco. Na base analisada, identificaram-se 10 registros no período chuvoso e 46 no período seco.

A cor verdadeira apresentou média de 49,5 mg Pt/L no período chuvoso e 46,2 mg Pt/L no período seco. A turbidez apresentou média de 13,9 NTU no período chuvoso e 34,8 NTU no período seco. Para sólidos totais, a média foi de 1.112,3 mg/L no período chuvoso e 1.184,7 mg/L no período seco.

A Tabela 9 apresenta, para o conjunto dos três pontos de monitoramento, as estatísticas descritivas dos parâmetros em cada período sazonal.

Tabela 9 – Estatísticas dos parâmetros de qualidade da água por período sazonal

Período	Parâmetro	N	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
Chuvoso	Cor verdadeira	10	5,0	120,0	49,5	50,0	29,1
Chuvoso	Turbidez	10	0,6	44,4	13,9	7,3	15,5
Chuvoso	Sólidos totais	10	207,0	5.631,0	1.112,3	409,0	1.694,5
Seco	Cor verdadeira	46	5,0	125,0	46,2	30,0	33,6
Seco	Turbidez	46	0,5	216,9	34,8	13,0	49,3
Seco	Sólidos totais	43	166,0	4.567,0	1.184,7	611,0	1.271,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Nos registros disponíveis, as médias de turbidez e sólidos totais foram superiores no período seco. A comparação tem caráter descritivo: a distribuição desigual de observações entre períodos e a cobertura temporal descontínua limitam inferências sobre a sazonalidade. Diferenças estatisticamente significativas só poderão ser afirmadas mediante testes apropriados, não apresentados nesta comparação.

6.6. Correlação entre parâmetros de qualidade da água e bandas individuais

A correlação de Pearson foi aplicada aos parâmetros de qualidade da água e às bandas individuais Sentinel-2/MSI selecionadas na seção 5.2.3 (B2, B3, B4, B8, SWIR1 e SWIR2). A inclusão exploratória das bandas SWIR foi mantida para examinar sua possível contribuição à interpretação dos parâmetros, considerando a mistura espectral e a influência das margens em trechos estreitos do rio.

De modo geral, os coeficientes de correlação indicaram baixa associação linear entre as bandas individuais e os parâmetros de qualidade da água analisados. Para a cor verdadeira, observaram-se correlações negativas fracas com as bandas do visível e do infravermelho próximo, variando de r = -0,12 a r = -0,16. As bandas SWIR1 e SWIR2 apresentaram correlação positiva muito fraca, com r = 0,02 e r = 0,02, respectivamente. Para a turbidez, os coeficientes também permaneceram próximos de zero, com valores entre r = -0,02 e r = 0,00 nas bandas B2, B3, B4 e B8, enquanto SWIR1 e SWIR2 apresentaram correlação positiva fraca, ambas com r = 0,14. No caso dos sólidos totais, os coeficientes foram positivos, porém igualmente baixos, com destaque para SWIR2 (r = 0,25), SWIR1 (r = 0,24) e B4 (r = 0,19).

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre os parâmetros de qualidade da água e as bandas espectrais.

Tabela 10 – Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros de qualidade da água e bandas Sentinel-2

Parâmetro	B2	B3	B4	B8	SWIR1	SWIR2
Cor verdadeira	-0,16	-0,16	-0,13	-0,12	0,02	0,03
Turbidez	-0,02	0,00	-0,02	0,02	0,14	0,14
Sólidos totais	0,15	0,17	0,19	0,14	0,24	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

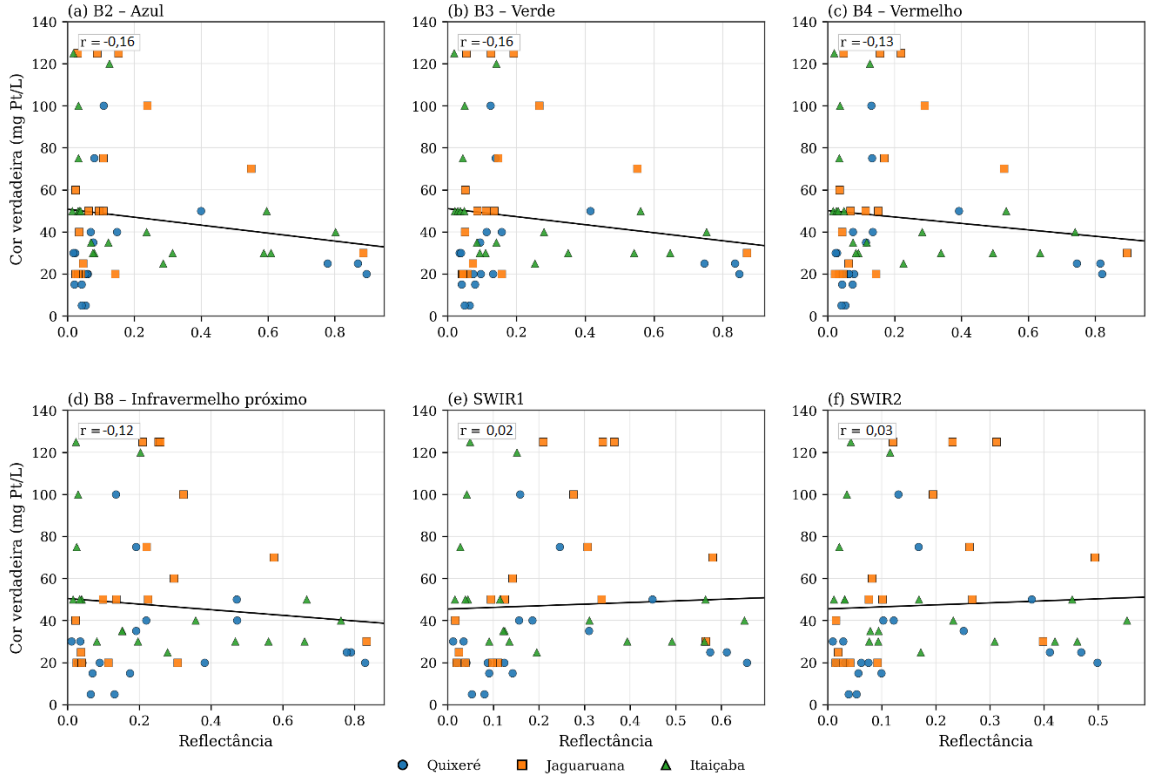
Embora SWIR1 e SWIR2 tenham apresentado os maiores coeficientes observados para alguns parâmetros, as correlações permaneceram fracas. Não é possível concluir, a partir desses coeficientes, que tais bandas permitam estimar isoladamente a qualidade da água. Sua eventual

contribuição deve ser examinada à luz das limitações de mistura espectral e da configuração dos pontos.

A análise gráfica das dispersões complementou a interpretação dos coeficientes de correlação, permitindo observar a distribuição dos dados, a heterogeneidade entre os pontos de monitoramento e a presença de valores extremos. As figuras a seguir apresentam as relações entre as reflectâncias das bandas avaliadas e os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.

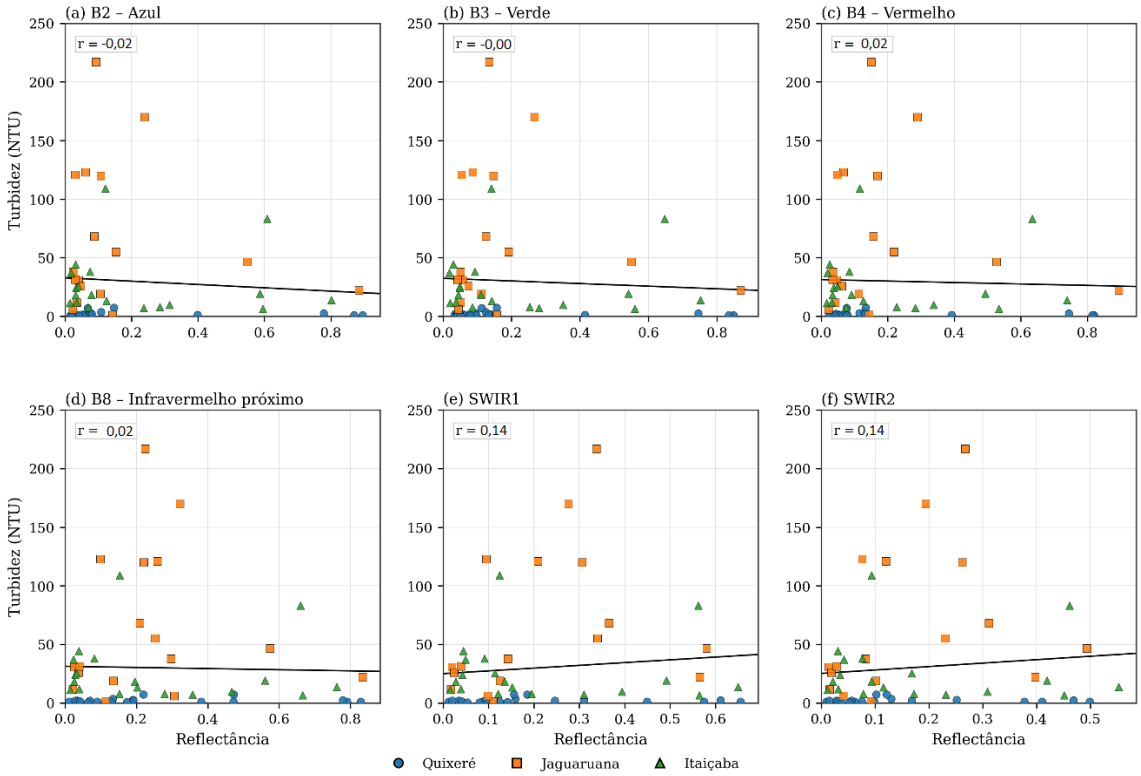
A Figura 13 apresenta a dispersão dos registros de cor verdadeira em relação às reflectâncias avaliadas.

Figura 13 – Relações entre cor verdadeira e reflectância s Sentinel-2



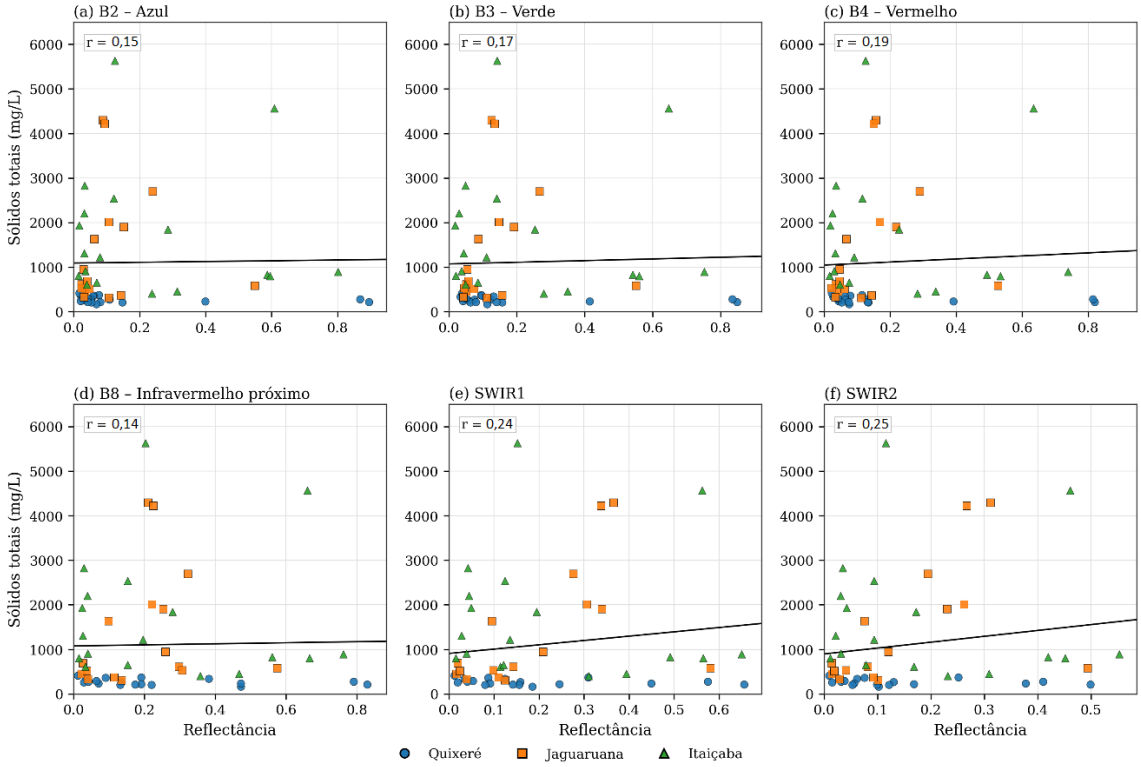
Legenda: O valor r corresponde ao coeficiente de correlação de Pearson considerando todos os pontos.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

Figura 14 – Relações entre Turbidez e reflectância s Sentinel-2



Legenda: O valor r corresponde ao coeficiente de correlação de Pearson considerando todos os pontos.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

Figura 15 – Relações entre sólidos totais e reflectância s Sentinel-2



Legenda: O valor r corresponde ao coeficiente de correlação de Pearson considerando todos os pontos.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com apoio de IA generativa na edição visual.

A dispersão dos dados confirma a ausência de tendência linear bem definida entre as reflectâncias e os parâmetros analisados quando os três pontos de monitoramento são considerados em conjunto. Para a cor verdadeira, observa-se leve tendência negativa nas bandas B2, B3, B4 e B8. Para a turbidez, os dados mostram elevada dispersão e ausência de padrão linear evidente. Já para os sólidos totais, percebe-se discreta tendência positiva em SWIR1 e SWIR2, embora ainda insuficiente para caracterizar associação linear expressiva.

Esse comportamento sugere que a resposta espectral das bandas individuais do Sentinel-2/MSI, isoladamente, apresenta limitações para representar diretamente a variação da qualidade da água no trecho estudado do rio Jaguaribe. A heterogeneidade entre os pontos de monitoramento, a variabilidade temporal das coletas e as características próprias do ambiente lótico, como fluxo contínuo, influência de margens e possível mistura espectral, tendem a reduzir a força das relações lineares observadas.

Diante desse resultado, tornou-se necessário avaliar combinações espectrais entre bandas, como razões simples e índices normalizados, com o objetivo de verificar se essas transformações poderiam melhorar a relação entre os dados orbitais e os parâmetros monitorados em campo.

6.7. Avaliação de índices e razões espectrais

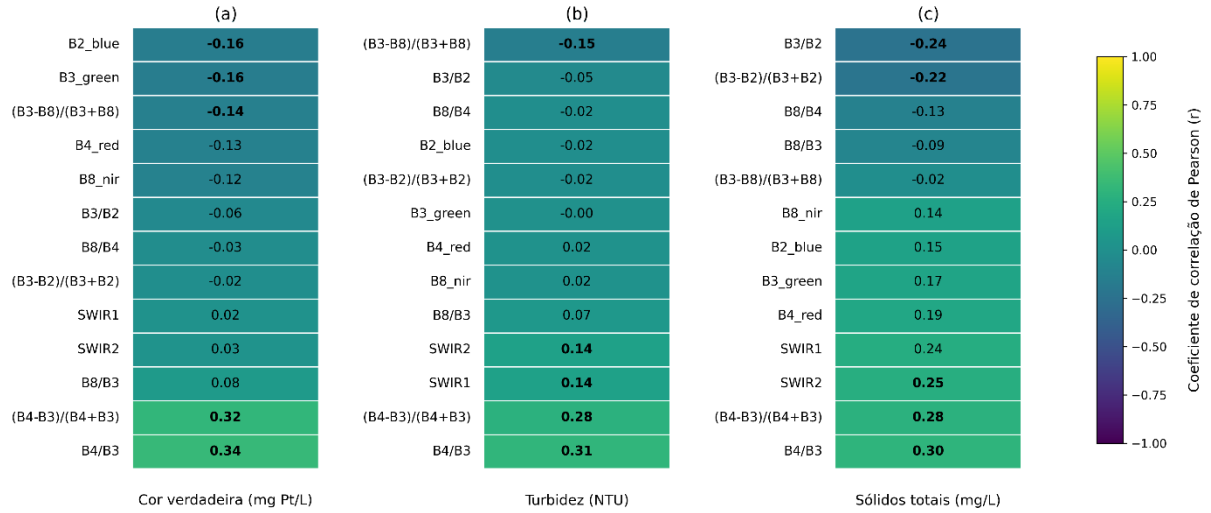
Após a análise das bandas individuais, foram avaliadas razões espectrais e índices normalizados derivados das bandas Sentinel-2, conforme descrito na metodologia. Essa etapa teve como objetivo verificar se combinações entre bandas poderiam apresentar maior associação com os parâmetros de qualidade da água do que as bandas analisadas isoladamente.

As variáveis espectrais avaliadas incluíram razões simples entre bandas do visível e do infravermelho próximo, além de índices normalizados envolvendo as bandas azul, verde, vermelha e infravermelha. Entre elas, destacam-se as razões (B3/B2), (B4/B3), (B8/B4) e (B8/B3), além dos índices ((B4-B3)/(B4+B3)), ((B3-B2)/(B3+B2)) e ((B3-B8)/(B3+B8)). Essas variáveis foram utilizadas como indicadores empíricos da resposta espectral da água, não sendo interpretadas como modelos físicos diretos de estimativa dos parâmetros analisados.

A avaliação foi realizada por meio da correlação linear de Pearson entre cada variável espectral e os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. A Figura 16 apresenta os coeficientes de correlação obtidos entre as variáveis espectrais avaliadas e os parâmetros de qualidade da água. A representação em mapa de calor permite observar, simultaneamente, a

intensidade e o sentido das correlações, facilitando a comparação entre os parâmetros analisados.

Figura 16 – Correlação de Pearson entre variáveis espectrais Sentinel-2 e parâmetros de qualidade da água



Legenda: (a) Cor verdadeira; (b) Turbidez; (c) Sólidos totais. Os valores indicam o coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis espectrais avaliadas. As variáveis destacadas correspondem às maiores magnitudes de correlação observadas para cada parâmetro.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para a cor verdadeira, as maiores correlações foram observadas com a razão B4/B3, com r = 0,341, e com o índice normalizado vermelho-verde, representado por (B4-B3)/(B4+B3), com r = 0,317. Também se destacaram, em módulo, as bandas B2, B3 e o índice (B3-B8)/(B3+B8), com coeficientes negativos fracos. Esse comportamento indica que as combinações envolvendo o contraste entre vermelho e verde apresentaram melhor associação com a cor verdadeira do que as bandas analisadas isoladamente, embora os coeficientes ainda permaneçam em faixa de baixa a moderada intensidade.

No caso da turbidez, a razão B4/B3 também apresentou o melhor desempenho relativo, com r = 0,306, seguida pelo índice (B4-B3)/(B4+B3), com r = 0,285. O índice (B3-B8)/(B3+B8) apresentou correlação negativa fraca, com r = -0,146, enquanto as bandas SWIR1 e SWIR2 apresentaram correlações positivas fracas, próximas de r = 0,14. Apesar da melhora em relação às bandas individuais, os valores ainda indicam associação linear limitada.

Para os sólidos totais, os maiores coeficientes foram observados com a razão B4/B3, com r = 0,296, e com o índice (B4-B3)/(B4+B3), com r = 0,278. As bandas SWIR2 e SWIR1 também se destacaram entre as principais variáveis associadas ao parâmetro, com r = 0,247 e r = 0,240, respectivamente. A razão B3/B2 apresentou correlação negativa fraca, com r = -0,237.

Esse resultado sugere maior coerência espectral para sólidos totais nas combinações envolvendo o contraste vermelho-verde e nas bandas do infravermelho de ondas curtas.

A Tabela 11 sintetiza as cinco variáveis espectrais com maior correlação em módulo para cada parâmetro de qualidade da água.

Tabela 11 – Principais variáveis espectrais mais correlacionadas com os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais

Parâmetro	Variável espectral	r de Pearson	n
Cor verdadeira	B4/B3	0,341	56
Cor verdadeira	(B4-B3)/(B4+B3)	0,317	56
Cor verdadeira	B2	-0,163	56
Cor verdadeira	B3	-0,156	56
Cor verdadeira	(B3-B8)/(B3+B8)	-0,144	56
Turbidez	B4/B3	0,306	56
Turbidez	(B4-B3)/(B4+B3)	0,285	56
Turbidez	(B3-B8)/(B3+B8)	-0,146	56
Turbidez	SWIR1	0,141	56
Turbidez	SWIR2	0,139	56
Sólidos totais	B4/B3	0,296	53
Sólidos totais	(B4-B3)/(B4+B3)	0,278	53
Sólidos totais	SWIR2	0,247	53
Sólidos totais	SWIR1	0,24	53
Sólidos totais	B3/B2	-0,237	53

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Em relação às bandas individuais, as razões e os índices espectrais apresentaram melhoria relativa nas correlações observadas. A razão B4/B3 apresentou os maiores coeficientes entre as variáveis aqui comparadas, mas a magnitude das associações permaneceu limitada. Portanto, esse desempenho relativo não caracteriza validação de um estimador operacional de qualidade da água.

A interpretação físico-óptica do contraste entre as bandas vermelha e verde e de sua possível relação com constituintes presentes na água é desenvolvida no Capítulo 7. Nesta seção, registra-se somente o desempenho empírico das variáveis espectrais avaliadas.

A influência potencial das condições hidrológicas do semiárido, do aporte de sedimentos e das particularidades de cada trecho sobre as relações espectrais será considerada na Discussão, sem pressupor mecanismos causais demonstrados apenas pelos coeficientes de correlação.

O índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3), também associado ao contraste entre vermelho e verde, apresentou comportamento semelhante, figurando entre as principais variáveis espectrais para os três parâmetros analisados. Entretanto, os baixos valores de correlação

indicam que esse índice não foi suficiente para explicar de forma robusta a variabilidade dos parâmetros na escala geral da área de estudo.

As variáveis envolvendo o infravermelho próximo e o infravermelho de ondas curtas apresentaram comportamento menos uniforme. Para sólidos totais, SWIR1 e SWIR2 apareceram entre as variáveis mais correlacionadas, sugerindo contribuição complementar dessas faixas espectrais para a interpretação desse parâmetro. Por outro lado, as razões B8/B4 e B8/B3 não apresentaram desempenho expressivo no conjunto geral dos dados.

De forma geral, a avaliação dos índices e razões espectrais confirmou que as relações entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis derivadas do Sentinel-2/MSI foram predominantemente fracas quando considerados todos os pontos de monitoramento em conjunto. Esse resultado não invalida o uso do sensoriamento remoto como ferramenta complementar, mas indica que as variáveis espectrais avaliadas, isoladamente, não apresentaram desempenho suficiente para sustentar modelos gerais robustos de estimativa direta dos parâmetros analisados.

As variáveis espectrais que apresentaram associações relativamente mais elevadas na etapa de correlação foram examinadas, na sequência, nos resultados dos modelos lineares simples e múltiplos. A seção 6.8 apresenta os respectivos ajustes, considerados para o conjunto geral e para cada ponto de monitoramento, segundo os procedimentos estabelecidos na seção 5.7.

6.8. Avaliação exploratória de modelos de regressão

Após a avaliação das correlações de Pearson, foram ajustados modelos de regressão linear simples e regressão linear múltipla, em caráter exploratório. Essa etapa teve como objetivo verificar se as variáveis espectrais com maior associação poderiam representar matematicamente os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.

Ressalta-se que os modelos foram avaliados como aproximações empíricas, e não como equações definitivas de estimativa. Essa cautela é necessária em razão da baixa magnitude das correlações gerais, do número limitado de registros integrados e das particularidades do ambiente lótico analisado, como variabilidade temporal, influência de margens e possível mistura espectral.

Quadro 4 – Modelos exploratórios de regressão avaliados na pesquisa

Grupo de modelo	Tipo de regressão	Forma matemática geral	Variáveis independentes avaliadas	Objetivo
Modelo 1	Regressão linear simples com bandas individuais	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$	B2, B3, B4, B8, SWIR1 e SWIR2	Verificar se uma banda isolada poderia representar cada parâmetro de qualidade da água.
Modelo 2	Regressão linear simples com razões e índices espectrais	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$	(B3/B2), (B4/B3), (B8/B4), (B8/B3), ((B4-B3)/(B4+B3)), ((B3-B2)/(B3+B2)) e ((B3-B8)/(B3+B8))	Verificar se combinações espectrais apresentariam melhor associação com os parâmetros do que as bandas isoladas.
Modelo 3	Regressão linear múltipla geral	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon$	Combinações de bandas e índices espectrais considerando todos os pontos em conjunto	Avaliar se o uso conjunto de variáveis espectrais melhora a capacidade explicativa dos modelos.
Modelo 4	Regressão linear múltipla por ponto	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon$	Combinações de variáveis espectrais aplicadas separadamente a JAG-06, JAG-14 e JAG-16	Verificar se os modelos apresentam melhor desempenho quando consideradas as particularidades locais de cada trecho monitorado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As regressões simples com bandas individuais confirmaram o baixo desempenho observado nas correlações iniciais. Para a cor verdadeira, o melhor resultado ocorreu com a banda B2, com r = -0,163, R^2 = 0,027 e p-valor de 0,2296. Para a turbidez, o melhor desempenho foi observado com a banda SWIR1, com r = 0,141 e R^2 = 0,020. Para sólidos totais, a melhor banda individual foi SWIR2, com r = 0,247, R^2 = 0,061 e p-valor de 0,0750.

Tabela 12 – Melhores regressões simples com bandas individuais

Parâmetro	Melhor banda	r de Pearson	R^2	p-valor
Cor verdadeira	B2	-0,163	0,027	0,2296
Turbidez	SWIR1	0,141	0,020	0,2995
Sólidos totais	SWIR2	0,247	0,061	0,075

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na regressão linear múltipla utilizando conjuntamente as bandas B2, B3, B4 e B8, observou-se melhora discreta em relação às regressões simples. O melhor desempenho ocorreu para cor verdadeira, com R^2 = 0,217, R^2 ajustado = 0,156 e p-valor de 0,0127. Para turbidez, o modelo apresentou R^2 = 0,162 e R^2 ajustado = 0,096, com p-valor de 0,0571. Para sólidos totais, o desempenho foi inferior, com R^2 = 0,124 e R^2 ajustado = 0,051.

Tabela 13 – Regressão linear múltipla com bandas B2, B3, B4 e B8

Parâmetro	N	R^2	R^2 ajustado	p-valor do modelo
Cor verdadeira	56	0,217	0,156	0,0127
Turbidez	56	0,162	0,096	0,0571
Sólidos totais	53	0,124	0,051	0,1652

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Quando a regressão múltipla foi realizada com razões e índices espectrais, a análise geral apresentou melhoria em relação aos modelos com bandas individuais, principalmente para cor verdadeira. Esse parâmetro apresentou $R^2 = 0,293$, R^2 ajustado = 0,190 e p-valor de 0,0145. Para turbidez, o modelo apresentou $R^2 = 0,204$, mas com R^2 ajustado de apenas 0,088. Para sólidos totais, o ajuste foi mais limitado, com $R^2 = 0,153$ e R^2 ajustado = 0,021.

A Tabela 14 apresenta os resultados da regressão múltipla geral com razões e índices espectrais.

Tabela 14 – Regressão múltipla geral com índices espectrais

Parâmetro	N	R^2	R^2 ajustado	p-valor do modelo
Cor verdadeira	56	0,293	0,190	0,0145
Turbidez	56	0,204	0,088	0,1183
Sólidos totais	53	0,153	0,021	0,3435

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A regressão múltipla por ponto de monitoramento apresentou valores de R^2 mais elevados em algumas combinações de ponto e parâmetro. Em JAG-16 (Jaguaruana), os modelos para cor verdadeira (n = 17) e sólidos totais (n = 16) apresentaram, respectivamente, $R^2 = 0,755$ (R^2 ajustado = 0,565; p = 0,0296) e $R^2 = 0,792$ (R^2 ajustado = 0,610; p = 0,0279). Em JAG-14 (Quixeré), o modelo para sólidos totais (n = 18) apresentou $R^2 = 0,833$, R^2 ajustado = 0,716 e p = 0,0032. Em JAG-06 (Itaiçaba), os modelos apresentaram R^2 ajustado negativo para os três parâmetros. Esses indicadores descrevem o ajuste aos dados empregados e não substituem a avaliação de desempenho preditivo em amostras independentes.

Tabela 15 – Regressão múltipla por ponto com índices espectrais

Ponto	Parâmetro	N	R^2	R^2 ajustado	p-valor
JAG-06	Cor verdadeira	20	0,311	-0,091	0,6202
JAG-06	Turbidez	20	0,362	-0,010	0,4917
JAG-06	Sólidos totais	19	0,056	-0,545	0,9977
JAG-14	Cor verdadeira	19	0,147	-0,396	0,9533
JAG-14	Turbidez	19	0,348	-0,067	0,5780
JAG-14	Sólidos totais	18	0,833	0,716	0,0032
JAG-16	Cor verdadeira	17	0,755	0,565	0,0296
JAG-16	Turbidez	17	0,641	0,362	0,1220

Ponto	Parâmetro	N	R^2	R^2 ajustado	p-valor
JAG-16	Sólidos totais	16	0,792	0,610	0,0279

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As diferenças de R^2 entre os ajustes gerais e os ajustes por ponto são resultados observados na amostra estudada. Embora os trechos apresentem condições ambientais distintas, os modelos analisados não isolam a contribuição da largura do canal, do fluxo ou da influência das margens para explicar essas diferenças.

A análise por ponto identificou maiores valores de R^2 em combinações específicas: sólidos totais em JAG-14 e cor verdadeira e sólidos totais em JAG-16. Os resultados indicam melhor ajuste aos registros empregados, sem demonstração de maior precisão para observações independentes.

Os modelos ajustados separadamente por ponto apresentaram, em alguns casos, maiores valores de R^2 do que os modelos gerais. Essa constatação descreve o ajuste aos registros utilizados, mas não permite concluir, por si só, que a redução da heterogeneidade ambiental tenha sido a causa da diferença ou que os modelos tenham maior capacidade preditiva fora da amostra.

Apesar dos valores elevados de R^2 observados em alguns modelos por ponto, esses resultados devem ser interpretados com cautela. O número reduzido de observações em cada trecho, associado à quantidade de variáveis independentes utilizadas, aumenta o risco de ajuste excessivo aos dados da amostra. Isso significa que o modelo pode representar bem os registros analisados, mas apresentar baixa capacidade de generalização para novas observações.

Na amostra analisada, alguns modelos múltiplos apresentaram R^2 superior ao das regressões simples, especialmente com razões e índices espectrais. Entretanto, a comparação deve considerar o número de variáveis e o R^2 ajustado; os resultados não estabelecem desempenho preditivo suficiente para adoção operacional.

Os melhores resultados por ponto sugerem que a modelagem espectral pode ser mais promissora quando considera as particularidades locais de cada trecho monitorado. Esse comportamento é coerente com as características de ambientes lóticos, nos quais a largura do canal, a influência das margens, a dinâmica de fluxo, a presença de sedimentos e as condições locais de uso do solo podem interferir na resposta espectral registrada pelo sensor.

Dessa forma, os modelos de regressão avaliados nesta pesquisa devem ser compreendidos como uma etapa exploratória da aplicação do sensoriamento remoto ao monitoramento da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe. Para o desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos, seria necessária a ampliação da base de dados, a redução

do número de variáveis independentes, a avaliação de métodos não lineares e a validação com dados independentes.

6.9. Síntese dos principais resultados

A integração dos dados de qualidade da água da COGERH com as imagens Sentinel-2/MSI resultou em uma base final de 56 registros válidos, correspondendo a 48,7% das campanhas inicialmente disponíveis. Essa base possibilitou a avaliação conjunta dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais com as informações espectrais extraídas das bandas B2, B3, B4, B8, SWIR1 e SWIR2, além das razões espectrais e índices normalizados calculados a partir dessas bandas.

As análises descritivas indicaram diferenças entre os pontos de monitoramento avaliados no baixo curso do rio Jaguaribe. O ponto JAG-14 apresentou os menores valores médios de turbidez e sólidos totais, enquanto JAG-16 apresentou os maiores valores médios de turbidez e cor verdadeira. O ponto JAG-06, por sua vez, apresentou os maiores valores médios de sólidos totais. Esses resultados evidenciam a heterogeneidade espacial do trecho estudado e indicam que cada ponto de monitoramento apresenta condições locais próprias, possivelmente associadas à dinâmica de fluxo, às características do canal, à influência de margens, ao uso do entorno e à presença de materiais em suspensão.

As correlações entre os parâmetros de qualidade da água e as bandas individuais Sentinel-2/MSI foram predominantemente fracas, indicando baixa capacidade explicativa do uso isolado das reflectâncias. Entre as bandas avaliadas, observaram-se associações discretas, especialmente para sólidos totais com as bandas SWIR1 e SWIR2. No entanto, os coeficientes obtidos não foram suficientes para caracterizar relações lineares robustas entre as bandas individuais e os parâmetros analisados.

A avaliação das razões espectrais e dos índices normalizados demonstrou melhora relativa em comparação às bandas isoladas. A razão B4/B3 destacou-se como a variável espectral com melhor desempenho para os três parâmetros avaliados, seguida pelo índice normalizado vermelho-verde, representado por (B4-B3)/(B4+B3). Esse resultado indica que o contraste entre as bandas do vermelho e do verde apresentou maior sensibilidade às variações ópticas observadas na água, especialmente em relação à cor verdadeira, à turbidez e aos sólidos totais.

Os modelos exploratórios de regressão confirmaram as limitações observadas nas análises de correlação. As regressões simples apresentaram baixa capacidade explicativa,

enquanto as regressões múltiplas gerais demonstraram melhoria discreta, sobretudo quando utilizadas razões e índices espectrais. Ainda assim, os modelos gerais, considerando todos os pontos de monitoramento em conjunto, não apresentaram desempenho suficiente para serem considerados modelos preditivos robustos.

Nos modelos ajustados separadamente por ponto, foram observados valores mais elevados de R^2 em JAG-14 para sólidos totais e em JAG-16 para cor verdadeira e sólidos totais. O tamanho reduzido das amostras por ponto e a ausência de validação independente impedem interpretar esses ajustes como comprovação de superioridade preditiva de modelos locais.

De modo geral, os resultados indicam que o uso direto das bandas individuais do Sentinel-2/MSI apresentou limitações para representar os parâmetros de qualidade da água avaliados. No entanto, a utilização de razões espectrais, especialmente B4/B3, o índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3) e a análise segmentada por ponto demonstraram potencial para investigar relações entre a qualidade da água e a resposta espectral em ambiente lótico.

Em síntese, a base integrada permitiu identificar associações espectrais predominantemente fracas nos modelos gerais e ajustes mais elevados em alguns modelos específicos por ponto. Os limites de interpretação e as implicações para o monitoramento complementar são discutidos no Capítulo 7.

7. DISCUSSÃO

A aplicação do sensoriamento remoto à avaliação da qualidade da água apresenta avanços importantes na literatura recente, especialmente em lagos e reservatórios. Em rios, entretanto, essa aplicação envolve desafios metodológicos adicionais, relacionados à variabilidade temporal da água, à dinâmica de fluxo, à largura do canal, à influência das margens, à mistura espectral e à compatibilização entre dados de campo e imagens orbitais.

Nesse contexto, os resultados obtidos no baixo curso do rio Jaguaribe devem ser interpretados como uma avaliação exploratória da viabilidade do Sentinel-2/MSI em ambiente lótico semiárido. A discussão a seguir compara os achados desta pesquisa com estudos nacionais e internacionais, considerando as diferenças entre ambientes lênticos e lóticos, o comportamento das variáveis espectrais avaliadas, o desempenho dos modelos exploratórios e o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta complementar ao monitoramento convencional da qualidade da água.

7.1. Aplicações consolidadas em reservatórios e lagos

O uso do sensoriamento remoto para avaliação da qualidade da água apresenta resultados mais consolidados em ambientes lênticos. Esses ambientes tendem a apresentar maior estabilidade espacial da lâmina d'água, menor influência imediata do fluxo longitudinal e maior extensão superficial contínua, condições que favorecem a extração de pixels predominantemente aquáticos e a associação entre dados orbitais e parâmetros medidos em campo. Essa característica ajuda a explicar por que grande parte da literatura sobre sensoriamento remoto aplicado à qualidade da água se concentra em reservatórios e lagos.

Pizani, Maillard e Amorim (2022), ao revisarem aplicações de sensoriamento remoto em ambientes lênticos, destacam que esses sistemas têm sido amplamente utilizados para estimativa de parâmetros como turbidez, clorofila-a, transparência da água e material particulado. De forma semelhante, Pizani (2023), ao desenvolver modelos para turbidez, transparência e clorofila-a no reservatório de Três Marias com dados Sentinel-2, reforça que reservatórios apresentam condições favoráveis para o ajuste de modelos espectrais, especialmente quando há disponibilidade de séries temporais e dados de campo compatibilizados.

Essa tendência também é observada em estudos recentes desenvolvidos em diferentes contextos brasileiros. Magalhães *et al*. (2022), Pompêo e Moschini-Carlos (2022) e Assunção (2023) demonstram o potencial das imagens orbitais para caracterizar variações espaciais e temporais da qualidade da água em lagos, reservatórios e ambientes urbanos. Em comum, esses estudos indicam que a estabilidade relativa da lâmina d'água e a maior área superficial dos corpos hídricos favorecem a identificação de padrões espectrais associados à turbidez, à clorofila-a, ao material em suspensão e à transparência da água.

No contexto do semiárido brasileiro, Costa (2024) e Costa *et al*. (2025) reforçam a importância do sensoriamento remoto para avaliação da qualidade da água em reservatórios. Esses estudos são relevantes para a presente pesquisa porque tratam de ambientes inseridos em condições climáticas mais próximas ao semiárido nordestino.

Outras dissertações e teses recentes também confirmam a consolidação das aplicações em ambientes lênticos. Fernandes (2024), ao avaliar a dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no lago de Balbina, evidenciou a utilidade do sensoriamento remoto para acompanhar variações associadas a sedimentos suspensos em ambiente amazônico. Marinho (2021), em estudo no Lago Paranoá, e Oliveira (2021), em pesquisa na Represa Billings, também demonstraram o potencial de imagens multiespectrais para estimar parâmetros de

qualidade da água em corpos hídricos urbanos. Esses trabalhos reforçam que lagos e reservatórios oferecem condições mais favoráveis à modelagem espectral.

Estudos internacionais recentes seguem a mesma tendência. Meng, Zhang e Zheng (2022), ao utilizarem imagens Landsat 8/9 e Sentinel-2/MSI em reservatório, demonstraram que a integração de dados orbitais e modelos empíricos pode contribuir para estimativas de parâmetros como turbidez e clorofila-a. Mamun, Hasan e An (2024), por sua vez, aplicaram dados Sentinel-2 e Landsat-8 associados a métodos de aprendizado de máquina para estimativa de parâmetros de qualidade da água em reservatórios, obtendo resultados que reforçam o potencial dessas abordagens em ambientes de maior estabilidade hidrodinâmica.

Esses estudos ajudam a situar a presente pesquisa dentro de uma produção recente que demonstra o potencial do sensoriamento remoto para avaliação da qualidade da água em ambientes lênticos. O uso de bandas, razões espectrais, índices normalizados e modelos estatísticos em lagos e reservatórios fornece uma base metodológica importante para a análise desenvolvida no baixo curso do rio Jaguaribe.

Entretanto, como a presente pesquisa foi desenvolvida em ambiente lótico, os resultados desses trabalhos constituem referências metodológicas, e não parâmetros diretos de desempenho. A comparação exige considerar as particularidades de cada corpo hídrico, a amostragem, os parâmetros investigados e os procedimentos de validação.

7.2. Desafios da aplicação em rios

A aplicação do sensoriamento remoto em rios apresenta desafios adicionais quando comparada a lagos e reservatórios. Em sistemas lóticos, a água está em constante movimento e pode sofrer alterações rápidas nas condições físicas, químicas e ópticas em curtos intervalos de tempo. Essa dinâmica torna mais sensível a compatibilização entre a data da coleta em campo e a data da imagem orbital, especialmente quando ocorrem variações hidrológicas ou contribuições difusas entre a campanha de monitoramento e a passagem do satélite.

No contexto de ambientes fluviais, Virdis *et al*. (2022) demonstraram o potencial do Sentinel-2/MSI para avaliação da qualidade da água em rio tropical, indicando que imagens orbitais podem contribuir para o acompanhamento de parâmetros em sistemas lóticos. Entretanto, os próprios resultados desse tipo de aplicação evidenciam que a resposta espectral em rios depende fortemente das condições locais e interferências das margens. De forma semelhante, Salas *et al*. (2022), ao aplicarem imagens Sentinel-2 e algoritmos de aprendizado de máquina no Little Miami River, reforçam que o uso de sensoriamento remoto em rios pode

ser promissor, mas exige métodos capazes de lidar com relações complexas entre reflectância orbital e parâmetros de qualidade da água.

Nesta pesquisa, a janela de até três dias antes ou depois da coleta *in situ* foi adotada para ampliar o número de pares válidos entre as campanhas da COGERH e as imagens Sentinel-2/MSI. Esse procedimento, embora tenha favorecido a formação da base integrada, introduz incerteza temporal, pois as condições da água podem se modificar no intervalo entre a observação de campo e a aquisição orbital. A análise não isolou o efeito do desfasamento temporal sobre os coeficientes obtidos; por isso, não é possível quantificar sua contribuição específica para as associações observadas. Estudos futuros poderão comparar o desempenho de pareamentos no mesmo dia e em janelas sucessivamente mais amplas, desde que haja quantidade suficiente de observações.

Outro fator relevante é a largura do corpo hídrico em relação à resolução espacial do sensor. Diehl *et al*. (2024), ao avaliarem o uso de Sentinel-2 para estimativa de sólidos suspensos totais em pequenos rios, reforçam que a largura do canal é uma variável crítica para aplicações em sistemas fluviais, pois influencia diretamente a possibilidade de obtenção de pixels predominantemente aquáticos.

Esse aspecto é especialmente relevante no baixo curso do rio Jaguaribe, onde a largura da lâmina d'água variou entre os pontos de monitoramento. Em JAG-14, em Quixeré, a largura média informada foi inferior a 40 m. Diante da resolução espacial das bandas utilizadas, essa dimensão aumenta a preocupação com pixels mistos e com a contribuição espectral de margens e superfícies adjacentes. A largura, por si só, não permite determinar a proporção efetiva de contaminação em cada observação, que dependeria de verificação específica da posição dos pixels e das condições de aquisição.

Além da mistura espectral, o efeito de adjacência também representa uma limitação importante em corpos hídricos estreitos. Paulino *et al*. (2022), ao avaliarem correções de adjacência em águas interiores com imagens Sentinel-2/MSI, destacam que a reflectância da água pode ser influenciada por alvos terrestres próximos, especialmente quando há forte contraste entre a superfície aquática e o entorno. Essa condição é relevante para o rio Jaguaribe, principalmente nos trechos em que a lâmina d'água é estreita ou onde há presença de vegetação ripária, solo exposto e margens arenosas próximas ao ponto de extração espectral.

Brito *et al*. (2022), ao avaliarem o Rio Doce por meio de imagens Landsat 8, demonstraram o potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento de parâmetros visíveis de qualidade da água em ambiente lótico. No entanto, esse estudo foi desenvolvido em um contexto de forte alteração ambiental, associado ao rompimento da barragem de Fundão,

que provocou mudanças expressivas na turbidez e na transparência da água. Nessa situação, o contraste espectral gerado pela alteração na qualidade da água foi mais intenso, favorecendo sua detecção por sensores orbitais.

O contexto do rio Jaguaribe não é diretamente equivalente ao de estudos que analisaram perturbações ambientais intensas. A base desta pesquisa provém de campanhas regulares de monitoramento e não foi organizada para examinar a resposta espectral a um evento extremo. Por isso, diferenças nos coeficientes entre estudos não podem ser atribuídas apenas à intensidade das alterações na qualidade da água, já que também variam os métodos, os sensores, os locais e as amostras.

Maeda *et al*. (2024), ao avaliarem a qualidade da água no rio Uberaba com imagens Sentinel-2 e regressão Random Forest, também demonstraram resultados positivos para estimativa de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico. Esse estudo reforça o potencial do sensoriamento remoto em rios, mas evidencia que a resposta espectral nesses ambientes pode exigir abordagens metodológicas capazes de lidar com relações não lineares e com maior variabilidade espacial e temporal.

No baixo curso do rio Jaguaribe, essas limitações se tornam relevantes porque os pontos monitorados apresentam diferenças quanto à largura da lâmina d'água, à influência das margens, à mistura espectral e às condições hidrológicas locais. Assim, a aplicação do Sentinel-2/MSI em ambiente lótico semiárido exige interpretação cautelosa, especialmente quando os dados orbitais são comparados a coletas pontuais realizadas em campo.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa devem ser interpretados à luz das limitações dos sistemas fluviais. A aplicação do sensoriamento remoto em rios depende não apenas das propriedades ópticas da água, mas também da resolução espacial do sensor, da compatibilização temporal entre imagem e coleta, da largura do canal, da influência do entorno e da variabilidade hidrossedimentológica do trecho analisado.

7.3. Interpretação dos resultados no rio Jaguaribe

Os resultados obtidos no baixo curso do rio Jaguaribe revelaram associações predominantemente fracas entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis espectrais Sentinel-2/MSI na análise conjunta dos três pontos. As bandas examinadas, tomadas isoladamente, não apresentaram relações suficientemente consistentes para sustentar estimativas diretas dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais nessa base amostral.

Esse resultado difere parcialmente de estudos em que parâmetros opticamente ativos apresentam respostas espectrais mais evidentes. Nechad, Ruddick e Park (2010), por exemplo, demonstram a importância das faixas do vermelho e do infravermelho próximo para estimativas relacionadas à turbidez e à matéria particulada em suspensão. De forma semelhante, Hossain, Mathias e Blanton (2021) destacam o uso de combinações espectrais envolvendo bandas do visível para representar alterações ópticas associadas à turbidez e aos sólidos suspensos. Jiang *et al*. (2023), ao trabalharem com estimativa de sólidos suspensos totais por Sentinel-2/MSI em águas interiores e costeiras, também reforçam a relevância da resposta espectral associada ao material particulado presente na água.

No rio Jaguaribe, as relações observadas foram de baixa intensidade. Uma interpretação possível é que parte da variabilidade esteja associada à dinâmica temporal dos rios, às diferentes larguras dos trechos, à influência de margens, à mistura espectral e à composição dos constituintes presentes na água. Entretanto, essas hipóteses não foram testadas individualmente nesta pesquisa e, portanto, não podem ser apresentadas como causas demonstradas da baixa correlação.

A razão B4/B3 apresentou o melhor desempenho relativo entre as variáveis espectrais examinadas para os três parâmetros, seguida pelo índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3). Isso sugere que o contraste entre vermelho e verde merece investigação adicional. Todavia, os coeficientes de correlação permaneceram de magnitude limitada, de modo que o melhor desempenho comparativo não deve ser confundido com precisão suficiente para estimativas operacionais.

Nesse sentido, Ferreira (2021), ao estudar o monitoramento da clorofila-a por sensoriamento remoto em experimentos controlados, contribui para compreender que a resposta espectral da água pode ser influenciada por diferentes constituintes opticamente ativos. Embora a clorofila-a não seja um dos parâmetros centrais desta pesquisa, sua interação com turbidez, material em suspensão e coloração da água ajuda a explicar por que relações espectrais simples podem não representar de forma isolada os parâmetros avaliados no rio Jaguaribe.

Para os sólidos totais, as bandas SWIR1 e SWIR2 também apareceram entre as variáveis mais correlacionadas. Esse resultado pode estar associado à sensibilidade dessas faixas espectrais a materiais presentes na superfície, umidade e possíveis efeitos de mistura espectral. Contudo, sua interpretação deve ser cautelosa, pois as bandas SWIR do Sentinel-2 possuem resolução espacial de 20 m, inferior à das bandas B2, B3, B4 e B8.

A interpretação dos sólidos totais também exige cautela porque esse parâmetro reúne frações suspensas e dissolvidas. Enquanto os sólidos suspensos tendem a apresentar relação

mais direta com a turbidez e com o espalhamento da radiação na coluna d'água, as frações dissolvidas nem sempre produzem resposta espectral evidente nas bandas ópticas avaliadas. Assim, a baixa correlação observada para sólidos totais no conjunto geral da base pode estar associada à própria natureza do parâmetro, que não representa exclusivamente materiais opticamente detectáveis pelo sensor.

Souza (2022), ao relacionar uso e ocupação da terra com concentração de sólidos em suspensão em reservatório hidrelétrico, reforça que a presença de sólidos nos corpos hídricos pode estar associada a processos de transporte de sedimentos e contribuições do entorno. Embora o estudo tenha sido desenvolvido em ambiente lêntico, essa interpretação é relevante para o rio Jaguaribe, pois os pontos monitorados estão inseridos em trechos sujeitos a diferentes usos do solo e atividades produtivas. Dessa forma, a variação de sólidos totais no rio pode refletir não apenas a condição da água no ponto de coleta, mas também contribuições espaciais e temporais acumuladas ao longo do sistema fluvial.

A predominância de correlações fracas não demonstra ausência de resposta espectral dos constituintes da água. Mostra, mais precisamente, que as associações identificadas nesta base foram limitadas. Influências hidrológicas, temporais e espaciais são hipóteses pertinentes, mas não foram quantificadas separadamente.

O melhor desempenho relativo da razão B4/B3, do índice (B4-B3)/(B4+B3) e das bandas SWIR1 e SWIR2 para sólidos totais indica que algumas variáveis espectrais podem contribuir para a interpretação exploratória da qualidade da água. No entanto, esses resultados não sustentam estimativas diretas robustas para o conjunto geral da base, especialmente porque os três pontos de monitoramento apresentam características locais distintas.

Assim, os resultados do rio Jaguaribe reforçam que a resposta espectral da água em ambientes lóticos deve ser analisada com cautela e, preferencialmente, de forma segmentada por trecho. Essa interpretação prepara a discussão dos modelos exploratórios apresentada no item seguinte, no qual são avaliadas as diferenças entre os modelos gerais e os modelos ajustados por ponto de monitoramento.

7.4. Índices espectrais e modelos exploratórios de regressão

Nos dados analisados, algumas combinações espectrais apresentaram resultados relativos mais favoráveis do que bandas isoladas em análises específicas. A razão B4/B3 e o índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3) destacaram-se nas correlações, mas a magnitude das

associações permaneceu limitada. Esses indicadores devem, portanto, ser interpretados como variáveis exploratórias, e não como estimadores diretos já validados.

Nos modelos gerais, o ganho obtido com a combinação de variáveis espectrais foi limitado e não eliminou a baixa capacidade explicativa já evidenciada na seção 6.8. Assim, a distinção central para a interpretação dos ajustes não está apenas na escolha entre uma banda isolada ou um índice, mas na representatividade da base de dados e na possibilidade de que as relações espectrais variem entre os trechos amostrados.

O menor desempenho dos modelos gerais é compatível com a possibilidade de heterogeneidade espacial entre os trechos monitorados. Largura da lâmina d'água, condições hidrológicas e uso e ocupação do solo são fatores plausíveis de influência, mas sua contribuição para a diferença de ajuste entre os modelos não foi isolada estatisticamente. Assim, a heterogeneidade deve ser tratada como hipótese de interpretação e limitação metodológica, e não como explicação causal comprovada.

A comparação com estudos desenvolvidos em reservatórios ajuda a compreender essa diferença. Pizani (2023), ao desenvolver modelos de turbidez, transparência e clorofila-a no reservatório de Três Marias a partir de dados Sentinel-2, demonstrou o potencial das razões espectrais e dos modelos empíricos em ambiente lêntico. Silva (2025), ao avaliar a predição de sólidos dissolvidos totais, sólidos totais e turbidez no reservatório de Jaguara com dados Sentinel-2, também evidenciou a utilidade de combinações espectrais e de modelos mais robustos para estimativa de parâmetros de qualidade da água. Esses resultados reforçam que os reservatórios oferecem condições mais favoráveis à modelagem espectral.

De forma semelhante, Mamun, Hasan e An (2024), ao aplicarem dados Sentinel-2 e Landsat-8 associados a métodos de aprendizado de máquina em reservatórios, demonstraram que modelos não lineares podem ampliar a capacidade de estimativa de parâmetros de qualidade da água. Zhao *et al*. (2024), ao integrarem imagens Sentinel-2 com dados de estações automáticas de monitoramento, também reforçaram a importância de bases amostrais amplas e de abordagens metodológicas mais robustas para capturar relações complexas entre reflectância orbital e qualidade da água.

A literatura sobre aplicações de modelos em ambientes aquáticos fornece referências comparativas, mas não elimina as restrições identificadas nesta amostra. Para avançar de uma associação exploratória para uma estimativa confiável, serão necessários testes com maior cobertura amostral, avaliação de incertezas e validação com observações independentes.

Esse comportamento difere de estudos em ambientes lênticos, nos quais modelos espectrais tendem a apresentar maior estabilidade. Costa *et al*. (2025), ao avaliarem modelos de

estimativa de clorofila-a em reservatórios do semiárido brasileiro, reforçaram que reservatórios oferecem condições mais favoráveis à modelagem espectral, embora também apresentem desafios relacionados à sazonalidade, à variabilidade climática e às diferenças entre sistemas hídricos. Assim, mesmo em ambientes lênticos do semiárido, a definição de modelos generalizáveis exige cautela.

Os modelos ajustados por ponto apresentaram valores de R^2 mais elevados em algumas combinações, sobretudo para sólidos totais em JAG-14 e para cor verdadeira e sólidos totais em JAG-16. Trata-se de melhor ajuste dentro das amostras examinadas, o que não demonstra, por si só, maior capacidade preditiva em novos dados ou superioridade generalizável da modelagem por trecho.

Uma hipótese para a diferença de ajuste entre os modelos gerais e os específicos por ponto é a heterogeneidade espacial do ambiente estudado. Como os locais apresentam distintas características de largura, escoamento e ocupação do entorno, seu agrupamento pode reunir condições ópticas diversas. Ainda assim, os valores de R^2, isoladamente, não permitem atribuir a diferença observada a esses fatores; também é necessário considerar o tamanho das subamostras e a quantidade de preditores empregada.

No ponto JAG-14, em Quixeré, observou-se um dos maiores ajustes para sólidos totais, apesar de esse trecho apresentar a menor largura média estimada da lâmina d'água entre os locais analisados. Essa condição aumenta a possibilidade de mistura espectral com margens, bancos arenosos, solo exposto e vegetação adjacente. Portanto, o ajuste observado deve ser interpretado com cautela, sem atribuí-lo exclusivamente às propriedades ópticas da água ou à dinâmica hidrológica local.

Em JAG-16, em Jaguaruana, observaram-se ajustes mais elevados para cor verdadeira e sólidos totais nos modelos por ponto. Os dados descritivos também indicaram valores médios relativamente elevados de alguns parâmetros nesse trecho. Essas constatações podem orientar hipóteses sobre particularidades ópticas locais, mas não demonstram a existência de uma assinatura espectral estável nem maior capacidade de previsão para novas campanhas.

Em JAG-06, localizado em Itaiçaba, os ajustes foram inferiores aos destaques observados nos outros dois pontos, embora a largura média estimada da lâmina d'água tenha sido maior. Esse contraste indica que a largura, isoladamente, não permite antecipar o ajuste dos modelos. Possíveis contribuições hidrológicas e sedimentológicas acumuladas nesse trecho a jusante exigiriam dados e testes específicos para serem avaliadas.

Maeda *et al*. (2024) demonstraram que abordagens não lineares podem melhorar a estimativa de parâmetros de qualidade da água em sistemas fluviais. Essa comparação é

relevante porque indica que as relações entre reflectância orbital e qualidade da água em rios podem não ser adequadamente representadas apenas por modelos lineares. Assim, os resultados do rio Jaguaribe sugerem que métodos não lineares podem ser testados em etapas futuras, especialmente com uma base de dados mais ampla e com validação independente.

Apesar dos bons ajustes observados em alguns modelos por ponto, esses resultados devem ser interpretados com cautela. Os tamanhos amostrais reduzidos nos ajustes destacados (n = 18 em JAG-14 para sólidos totais; n = 17 e n = 16 em JAG-16 para cor verdadeira e sólidos totais, respectivamente) aumentam o risco de ajuste excessivo, ou seja, de o modelo representar bem a amostra analisada, mas apresentar baixa capacidade de generalização para novos dados. Dessa forma, os modelos por ponto indicam potencial de investigação, mas ainda não podem ser considerados modelos definitivos de estimativa.

Em síntese, os índices espectrais e as regressões examinados revelam possibilidades de investigação, mas não demonstram precisão suficiente para estimativa operacional dos parâmetros avaliados. Os maiores valores de R^2 observados em alguns ajustes por ponto justificam aprofundar a comparação entre modelos locais e gerais, mediante ampliação das amostras, controle de complexidade e validação com dados independentes.

7.5. Potencial e limitações do Sentinel-2 para o monitoramento complementar da qualidade da água

Os resultados obtidos indicam que o Sentinel-2/MSI apresenta potencial como ferramenta complementar ao monitoramento convencional da qualidade da água, mas com limitações importantes para aplicação direta em rios. A predominância de correlações fracas, o desempenho limitado dos modelos gerais e a influência das características locais de cada trecho demonstram que o uso das imagens orbitais deve ser interpretado como apoio ao monitoramento, e não como substituto das análises realizadas em campo e laboratório.

Essa interpretação está de acordo com a literatura que trata o sensoriamento remoto como ferramenta auxiliar para ampliar a cobertura espacial e temporal das redes convencionais de monitoramento. Crioni (2024), ao avaliar aplicações do Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil, reforça que as imagens orbitais podem contribuir para o acompanhamento de corpos d’água, especialmente quando integradas a dados de campo. De forma semelhante, Oliveira (2021), ao estudar a Represa Billings, demonstra que o sensoriamento remoto orbital pode apoiar a estimativa e o acompanhamento de parâmetros de qualidade da água em mananciais urbanos, desde que os resultados sejam validados localmente.

No rio Jaguaribe, a contribuição mais imediata da abordagem está em testar a compatibilização de registros institucionais com dados orbitais e em identificar condições que merecem investigação adicional. O uso para detectar tendências, acompanhar períodos críticos ou orientar campanhas constitui possibilidade de aplicação futura, condicionada à ampliação das séries, à validação independente e à demonstração de desempenho adequado às decisões de gestão.

Bartz (2021), ao aplicar sensoriamento remoto à análise de parâmetros de qualidade da água em sistemas de piscicultura, também reforça o potencial prático dessas técnicas em contextos de gestão e produção. Embora esse tipo de aplicação apresente características distintas do ambiente lótico analisado nesta pesquisa, o estudo evidencia que imagens orbitais podem auxiliar na interpretação de condições ambientais quando utilizadas de forma integrada a informações locais e dados obtidos em campo.

No contexto da gestão ambiental e dos recursos hídricos, Marques, Mohamed e Feitosa (2025) demonstram que a integração entre imagens Sentinel-2, Google Earth Engine e algoritmos de aprendizado de máquina pode ampliar a capacidade de monitoramento ambiental associado ao ODS 6. Embora esse estudo não estime diretamente os mesmos parâmetros físico-químicos avaliados nesta pesquisa, ele reforça a importância de plataformas em nuvem e métodos computacionais para ampliar a análise espacial e temporal de áreas relacionadas à água, saneamento e conservação ambiental.

A pesquisa avaliou a integração de registros institucionais de qualidade da água da COGERH com observações Sentinel-2/MSI no baixo curso do rio Jaguaribe. As análises com bandas, razões espectrais, índices normalizados e regressões por ponto forneceram evidências exploratórias, mas os ajustes observados não autorizam inferir capacidade de estimativa para campanhas ainda não analisadas.

Portanto, nesta etapa, o Sentinel-2/MSI deve ser entendido como fonte complementar de informação para análise exploratória, e não como substituto da rede convencional de qualidade da água. A utilização operacional para priorização de trechos, identificação de mudanças ou apoio a decisões dependerá de procedimentos específicos de validação e controle de incertezas.

Para a gestão hídrica, a principal contribuição aplicada é explicitar possibilidades e limites de utilização conjunta de dados orbitais e medições *in situ*. As recomendações técnicas decorrentes dessa avaliação foram organizadas em uma minuta de nota técnica, cujo uso institucional depende de apreciação e validação apropriadas.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa avaliou, em caráter exploratório, o potencial das imagens Sentinel-2/MSI como fonte complementar ao monitoramento da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará. A comparação entre dados orbitais e registros *in situ* de cor verdadeira, turbidez e sólidos totais revelou limitações para estabelecer relações robustas e generalizáveis nas condições amostrais e metodológicas adotadas.

Na análise conjunta dos pontos JAG-14, JAG-16 e JAG-06, predominaram correlações fracas entre os parâmetros de qualidade da água e as variáveis espectrais. Esse resultado limita a interpretação dos ajustes gerais e recomenda cautela em sua transferência para outros períodos ou trechos do rio. A variabilidade temporal, a largura da lâmina d'água e a possível influência das margens são fatores relevantes, mas sua contribuição individual não foi quantificada nesta pesquisa.

As bandas individuais apresentaram associações limitadas com os parâmetros estudados. A razão B4/B3 e o índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3) alcançaram desempenho relativo superior em algumas comparações, sem demonstrar, contudo, capacidade suficiente para fundamentar estimativas operacionais independentes das medições de campo.

Os modelos gerais de regressão apresentaram capacidade explicativa limitada. Entre os ajustes por ponto, o modelo de sólidos totais em JAG-14 (n = 18) apresentou $R^2 = 0,833$ e R^2 ajustado = 0,716. Em JAG-16, os modelos de cor verdadeira (n = 17) e sólidos totais (n = 16) apresentaram, respectivamente, $R^2 = 0,755$ e 0,792 e R^2 ajustado = 0,565 e 0,610. Esses indicadores descrevem o ajuste aos registros disponíveis, não a precisão de previsões independentes. Os tamanhos amostrais e a ausência de validação externa impedem concluir que a modelagem por ponto seja, de forma geral, superior à modelagem conjunta.

A janela de compatibilização temporal de até ±3 dias, a distribuição descontínua das observações e a resolução espacial do sensor em trechos fluviais estreitos constituem limitações metodológicas importantes. Como seus efeitos não foram isolados por testes específicos, não é possível atribuir a qualquer um desses fatores, individualmente, o desempenho observado nas regressões.

Conclui-se que, nas condições estudadas, o Sentinel-2/MSI oferece possibilidades de uso complementar e exploratório, mas não substitui o monitoramento convencional conduzido pela COGERH. A incorporação das imagens a rotinas de acompanhamento ou de apoio à decisão requer ampliação da base, procedimentos reprodutíveis de controle de qualidade e avaliação do desempenho em observações independentes.

Como encaminhamentos diretamente relacionados às limitações identificadas, recomenda-se ampliar e equilibrar a amostragem entre pontos e estações; avaliar imagens mais próximas das datas de coleta; examinar efeitos de pixels mistos e da adjacência das margens; e incluir, quando disponíveis, informações de vazão e precipitação antecedente. A comparação de modelos locais e gerais deve considerar a complexidade dos ajustes e utilizar validação com dados independentes antes de qualquer aplicação operacional.

Como produto técnico-aplicado vinculado ao mestrado profissional, foi elaborada uma minuta de nota técnica com orientações para a integração de dados *in situ* e imagens Sentinel-2/MSI. O documento reúne recomendações derivadas da pesquisa e destina-se à apreciação técnica, sem representar protocolo operacional previamente validado ou adotado pela instituição.

REFERÊNCIAS

ABERS, Rebecca Neaera; KECK, Margaret E. **Autoridade prática: ação criativa e mudança institucional na política das águas do Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos**. Brasília, DF: ANA, 2011. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, v. 3).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2024. 154 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/106160. Acesso em: 19 fev. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil**). O comitê de bacia hidrográfica: o que é e o que faz?** Brasília, DF: ANA, 2011. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, v. 1).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília, DF: ANA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **O Qualiágua no estado do Ceará**. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/qualidade-da-agua/programa-qualiagua/ce. Acesso em: 10 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório-síntese do Progestão – Ciclo 2: Estado do Ceará. Brasília, DF: ANA, 2024**. Disponível em: https://progestao.ana.gov.br/mapa/ce/progestao-2/progestao-ceara.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

ANSARI, Mohsen; WU, Yulun; KNUDBY, Anders. **Assessing the impact of T-Mart adjacency effect correction on turbidity retrieval from Landsat 8/9 and Sentinel-2 imagery: case study, St. Lawrence River, Canada**. Remote Sensing, Basel, v. 18, n. 1, artigo 127, 2026. DOI: 10.3390/rs18010127. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/18/1/127. Acesso em: 10 jul. 2026.

ARAÚJO, Sergiano de Lima. **A carcinicultura em questão**. 2009. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: https://www.uece.br/wp-content/uploads/sites/60/2009/10/sergiano_araujo_dissertacao.pdf. Acesso em: 26 fev. 2026.

ARIAS-RODRIGUEZ, Leonardo F.; DUAN, Zheng; DÍAZ-TORRES, José de Jesús; BASILIO HAZAS, Mónica; HUANG, Jingshui; KUMAR, Bapitha Udhaya; TUO, Ye; DISSE, Markus. **Integration of remote sensing and Mexican water quality monitoring system using an Extreme Learning Machine**. Sensors, v. 21, n. 12, 4118, 2021. DOI: 10.3390/s21124118.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Baixo Jaguaribe**. Fortaleza: Assembleia Legislativa do Estado do Ceará, 2018.

ASSIS, Aroldo Vidal de *et al.* **Compreensão dos processos erosivos acelerados nos terraços fluviais semiáridos do Baixo Jaguaribe - Ceará através da análise de uso/ocupação da terra**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 17, p. 366-393, 2024.

ASSUNÇÃO, Alexandre Flávio. **Uso do sensoriamento remoto para avaliação da dinâmica espaço-temporal de parâmetros de qualidade da água de um reservatório urbano**. 2023. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/items/0b635372-1078-4d6e-934f-ea5cd09364f8. Acesso em: 26 fev. 2026.

AVIZ, Matheus Dias de *et al.* ***Sensoriamento remoto como ferramenta da estimativa do estado trófico de lago urbano na Amazônia (Belém-PA)***. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 4, p. 95-107, 2022. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0009. Disponível em: https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0009. Acesso em: 26 fev. 2026.

BARBOSA, Claudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; MARTINS, Vitor Siqueira. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

BARTZ, Rafael Luis. **Sensoriamento remoto para análise de parâmetros de qualidade da água aplicado à piscicultura**. 2021. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Rural Sustentável) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.

BRAGA, Benedito *et al.* **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRITO, Higor Costa de; VASCONCELOS, Rochele Sheila; RUFINO, Iana Alexandra Alves; BRITO, Yáscara Maia Araújo de. **Uso de sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no Rio Doce, Minas Gerais, Brasil**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 23, n. 90, p. 108-119, 2022. DOI: 10.14393/RCG239060922.

CABALLERO, Cassia Brocca *et al.* **Predictive model for monitoring water turbidity in a subtropical lagoon using Sentinel-2A/B MSI images**. RBRH, v. 28, e5, 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbrh/a/nRsrtGMBwy7f53vhtQbTH5d/. DOI: 10.1590/2318-0331.282320220097.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMPOS, José Nilson Bezerra. **Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 28, n. 82, p. 65-88, 2014.

CEARÁ. Lei nº 11.996, de 24 de julho de 1992. **Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos**. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 1992.

CEARÁ. Lei nº 12.217, de 18 de novembro de 1993. **Cria a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH e dá outras providências**. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 1993.

CEARÁ. Lei nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH**. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 2010.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Plano de ações estratégicas de recursos hídricos do Ceará. Fortaleza: SRH, 2018. Disponível em: https://www.srh.ce.gov.br/plano-de-acoes-estrategicas-de-recursos-hidricos-do-ceara-pae-rh/. Acesso em: 22 out. 2026.

CHAVES, Luiz Carlos Gomes; LOPES, Fernando Bezerra; MAIA, Anthony Rafael Soares; MEIRELES, Ana Célia Maia; ANDRADE, Eunice Maia de. **Water quality and anthropogenic impact in the watersheds of service reservoirs in the Brazilian semi-arid region**. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 50, n. 2, p. 223-233, 2019. DOI: 10.5935/1806-6690.20190026.

CID, Daniel Antonio Camelo; REIS, Gabriela de Azevedo; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. **Análise temporal da evolução de áreas ocupadas por tanques de carcinicultura no município de Jaguaruana durante a grande seca de 2012 a 2017**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 14., 2018, Maceió. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2018.

CIRILO, José Almir. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (Ceará**). Diagnóstico da Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe: Planos de Recursos Hídricos das Regiões Hidrográficas do Ceará: versão final**. Fortaleza: COGERH, 2023a. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/PRODUTOS%20PLANOS%20FINALIZADOS/DIAGN%C3%93STICO/DIAGN%C3%93STICO%20BAIXO%20JAGUARIBE%20VERS%C3%83O%20FINAL.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (Ceará). **Gestão participativa**. Fortaleza: COGERH, [s. d.]. Disponível em: https://www.cogerh.com.br/gestao-participativa/. Acesso em: 22 out. 2026.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (Ceará). **Prognóstico da Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe: Planos de Recursos Hídricos das Regiões**

Hidrográficas do Ceará: versão final. Fortaleza: COGERH, 2023b. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2023/04/PROGN%C3%93STICO-BAIXO-JAGUARIBE-VERS%C3%83O-FINAL.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Síntese do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe**. Fortaleza: COGERH, 2021. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2021/07/9.-S%C3%8DNTESE-DO-PLANO-DO-BAIXO-JAGUARIBE.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

COSTA, Laisa Daiana Alcântara. **Avaliação da eficiência de modelos de estimativa de clorofila-a por sensoriamento remoto em reservatórios do semiárido brasileiro**. 2024. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

COSTA, Laisa Daiana Alcântara; SILVA, Maycon Breno Macena da; MEDEIROS, Carlinda Railly; CUNHA, John Elton de Brito Leite. **Avaliação da eficiência de modelos de estimativa de clorofila-a por sensoriamento remoto em reservatórios do semiárido brasileiro**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 18, n. 2, p. 1263-1307, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1263-1307.

CRIONI, Pedro Luiz Becaro; TERAMOTO, Elias Hideo; CHANG, Hung Kiang. Monitoring river turbidity after a mine tailing dam failure using an empirical model derived from Sentinel-2 imagery. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 95, n. 1, e20220177, 2023. DOI: 10.1590/0001-3765202320220177.

CRIONI, Pedro Luiz Becaro. **Aplicação do sensoriamento remoto com imagens do satélite Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil**. 2024. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2024.

CUNHA, Mário de Jesus *et al.* **A Inteligência Artificial na produção científica: uma análise da literatura sobre o uso do ChatGPT na pesquisa acadêmica**. Interference: A Journal of Audio Culture, v. 12, n. 1, p. 468-482, 2026.

DIAS, Eric Mateus Soares; TEIXEIRA, Rylanneive Leonardo Pontes; PESSOA, Zoraide Souza. **Mudanças climáticas e capacidade adaptativa na gestão hídrica do semiárido do Rio Grande do Norte**. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 28, 2025. DOI: 10.1590/1809-4422asoc01972vu28L4AO.

DIEHL, Rebecca M.; UNDERWOOD, Kristen L.; WATT, Robert; HAMSHAW, Scott D.; PAHLEVAN, Nima. **Evaluating opportunities for broad-scale remote sensing of total suspended solids on small rivers.** Remote Sensing Applications: Society and Environment, Amsterdam, v. 35, artigo 101234, 2024. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101234. Disponível em: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/66528. Acesso em: 10 jul. 2026.

DRUSCH, Matthias *et al.* **Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services**. Remote Sensing of Environment, v. 120, p. 25-36, 2012.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-2: metadata summary. Frascati: ESA/ESRIN, 2017. Disponível em:

https://catalog.maap.eo.esa.int/catalogue/collections/series/items/EOP%3AESA%3ASentinel-2?httpAccept=text%2Fhtml. Acesso em: 22 out. 2026.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FEITOZA, Vítor Soares. **Proposição de estações virtuais de clorofila-a para a Lagoa da Pampulha com apoio de dados *in situ* e sensoriamento remoto**. 2022. 140 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua) – Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, 2022.

FERNANDES, Cristiane Nunes. **Dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM**. 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024.

FERNANDES, Jaiane de Freitas; CAVALCANTE, Francisco Lucas Pacheco; PEREIRA, Áquila Priscila Diógenes; RODRIGUES, Luesley do Carmo; SANTOS, Luana Maria de Lima; ALVES FILHO, João Garcia; NUNES JUNIOR, Francisco Holanda. **Análise da qualidade da água do rio Jaguaribe, em um trecho situado no município de Jaguaribe, Ceará, Brasil**. Semina: Ciências Biológicas e da Saúde, Londrina, v. 40, n. 2, p. 215-226, jul./dez. 2019. DOI: 10.5433/1679-0367.2019v40n2p215.

FERNANDES SILVA, F.; MOREIRA DOS SANTOS, J. **Aspectos ambientais da extração de argila em áreas de planície fluvial do Baixo Jaguaribe – CE**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 10., 2014, Manaus. Anais [...]. Manaus: SINAGEO, 2014. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2014/trabalhos/6/6-544-983.html. Acesso em: 22 out. 2026.

FERREIRA, Igor Cobelo. **Monitoramento da clorofila-a na água por sensoriamento remoto utilizando experimentos em mesocosmos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais do Cerrado) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2021.

FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de *et al*. **Impactos ambientais da carcinicultura de águas interiores**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 231-240, 2006.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FRASSON, Renato Prata de Moraes *et al.* **The impact of spatial resolution on inland water quality monitoring from space**. Environmental Research Communications, Bristol, v. 6, n. 10, artigo 101003, 2024. DOI: 10.1088/2515-7620/ad7dd8.

FRANÇA, Josefa Marciana Barbosa de; SILVA, Samíria Maria Oliveira da; MONTEIRO, Cláudio Maurício Gesteira; PAULINO, Walt Disney; CAPELO NETO, José. **Qualidade da água em um sistema de reservatórios em cascata: um estudo de caso no semiárido brasileiro**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 113-123, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/jTKxgZTPgTHLt7CRK5VwLVf/. Acesso em: 05 mar. 2026.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. **Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê**. Planta Daninha, Viçosa, v. 20, n. esp., p. 7–20, 2002. DOI: 10.1590/S0100-83582002000400002.

GARJULLI, Rosana. **Os recursos hídricos no semiárido**. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 38-39, 2003.

GONDIM, Rubens Sonso; TEIXEIRA, Adunias dos Santos; ROSA, Morsyleide de Freitas; FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de; PEREIRA, Paulo Miranda; SABINO, Kleber Vasconcelos. **Diagnóstico da agricultura irrigada no Baixo e Médio Jaguaribe**. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 35, n. 3, p. 424-430, 2004. DOI: 10.61673/ren.2004.792. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/792. Acesso em: 05 mar. 2026.

GORELICK, Noel *et al.* **Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone**. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18-27, 2017.

HOSSAIN, A. K. M. Azad; MATHIAS, Christopher; BLANTON, Robert. **Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using Landsat 8 satellite**. Remote Sensing, v. 13, n. 18, 3785, 2021. DOI: 10.3390/rs13183785.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: metas nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, DF: IPEA, 2018.

JACOBI, Pedro Roberto. **Participação na gestão ambiental no Brasil: os comitês de bacias hidrográficas e o desafio do fortalecimento de espaços públicos colegiados**. In: ALIMONDA, Héctor (org.). Los tormentos de la materia: aportes para una ecología política latinoamericana. Buenos Aires: CLACSO, 2006.

JACOBI, Pedro Roberto; FRACALANZA, Ana Paula. **Comitês de bacias hidrográficas no Brasil: desafios de fortalecimento da gestão compartilhada e participativa**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Curitiba, n. 11-12, p. 41-49, 2005.

JESUS, Ananda Fernanda de; SANTAREM SEGUNDO, José Eduardo**. O ChatGPT como auxiliar na condução de revisões sistemáticas da literatura: definições, desafios e potenciais aplicações**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 23., 2023, Aracaju. Anais [...] Aracaju: ANCIB, 2023.

JIANG, Dalin *et al*. **Estimating the concentration of total suspended solids in inland and coastal waters from Sentinel-2 MSI: a semi-analytical approach**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, v. 204, p. 362-377, 2023. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.09.020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271623002605. Acesso em: 10 jul. 2026.

LEONETI, Alexandre Bevilacqua; PRADO, Eliana Leão do; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI**. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 331-348, mar./abr. 2011.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. Campinas: Átomo, 2016.

LOPES, Fernando Bezerra *et al.* **Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 18, supl., p. S13-S19, 2014. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps13-s19.

LOPES, Fernando Bezerra. **Uso de sensoriamento remoto como suporte ao monitoramento da qualidade das águas superficiais da região semiárida do Brasil**. 2013. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LOPES, Fernando Bezerra; BARBOSA, Cláudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; CARVALHO, Lino Alves de Sousa; ANDRADE, Eunice Maia de; TEIXEIRA, Adunias dos Santos. **Modelling chlorophyll-a concentrations in a continental aquatic ecosystem of the Brazilian semi-arid region based on remote sensing**. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 52, n. 2, e20207210, 2021. DOI: 10.5935/1806-6690.20210028.

LORENZZETTI, João Antônio. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

LUCENA, Rodrigo Paiva de. O potencial de uso das jazidas de argila na planície fluvial do rio Jaguaribe em Russas-CE. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: https://www.uece.br/wp-content/uploads/sites/60/2020/02/rodrigo_paiva_de_lucena.pdf.

MACIEL, Daniel Andrade; BARBOSA, Claudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; FLORES JÚNIOR, Rogério; BEGLIOMINI, Felipe Nincao. **Water clarity in Brazilian water assessed using Sentinel-2 and machine learning methods**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, v. 182, p. 134–152, 2021. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.10.009.

MACHADO, Carlos José Saldanha. **Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios**. Ambiente & Sociedade, Campinas, v. 6, n. 2, p. 121-136, 2003.

MAEDA, Tatiane Carvalho; CARNEIRO, Franciele Morlin; SOUSA FILHO, José Waldir de; SHIRATSUCHI, Luciano Shozo; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer. **Green chemistry: using more sustainable techniques to estimate the water quality of the Uberaba River using orbital optical sensors**. Química Nova, v. 47, n. 10, p. 1-9, 2024. DOI: 10.21577/0100-4042.20240077.

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes; SOUZA, Ana Carolina Pereira de; MINOTI, Ricardo Tezini; GOMES, Lenora Nunes Ludolf. **Análise de parâmetros da qualidade da água no Lago Descoberto, Distrito Federal, por meio de imagens do satélite Sentinel-2B**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 3, p. 1463-1477, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.3.p1463-1477. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/252379. Acesso em: 05 mar. 2026.

MAIA, Maks Renan Rodrigues; LIMA, Dayane de Andrade; MACÊDO, Marcelo Lima; NUNES, Ana Bárbara de Araújo. **Avaliação do potencial do sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade de água em um reservatório do semiárido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2025. Anais eletrônicos [...]. ABES, 2025. Trabalho 1363. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/1363_tema_iv.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

MAJESKI, Julia Carolina Locatelli; TRINDADE, Larissa de Lima. **Lacunas de governança da água nas bacias hidrográficas da Vertente Atlântica do Estado de Santa Catarina**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 28, e20220231, 2023. DOI: 10.1590/S1413-415220220231.

MAMUN, Md; HASAN, Mahmudul; AN, Kwang-Guk. **Advancing reservoirs water quality parameters estimation using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data with machine learning approaches**. Ecological Informatics, v. 81, artigo 102608, 2024. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102608.

MARINHO, Cinthya de Souza. **Estimativa de clorofila-a por imagens multiespectrais de alta resolução espacial no Lago Paranoá – DF**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

MARQUES, Murilo de Carvalho; MOHAMED, Abdoulaye Aboubacari; FEITOSA, Paulo Henrique Assis. **Sustainable development goal 6 monitoring through statistical machine learning – Random Forest method**. Cleaner Production Letters, v. 8, artigo 100088, p. 1-11, 2025. DOI: 10.1016/j.clpl.2024.100088.

MCFEETERS, Stuart K. **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. DOI: 10.1080/01431169608948714.

MENDONÇA, Janaina Castro de; LOPES, Fernando Bezerra; ANDRADE, Eunice Maia de; LIMA, Francisco Josivan de Oliveira; SILVA, Fernanda Helena Oliveira da. **Monitoring water quality in a reservoir of the semi-arid region using remote sensing**. Journal of Experimental Agriculture International, London, v. 19, n. 1, p. 1-12, 2017. DOI: 10.9734/JEAI/2017/37913.

MENDONÇA, Janaina Castro de; LOPES, Fernando Bezerra; ANDRADE, Eunice Maia de; PRAXEDES, Carine Fernandes; LIMA, Francisco Josivan de Oliveira; SILVA, Fernanda Helena Oliveira da. **Qualitative vulnerability of the waters of a surface reservoir subjected to drought in a tropical semi-arid region**. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 54, p. 1-11, 2023.

MENG, Haobin; ZHANG, Jing; ZHENG, Zhen. **Retrieving inland reservoir water quality parameters using Landsat 8-9 OLI and Sentinel-2 MSI sensors with empirical multivariate regression**. International Journal of Environmental Research and Public Health, Basel, v. 19, n. 13, artigo 7725, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19137725. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/19/13/7725. Acesso em: 10 jul. 2026.

MILHOME, Maria Aparecida Liberato *et al.* ***Avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura do Baixo Jaguaribe, CE***. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 363-372, jul./set. 2009.

MORAIS, José Luiz; FADUL, Élvia; CERQUEIRA, Lucas Santos. **Limites e desafios na gestão de recursos hídricos por comitês de bacias hidrográficas: um estudo nos estados do Nordeste do Brasil**. REAd: Revista Eletrônica de Administração, Porto Alegre, v. 24, n. 1, p. 238-264, 2018.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, DF: Nações Unidas Brasil, 2026. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 12 mar. 2026.

NECHAD, B.; RUDDICK, K. G.; PARK, Y. **Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters**. Remote Sensing of Environment, v. 114, n. 4, p. 854-866, 2010.

NICOLLIER, Valérie; KIPERSTOK, Asher; BERNARDES, Marcos Eduardo Cordeiro. **A governança das águas no Brasil: qual o papel dos municípios?**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 37, n. 109, p. 279–302, 2023. DOI: 10.1590/s0103-4014.2023.37109.017.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. **Monitoramento de quantidade e qualidade da água por sensoriamento remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, Anderson de. **Sensoriamento remoto orbital para estimar parâmetros de qualidade da água: um estudo na Represa Billings, São Paulo, Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2021.

OLIVEIRA, Francisco Eder Rodrigues de; ROCHA, Antônio Mauricélio Duarte da; ALVES, Aline da Silva; SENA, Liana Nara Mendes de; OLIVEIRA, Magno Régis Barros de. **Levantamento dos impactos ambientais e ecofaxina no trecho urbano do rio Jaguaribe em Iguatu – CE**. In: Coletânea VII: Planejamento urbano de bacias hidrográficas. Mossoró: EDUERN, 2016, p. 103-111.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PAN, Yanqun; BÉLANGER, Simon; HUOT, Yannick. **Evaluation of atmospheric correction algorithms over lakes for high-resolution multispectral imagery: implications of adjacency effect**. Remote Sensing, Basel, v. 14, n. 13, artigo 2979, 2022. DOI: 10.3390/rs14132979. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/14/13/2979. Acesso em: 10 jul. 2026.

PAULINO, Rejane S.; MARTINS, Vitor S.; NOVO, Evlyn M. L. M.; BARBOSA, Claudio C. F.; CARVALHO, Lino A. S. de; BEGLIOMINI, Felipe N. **Assessment of adjacency correction over inland waters using Sentinel-2 MSI images**. Remote Sensing, Basel, v. 14, n. 8, artigo 1829, 2022. DOI: 10.3390/rs14081829. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/14/8/1829. Acesso em: 10 jul. 2026.

PEREIRA, Francisco Jairo Soares**. Medida de processos hidrossedimentológicos no Nordeste brasileiro: aplicação ao Rio Jaguaribe (CE) e ao Núcleo de Desertificação de Gilbués (PI)**. 2022. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65062. Acesso em: 12 mar. 2026.

PEREIRA, Marco Alésio Figueiredo; BARBIEIRO, Bruno Lippo; QUEVEDO, Daniela Muller de. **Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos**. Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 32, p. 308-320, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-43458. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sn/a/jQSnLRKrRypfvm5nZWmKtxr/. Acesso em: 05 mar. 2026.

PINHEIRO, José César Vieira; AMARAL, Cícero Ricardo do; CARVALHO, Robério Marcelo de. **Análise da viabilidade socioambiental da fruticultura irrigada no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Revista de Gestão Social e Ambiental, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 3-17, jan./abr. 2010.

PINHEIRO, Maria Inês Teixeira; CAMPOS, José Nilson B.; STUDART, Ticiana Marinho de Carvalho. **Conflitos por águas e alocação negociada: o caso do vale dos Carás no Ceará**. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 45, n. 6, p. 1655-1672, nov./dez. 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rap/a/KLTtHMLfQ5WVnBSmmjSCTsc/. Acesso em: 26 fev. 2026.

PIRES DO RIO, Gisela Aquino; MOURA, Vinícius Pinto; SALES, Alba Valéria de Souza. **Gestão de recursos hídricos: aspectos metodológicos**. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, 2., 2004, Indaiatuba. Anais [...]. Indaiatuba: ANPPAS, 2004. Disponível em: https://anppas.org.br/ii-encontro-associacao-nacional-de-pos-graduacao-e-pesquisa-em-ambiente-e-sociedade/. Acesso em: 22 out. 2026.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho. Modelos de turbidez, transparência e concentração de clorofila no Reservatório de Três Marias a partir dos dados espectrais dos satélites Sentinel-2. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/57194.

PIZANI, Fernanda; MAILLARD, Philippe; AMORIM, Camila Costa. **Estimativa de parâmetros de qualidade da água em ambientes lênticos por meio de tecnologias de sensoriamento remoto: uma revisão das últimas duas décadas**. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia, v. 74, n. 3, p. 729–754, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-65357. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/65357. Acesso em: 05 mar. 2026.

POMPÊO, Marcelo *et al.* **Water quality assessment using Sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number: the Cantareira System reservoirs (São Paulo, Brazil)**. Environmental Science and Pollution Research, Heidelberg, v. 28, n. 26, p. 34990–35011, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-12975-x.

POMPÊO, Marcelo; MOSCHINI-CARLOS, Viviane. **Avaliação da degradação da qualidade da água do reservatório Carlos Botelho em Itirapina, São Paulo, Brasil, por meio de imagens do satélite Sentinel-2**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022. Disponível no Repositório da USP: https://repositorio.usp.br/item/003089871. Acesso em: 05 mar. 2026.

PONTE, Nicole Sarah Carvalho *et al.* **Estimating concentrations of chlorophyll-a and suspended sediments in a continental aquatic ecosystem using remote sensing**. Revista Agro@mbiente, Boa Vista, v. 14, 2020. DOI: 10.18227/1982-8470ragro.v14i0.6300.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PORTO, Mônica Ferreira do Amaral; PORTO, Rubem La Laina. **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

RADIANT EARTH FOUNDATION. **Remote Sensing Infographic: seeing the changing planet: a selection of Earth observation satellites**. [S. l.]: Radiant Earth Foundation, 2017. Disponível em: https://s3-us-west-2.amazonaws.com/radiant-blog-assets/wp-content/uploads/2018/11/08170427/Remote-Sensing-Infographic-FINAL.pdf. Acesso em: 05 mar. 2026.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. **Água na região Nordeste: desperdício e escassez**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

SABERIOON, Mohammad *et al.* **Chlorophyll-a and total suspended solids retrieval and mapping using Sentinel-2A and machine learning for inland waters**. Ecological Indicators, v. 113, 2020.

SAGAN, Vasit *et al.* **Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing**. Earth-Science Reviews, v. 205, 2020.

SALAS, Eric Ariel L.; SUBBURAYALU, Sakthi K.; PARTEE, Eric B.; WILLIS, L. P.; MITCHELL, K. **Potential of mapping dissolved oxygen in the Little Miami River using Sentinel-2 images and machine learning algorithms**. Remote Sensing Applications: Society and Environment, Amsterdam, v. 26, artigo 100759, 2022. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100759. Disponível em: https://eric-salas.com/wp-content/uploads/2022/05/LMR_DO_paper.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

SANTANA, Ivan Martins; SOUZA, Francislê Neri de; VIANA, Helena Brandão. **Ferramentas de inteligência artificial na revisão de literatura: um estudo com base no tema das falácias lógicas**. Revista Tempos e Espaços em Educação, v. 17, n. 36, e22252, 2024. DOI: 10.20952/revtee.v17i36.22252.

SETTI, Arnaldo Augusto *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001.

SILVA, Danielly Thaynara da Fonseca. **Letramentos acadêmicos e inteligência artificial: analisando a simulação da compreensão do artigo acadêmico por meio do ChatGPT**. Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação, Florianópolis, v. 30, e103500, 2025. DOI: 10.5007/1518-2924.2025.e103500.

SILVA NETO, Tomaz Alexandre da. **Mapeamento de áreas inundáveis na região do Baixo Jaguaribe (Ceará) utilizando imagens Sentinel-1 e Sentinel-2**. 2023. 68 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76146. Acesso em: 12 mar. 2026.

SILVA NETO, Tomaz Alexandre da; SOUSA, Joyce Shantala Fernandes de Oliveira; FREIRES, Eduardo Viana; MENDES, Luzia Suerlange Araújo dos Santos; DUARTE, Cynthia Romariz. **Mapeamento automatizado de tanques de carcinicultura através do Google Earth Engine e técnicas de aprendizado de máquina na região do Baixo Jaguaribe (CE)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 21., 2025, Salvador. Anais [...]. Campinas: Galoá, 2025. Disponível em:

https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/mapeamento-automatizado-de-tanques-de-carcinicultura-atraves-do-google-earth-eng?lang=pt-br. Acesso em: 26 mar. 2026.

SILVA, E. J.; COELHO, F.; SILVA, W. P. **Sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos**. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas, Volta Redonda, v. 4, n. 2, p. 11-20, 2017.

SILVA, Willian Geraldo da. **Modelos para predição de sólidos dissolvidos totais, sólidos totais e turbidez no reservatório de Jaguara a partir dos dados espectrais dos satélites Sentinel-2**. 2025. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

SIMÃO, Rafael Avila. **Avaliação da turbidez e do material particulado em suspensão na Lagoa dos Patos por sensoriamento remoto**. 2024. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2024.

SOUZA, Fabíola Esquerdo de. **Análise da influência do uso e ocupação da terra na concentração de sólidos em suspensão em reservatório hidrelétrico com o uso do sensoriamento remoto**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

SOUZA, M. E. V. **Uso do sensoriamento remoto para estimar a concentração de componentes opticamente ativos na Lagoa da Pampulha-MG**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SUASSUNA, João. **Semiárido: proposta de convivência com a seca**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2007.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VANHELLEMONT, Quinten; RUDDICK, Kevin. **Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: examples from Landsat-8**. Remote Sensing of Environment, v. 161, p. 89-106, 2015.

VIEIRA, Vicente de Paulo Pereira Barreto. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável do semiárido nordestino**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 89-101, abr./jun. 2008.

VIRDIS, Salvatore G. P.; XUE, Wenchao; WINIJKUL, Ekbordin; NITIVATTANANON, Vilas; PUNPUKDEE, Pongsakon. **Remote sensing of tropical riverine water quality using Sentinel-2 MSI and field observations**. Ecological Indicators, Amsterdam, v. 144, artigo 109472, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109472. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22009451. Acesso em: 10 jul. 2026.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

WATANABE, F. *et al.* ***Mapping*** **the chlorophyll-a horizontal gradient in a cascading reservoirs system using MSI Sentinel-2A images**. Advances in Space Research, v. 64, n. 3, p. 581-590, 2019.

WATANABE, F. *et al.* **Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A: Barra Bonita Reservoir, Brazil**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 90, n. 2, p. 1987-2000, 2018.

WU, Yulun; KNUDBY, Anders; PAHLEVAN, Nima; LAPEN, David; ZENG, Chuiqing. **Sensor-generic adjacency-effect correction for remote sensing of coastal and inland waters**. Remote Sensing of Environment, Amsterdam, v. 315, artigo 114433, 2024. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114433. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425724004590. Acesso em: 10 jul. 2026.

ZHAO, Yaqi *et al.* **Satellite retrievals of water quality for diverse inland waters from Sentinel-2 images: an example from Zhejiang Province, China**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Amsterdam, v. 132, artigo 104048, 2024. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104048. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843224004023. Acesso em: 10 jul. 2026.

APÊNDICE A – VARIÁVEIS ESPECTRAIS SENTINEL-2/MSI

item	Ponto	Data Coleta	Data Imagem	Imagens na Janela	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2	coordenadas
1	JAG-14	14/04/2010	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
2	JAG-14	08/06/2010	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
3	JAG-14	06/07/2011	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
4	JAG-14	15/03/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
5	JAG-14	13/06/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
6	JAG-14	02/10/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
7	JAG-14	10/04/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
8	JAG-14	12/06/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
9	JAG-14	04/12/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
10	JAG-14	13/03/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
11	JAG-14	27/05/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
12	JAG-14	28/08/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
13	JAG-14	26/03/2015	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
14	JAG-14	08/06/2016	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
15	JAG-14	23/08/2016	22/08/2016	1	0.0223	0.034300000000004	0.027700000000002	0.035	0.0345	0.0284	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
16	JAG-14	29/11/2016	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
17	JAG-14	22/03/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
18	JAG-14	22/06/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
19	JAG-14	21/09/2017	21/09/2017	1	0.0766	0.0944	0.11460000000000001	0.1908	0.30970000000000003	0.2514	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
20	JAG-14	27/12/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
21	JAG-14	27/03/2018	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
22	JAG-14	26/06/2018	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
23	JAG-14	25/09/2018	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
24	JAG-14	13/12/2018	15/12/2018	1	0.108	0.12440000000000001	0.1302	0.1346	0.1588	0.1305	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
25	JAG-14	19/02/2019	18/02/2019	2	0.1474	0.157	0.13440000000000002	0.2194	0.1563	0.1216	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
26	JAG-14	30/05/2019	29/05/2019	2	0.023700000000002	0.050800000000005	0.035300000000005	0.29660000000000003	0.1424	0.0819	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
27	JAG-14	27/08/2019	27/08/2019	1	0.0302	0.0539	0.0473	0.2586	0.20900000000000002	0.1202	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
28	JAG-14	30/06/2021	02/07/2021	2	0.5492	0.5508000000000001	0.5268	0.5748	0.5804	0.49360000000000004	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
29	JAG-14	16/09/2021	15/09/2021	2	0.2388	0.2664	0.2894	0.32220000000000004	0.2758	0.19440000000000002	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
30	JAG-14	15/12/2021	14/12/2021	3	0.6084	0.6468	0.6348	0.66	0.5623	0.4612	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
31	JAG-14	29/06/2022	27/06/2022	2	0.0582	0.132	0.06330000000000001	0.3816	0.1242	0.061900000000000004	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
32	JAG-14	22/12/2022	19/12/2022	2	0.068600000000001	0.1126	0.0756	0.47240000000000004	0.18530000000000002	0.1023	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
33	JAG-14	09/03/2023	09/03/2023	1	0.5952000000000001	0.5604	0.534	0.666	0.5646	0.45180000000000003	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
34	JAG-14	14/06/2023	12/06/2023	2	0.8688	0.8352	0.8144	0.7904	0.5748	0.41040000000000004	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
35	JAG-14	07/12/2023	04/12/2023	2	0.7784000000000001	0.7456	0.7448	0.7784000000000001	0.6113000000000001	0.4686	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
36	JAG-14	13/06/2024	11/06/2024	2	0.0207	0.041100000000000005	0.0432	0.06960000000000001	0.091	0.0562	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
37	JAG-14	10/09/2024	09/09/2024	2	0.8016000000000001	0.752	0.7392000000000001	0.7616	0.6501	0.5529000000000001	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
38	JAG-14	12/12/2024	08/12/2024	2	0.0539	0.06380000000000001	0.053000000000000005	0.131	0.08020000000000001	0.0531	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}

39	JAG-14	13/03/2025	13/03/2025	1	0.0415	0.049300000000000004	0.0412	0.064	0.053200000000000004	0.038400000000000004	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
40	JAG-14	11/06/2025	08/06/2025	2	0.0425	0.079	0.074400000000000001	0.1734	0.142000000000000002	0.0989	{[-37.99944696152665,-5.0844855170906085]}
41	JAG-16	14/04/2010	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
42	JAG-16	08/06/2010	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
43	JAG-16	06/07/2011	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
44	JAG-16	15/03/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
45	JAG-16	13/06/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
46	JAG-16	02/10/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
47	JAG-16	05/12/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
48	JAG-16	10/04/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
49	JAG-16	12/06/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
50	JAG-16	04/12/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
51	JAG-16	13/03/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
52	JAG-16	28/05/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
53	JAG-16	28/08/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
54	JAG-16	02/06/2015	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
55	JAG-16	29/09/2015	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
56	JAG-16	08/06/2016	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
57	JAG-16	18/08/2016	22/08/2016	1	0.1522	0.191600000000000002	0.2184	0.253200000000000004	0.3397	0.2305	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
58	JAG-16	22/03/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
59	JAG-16	22/06/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
60	JAG-16	21/09/2017	21/09/2017	1	0.062	0.086100000000000001	0.067200000000000001	0.0985	0.095	0.075900000000000001	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
61	JAG-16	27/03/2018	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
62	JAG-16	26/06/2018	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
63	JAG-16	25/09/2018	23/09/2018	1	0.1068	0.147000000000000002	0.1688	0.2202	0.3062	0.262	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
64	JAG-16	12/12/2018	15/12/2018	1	0.0881	0.1252	0.156600000000000002	0.2092	0.3652	0.3116	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
65	JAG-16	30/05/2019	26/05/2019	4	0.016900000000000002	0.038400000000000004	0.023200000000000002	0.011300000000000001	0.012100000000000001	0.0095	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
66	JAG-16	27/08/2019	24/08/2019	3	0.0603	0.096800000000000001	0.0787	0.0896	0.0873	0.0753	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
67	JAG-16	03/12/2019	30/11/2019	4	0.0935	0.135	0.1506	0.224400000000000002	0.3375	0.2672	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
68	JAG-16	30/06/2021	29/06/2021	3	0.0322	0.057300000000000004	0.048100000000000004	0.0284	0.019700000000000002	0.0148	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
69	JAG-16	16/09/2021	12/09/2021	4	0.080300000000000001	0.1394	0.1322	0.191	0.2457	0.168	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
70	JAG-16	29/06/2022	27/06/2022	3	0.0345	0.0506	0.042800000000000005	0.0217	0.0165	0.0152	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
71	JAG-16	09/03/2023	06/03/2023	3	0.3992	0.4148	0.392	0.4716	0.4491	0.3774	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
72	JAG-16	21/06/2023	17/06/2023	4	0.0402	0.0575	0.0465	0.025400000000000002	0.0196	0.0142	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
73	JAG-16	07/12/2023	04/12/2023	4	0.8848	0.8696	0.894400000000000001	0.8336	0.5654	0.3976	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
74	JAG-16	13/06/2024	11/06/2024	3	0.0466	0.0736	0.0618	0.037200000000000004	0.024300000000000002	0.019	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
75	JAG-16	10/09/2024	06/09/2024	4	0.052000000000000005	0.0747	0.0636	0.0414	0.0409	0.0318	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
76	JAG-16	12/12/2024	08/12/2024	5	0.1428	0.1568	0.1438	0.114	0.11	0.0921	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}
77	JAG-16	11/06/2025	08/06/2025	5	0.0236	0.0442	0.0217	0.3062	0.098	0.041	{[-37.77664797739122,-4.85810587480927]}

78	JAG-06	14/04/2010	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
79	JAG-06	06/07/2011	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
80	JAG-06	15/03/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
81	JAG-06	13/06/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
82	JAG-06	02/10/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
83	JAG-06	05/12/2012	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
84	JAG-06	10/04/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
85	JAG-06	12/06/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
86	JAG-06	18/09/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
87	JAG-06	04/12/2013	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
88	JAG-06	13/03/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
89	JAG-06	28/05/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
90	JAG-06	28/08/2014	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
91	JAG-06	02/06/2015	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
92	JAG-06	29/09/2015	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
93	JAG-06	09/03/2016	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
94	JAG-06	21/03/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
95	JAG-06	21/06/2017	Sem Imagem	0	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
96	JAG-06	20/09/2017	21/09/2017	1	0.12140000000000001	0.14120000000000002	0.11620000000000001	0.15280000000000002	0.1247	0.0937	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
97	JAG-06	20/06/2018	20/06/2018	1	0.0143	0.0207	0.0161	0.0145	0.0155	0.011300000000000001	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
98	JAG-06	11/09/2018	13/09/2018	1	0.03210000000000004	0.04400000000000004	0.03380000000000004	0.02550000000000002	0.02780000000000002	0.02140000000000002	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
99	JAG-06	12/12/2018	15/12/2018	1	0.0173	0.0187	0.0188	0.0235	0.049	0.0424	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
100	JAG-06	14/02/2019	10/02/2019	4	0.03140000000000004	0.0296	0.02550000000000002	0.03840000000000004	0.0443	0.031	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
101	JAG-06	22/05/2019	19/05/2019	4	0.2366	0.2798	0.2828	0.35700000000000004	0.3104	0.2315	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
102	JAG-06	05/09/2019	01/09/2019	4	0.5868	0.54160000000000001	0.4932	0.56	0.4914	0.4197	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
103	JAG-06	03/12/2019	30/11/2019	4	0.0796	0.1102	0.09090000000000001	0.1958	0.1353	0.09330000000000001	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
104	JAG-06	29/06/2021	29/06/2021	2	0.035	0.0369	0.03110000000000003	0.0393	0.039	0.0313	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
105	JAG-06	15/09/2021	12/09/2021	3	0.0325	0.04910000000000005	0.03650000000000005	0.0287	0.04210000000000005	0.0351	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
106	JAG-06	15/12/2021	11/12/2021	4	0.8952	0.84800000000000001	0.82000000000000001	0.828800000000001	0.655500000000001	0.498700000000003	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
107	JAG-06	15/12/2021	11/12/2021	4	0.8952	0.84800000000000001	0.82000000000000001	0.828800000000001	0.655500000000001	0.498700000000003	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
108	JAG-06	23/03/2022	19/03/2022	4	0.125	0.1416	0.126	0.2028	0.152	0.1153	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
109	JAG-06	28/06/2022	24/06/2022	4	0.0392	0.0485	0.04840000000000006	0.032600000000000004	0.11410000000000001	0.1683	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
110	JAG-06	09/03/2023	06/03/2023	3	0.10640000000000001	0.11120000000000001	0.11280000000000001	0.13520000000000001	0.12480000000000001	0.1012	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
111	JAG-06	21/06/2023	17/06/2023	4	0.07	0.085	0.0756	0.152	0.1212	0.0782	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
112	JAG-06	07/12/2023	04/12/2023	4	0.0751	0.09290000000000001	0.084	0.0814	0.0911	0.07640000000000001	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
113	JAG-06	13/06/2024	11/06/2024	3	0.314	0.35000000000000003	0.338	0.4672	0.3936	0.3088	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
114	JAG-06	10/09/2024	06/09/2024	4	0.0308	0.0422	0.0339	0.039400000000000004	0.0388	0.0291	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}
115	JAG-06	12/12/2024	08/12/2024	5	0.2856	0.25320000000000004	0.22660000000000002	0.2788	0.1947	0.1721	{[-37.816218040139496,-4.671697614371018]}

APÊNDICE B – TODAS AS IMAGENS PARA ITAIÇABA

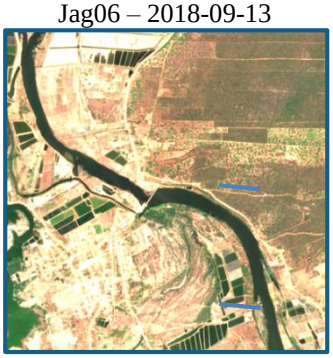
Jag06 – 2017-09-21



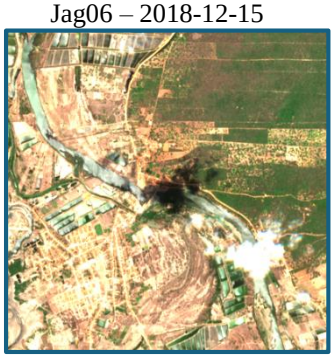
Jag06 – 2018-06-20



Jag06 – 2018-09-13



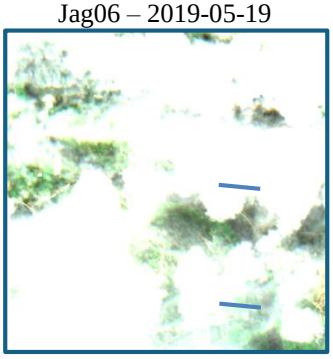
Jag06 – 2018-12-15



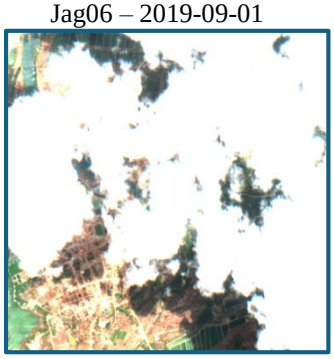
Jag06 – 2019-02-10



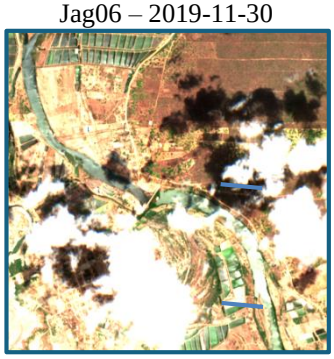
Jag06 – 2019-05-19



Jag06 – 2019-09-01



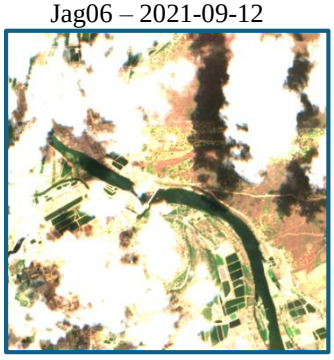
Jag06 – 2019-11-30



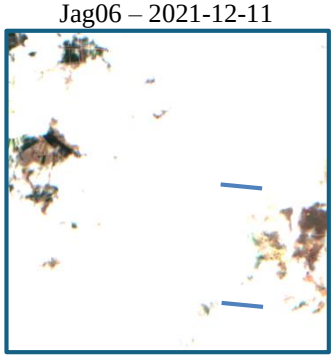
Jag06 – 2021-06-29



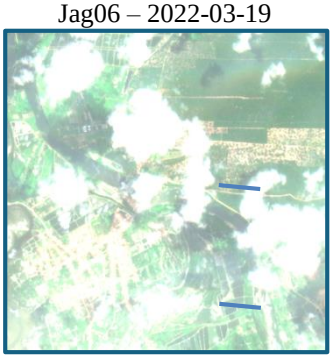
Jag06 – 2021-09-12



Jag06 – 2021-12-11



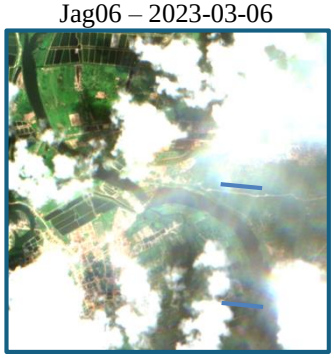
Jag06 – 2022-03-19



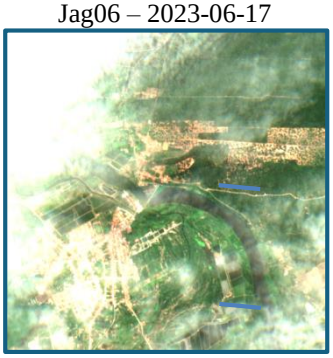
Jag06 – 2022-06-24



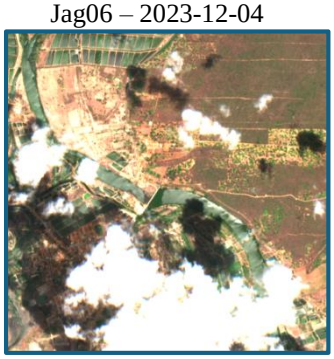
Jag06 – 2023-03-06



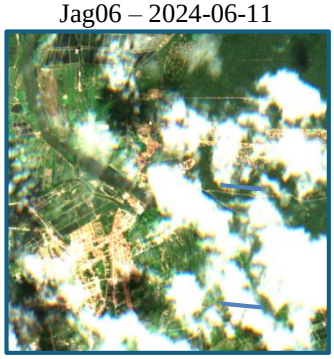
Jag06 – 2023-06-17



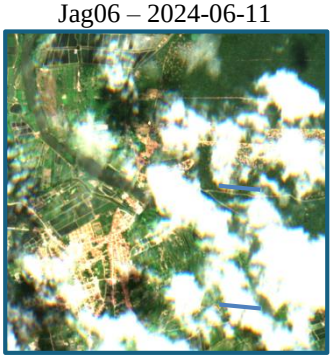
Jag06 – 2023-12-04



Jag06 – 2024-06-11



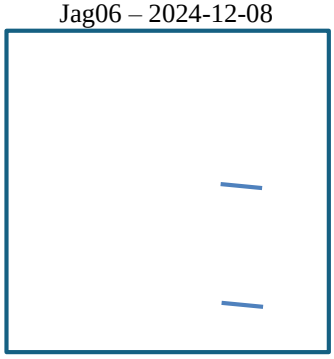
Jag06 – 2024-06-11



Jag06 – 2024-09-06

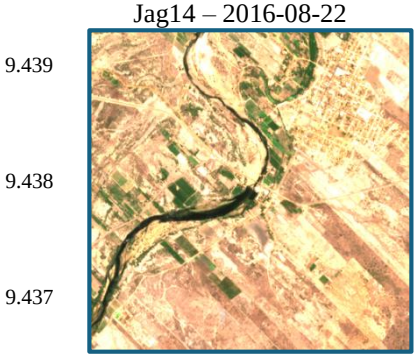


Jag06 – 2024-12-08

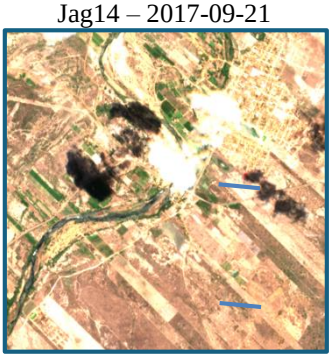


APÊNDICE C – TODAS AS IMAGENS PARA QUIXERÉ

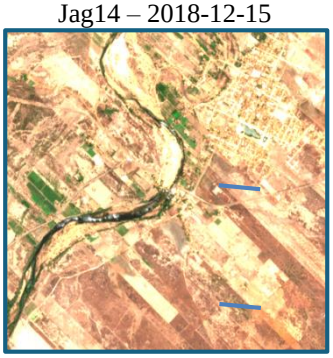
Jag14 – 2016-08-22



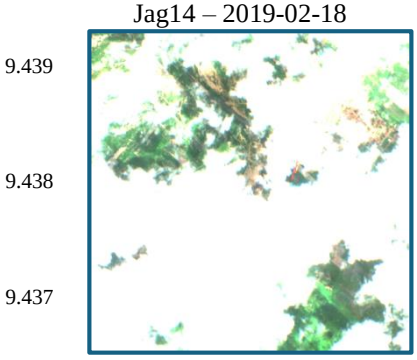
Jag14 – 2017-09-21



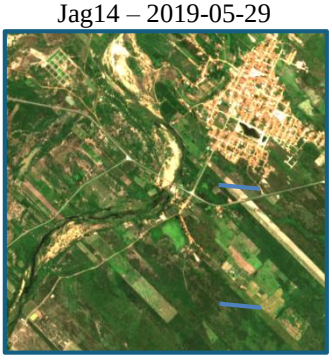
Jag14 – 2018-12-15



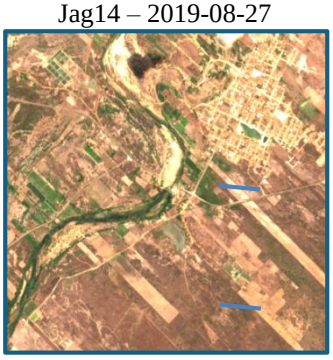
Jag14 – 2019-02-18



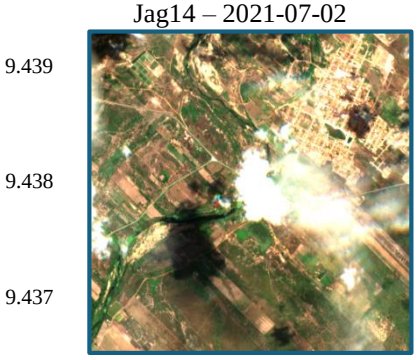
Jag14 – 2019-05-29



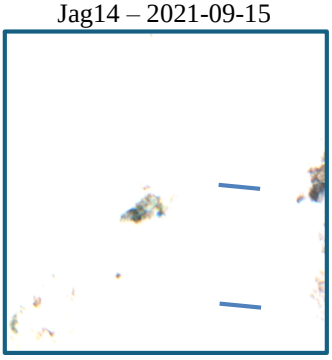
Jag14 – 2019-08-27



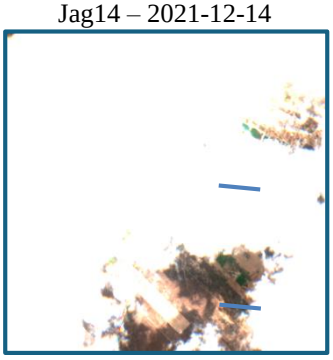
Jag14 – 2021-07-02



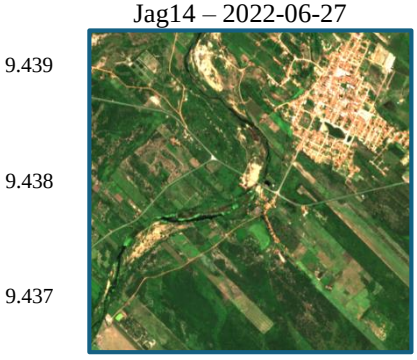
Jag14 – 2021-09-15



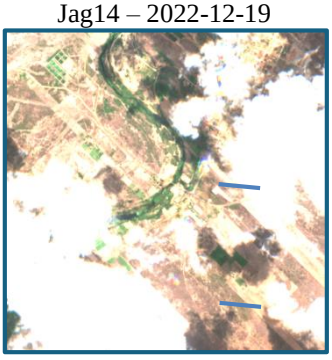
Jag14 – 2021-12-14



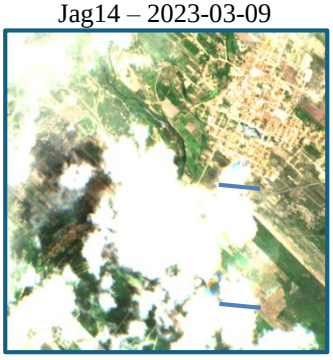
Jag14 – 2022-06-27



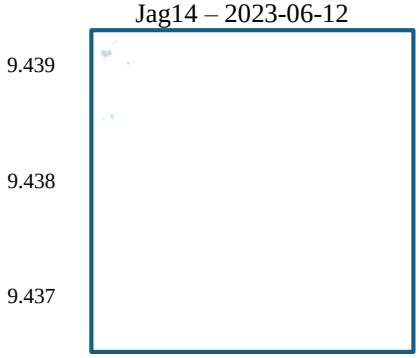
Jag14 – 2022-12-19



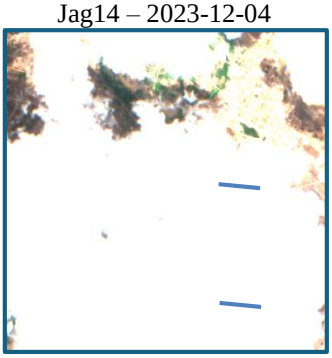
Jag14 – 2023-03-09



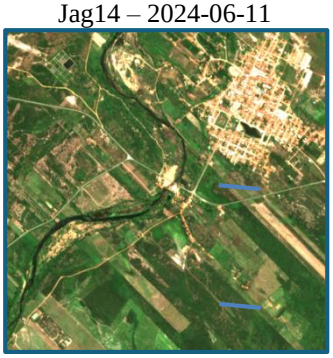
Jag14 – 2023-06-12



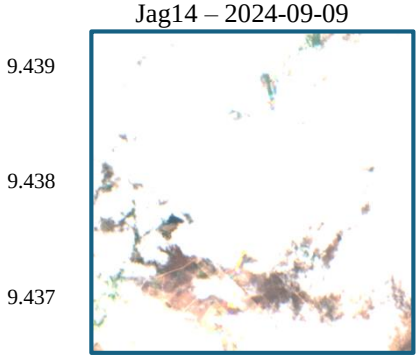
Jag14 – 2023-12-04



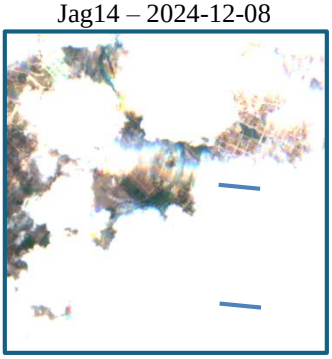
Jag14 – 2024-06-11



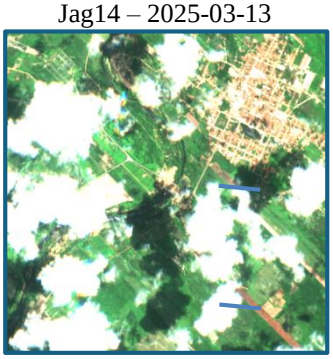
Jag14 – 2024-09-09



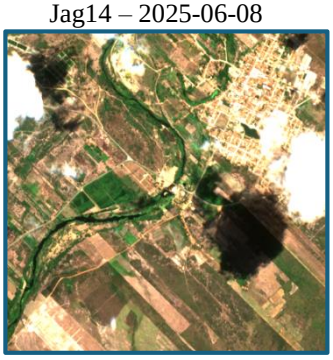
Jag14 – 2024-12-08



Jag14 – 2025-03-13



Jag14 – 2025-06-08



APÊNDICE D – TODAS AS IMAGENS PARA JAGUARUANA

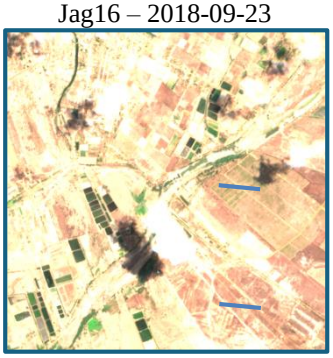
Jag16 – 2016-08-22



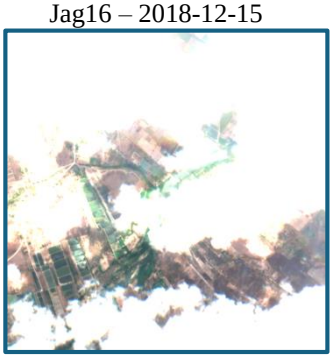
Jag16 – 2017-09-21



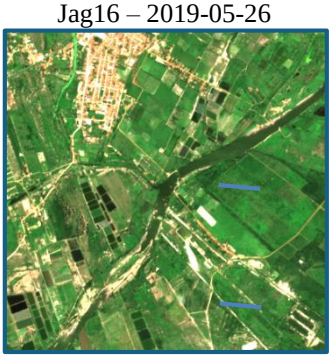
Jag16 – 2018-09-23



Jag16 – 2018-12-15



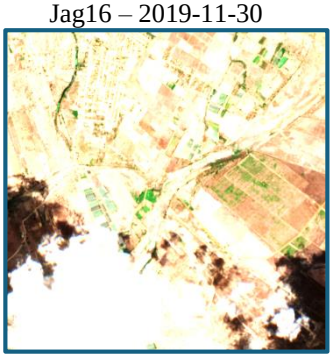
Jag16 – 2019-05-26



Jag16 – 2019-08-24



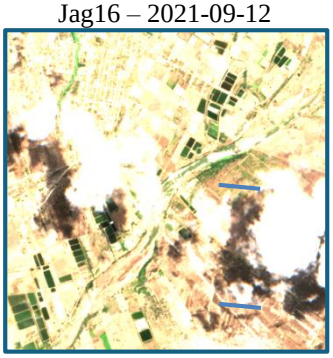
Jag16 – 2019-11-30



Jag16 – 2021-06-29



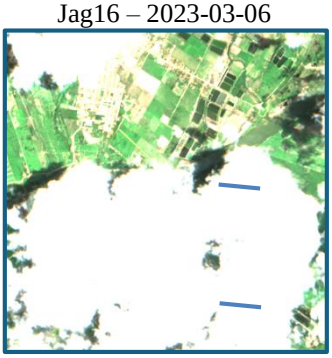
Jag16 – 2021-09-12



Jag16 – 2022-06-27



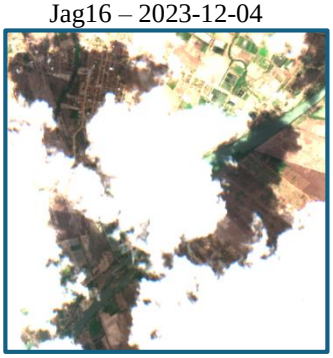
Jag16 – 2023-03-06



Jag16 – 2023-06-17



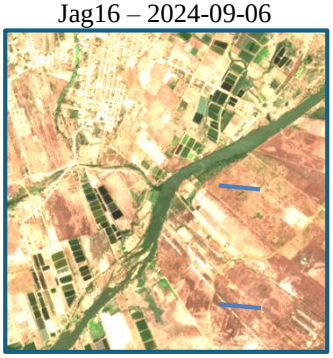
Jag16 – 2023-12-04



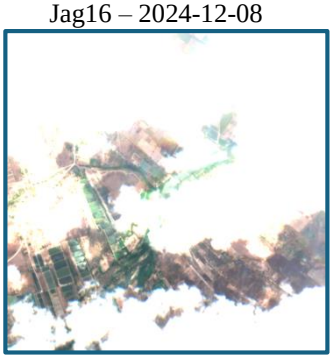
Jag16 – 2024-06-11



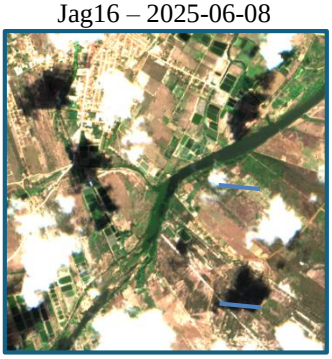
Jag16 – 2024-09-06



Jag16 – 2024-12-08



Jag16 – 2025-06-08



APÊNDICE E – MINUTA DE NOTA TÉCNICA - PROFÁGUA: USO DE IMAGENS SENTINEL-2/MSI COMO FERRAMENTA COMPLEMENTAR AO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO BAIXO CURSO DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ

MINUTA DE NOTA TÉCNICA - PROFÁGUA

Campo	Informação
Documento nº	001/2026
Data	07/07/2026
Interessado	Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua
Instituição potencialmente beneficiada	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará - COGERH
Assunto	Uso de imagens Sentinel-2/MSI como ferramenta complementar ao monitoramento da qualidade da água no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará
Referência	Dissertação de mestrado intitulada "Sensoriamento remoto aplicado à avaliação de parâmetros de qualidade da água em ambiente lótico: estudo de caso na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe, Ceará".

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

1 INTRODUÇÃO

Esta Minuta de Nota Técnica apresenta orientações para o uso complementar de imagens Sentinel-2/MSI no monitoramento da qualidade da água em ambientes lóticos semiáridos, tomando como referência o baixo curso do rio Jaguaribe, no Estado do Ceará. O documento foi elaborado a partir dos resultados obtidos em dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito do ProfÁgua, com foco na integração entre dados de qualidade da água obtidos em campo e informações espectrais derivadas de sensoriamento remoto orbital.

O monitoramento convencional da qualidade da água é indispensável para a gestão dos recursos hídricos, pois fornece dados validados por coletas in situ e análises laboratoriais. Entretanto, em regiões semiáridas, esse monitoramento pode ser limitado por custos operacionais, frequência de coleta, extensão territorial e dificuldade de representar a variabilidade espacial e temporal dos sistemas aquáticos. Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital pode atuar como ferramenta complementar, permitindo ampliar a leitura espacial dos corpos hídricos e apoiar o planejamento das campanhas de monitoramento.

A aplicação de imagens orbitais à qualidade da água encontra resultados mais consolidados em ambientes lênticos, como lagos, lagoas e reservatórios. Em ambientes lóticos, como rios, a aplicação exige maior cautela, pois o fluxo contínuo, a variação rápida da água, a

influência das margens, a largura variável do canal e a mistura espectral podem comprometer a relação entre os dados de campo e a resposta espectral registrada pelos sensores orbitais.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O produto técnico proposto está vinculado à área de Regulação e Governança de Recursos Hídricos e à linha de pesquisa Segurança Hídrica e Usos Múltiplos. A proposta foi desenvolvida a partir da necessidade de transformar os achados da dissertação em orientação prática para instituições que atuam no monitoramento e na gestão da qualidade da água, especialmente em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro.

No baixo curso do rio Jaguaribe, a qualidade da água pode ser influenciada por múltiplos usos, como agricultura irrigada, carcinicultura, abastecimento urbano, lançamento de efluentes, alterações no uso do solo e dinâmica hidrológica regional. A existência de uma rede de monitoramento operada pela COGERH constitui base relevante para integração com dados orbitais, desde que sejam observados critérios técnicos de compatibilização temporal, seleção de imagens e interpretação espectral.

A presente Nota Técnica não tem por finalidade substituir os procedimentos de monitoramento já adotados pelas equipes técnicas. Seu objetivo é oferecer um conjunto de recomendações para uso complementar das imagens Sentinel-2/MSI, de forma a apoiar análises exploratórias, planejamento de campanhas e identificação de padrões espaciais e temporais da qualidade da água.

3 FINALIDADE DA NOTA TÉCNICA

A finalidade desta Nota Técnica é apresentar recomendações metodológicas e operacionais para a integração entre dados in situ de qualidade da água e imagens Sentinel-2/MSI, considerando as especificidades de rios semiáridos. O documento busca apoiar técnicos, gestores e instituições de recursos hídricos na seleção de imagens, na extração de refletâncias, no cálculo de variáveis espectrais e na interpretação dos resultados de forma compatível com as limitações observadas em ambientes lóticos.

Quadro 1 - Síntese da finalidade e do alcance da Nota Técnica

Elemento	Descrição
Produto técnico	Minuta de Nota Técnica vinculada à dissertação de mestrado.
Finalidade	Orientar o uso complementar de imagens Sentinel-2/MSI no monitoramento da qualidade da água em rios semiáridos.
Público-alvo	Técnicos, gestores de recursos hídricos, instituições de monitoramento, comitês de bacia e equipes de geotecnologias.
Abrangência	Aplicação demonstrativa no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará.
Limite de uso	Ferramenta complementar e exploratória, sem substituição das coletas in situ.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4 ÁREA DE APLICAÇÃO

A aplicação demonstrativa desta Nota Técnica considera o baixo curso do rio Jaguaribe, no Estado do Ceará, abrangendo os pontos de monitoramento JAG-14, em Quixeré, JAG-16, em Jaguaruana, e JAG-06, em Itaiçaba. Esses pontos integram a rede de monitoramento da qualidade da água da COGERH e representam trechos submetidos a diferentes usos e pressões antrópicas.

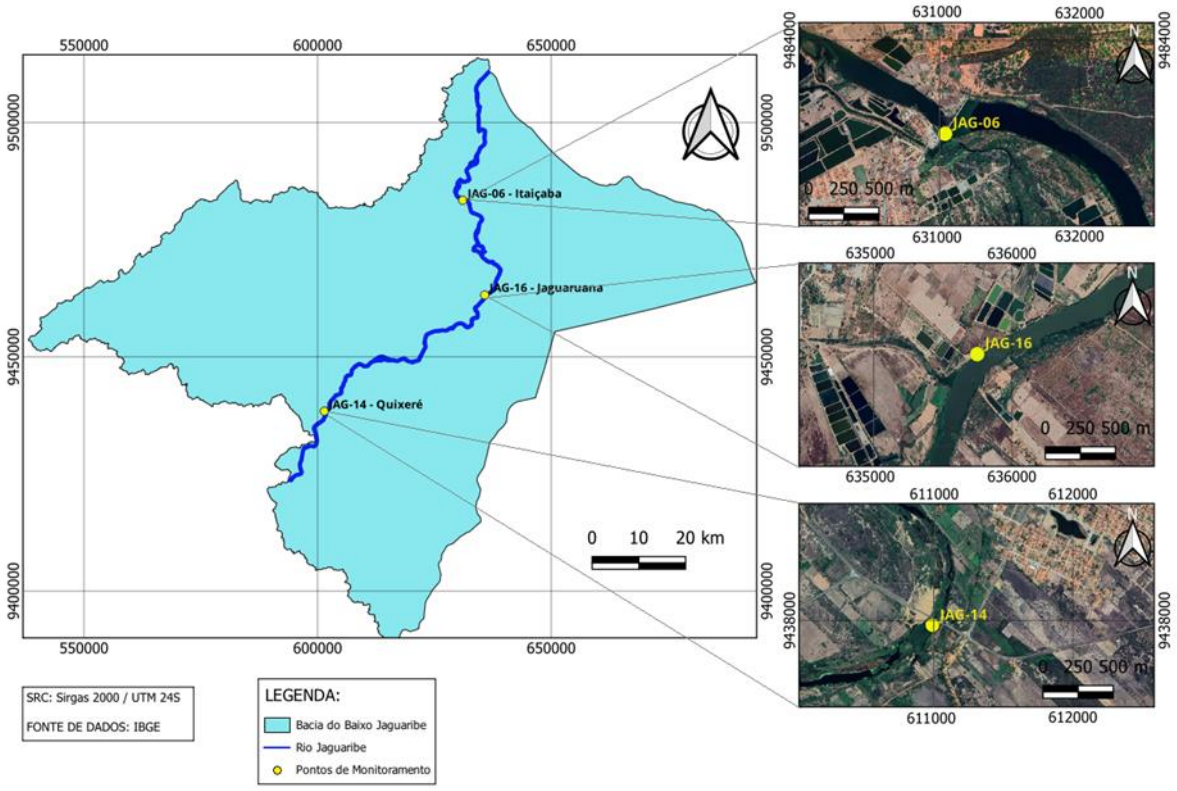
A escolha desses pontos permite avaliar a viabilidade do uso de imagens Sentinel-2/MSI em ambiente lótico semiárido, com foco nos parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. Por se tratar de rio com dinâmica própria, a interpretação dos dados orbitais deve considerar a variabilidade hidrológica, a influência da precipitação, a largura do canal e a presença de margens, bancos de sedimentos ou vegetação próxima ao ponto de coleta.

Quadro 2 - Pontos de monitoramento considerados na aplicação demonstrativa

Código do ponto	Município	Ambiente	Parâmetros avaliados
JAG-14	Quixeré	Rio Jaguaribe	Cor verdadeira, turbidez e sólidos totais
JAG-16	Jaguaruana	Rio Jaguaribe	Cor verdadeira, turbidez e sólidos totais
JAG-06	Itaiçaba	Rio Jaguaribe	Cor verdadeira, turbidez e sólidos totais

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 1 - Localização dos pontos JAG-14, JAG-16 e JAG-06 no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 BASE TÉCNICA E DADOS NECESSÁRIOS

A aplicação da metodologia requer a integração entre dados de qualidade da água, coordenadas dos pontos de monitoramento, imagens Sentinel-2/MSI, dados auxiliares de precipitação e informações de campo. A consistência da análise depende da compatibilidade temporal entre a coleta in situ e a imagem orbital, bem como da avaliação visual das cenas para exclusão de interferências.

Quadro 3 - Dados necessários para aplicação da Nota Técnica

Tipo de dado	Fonte recomendada	Finalidade
Dados de qualidade da água	COGERH	Obter valores de cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.
Coordenadas dos pontos	Rede de monitoramento	Localizar os pontos de coleta nas imagens orbitais.
Imagens Sentinel-2/MSI	Google Earth Engine / Copernicus	Extrair refletâncias espectrais nas datas próximas às coletas.
Dados de precipitação	FUNCEME ou base oficial equivalente	Apoiar a interpretação sazonal e hidrológica.

Tipo de dado	Fonte recomendada	Finalidade
Informações de campo	Equipes técnicas	Validar interferências locais, como margem, sedimento, vegetação, nuvem e sombra.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na aplicação da dissertação, foram considerados registros de qualidade da água da COGERH e imagens Sentinel-2/MSI integradas por meio de uma janela temporal de até +/- 3 dias entre a coleta em campo e a data da imagem orbital. Do total inicial de campanhas disponíveis, a base final resultou em 56 registros válidos pareados entre dados in situ e refletâncias orbitais, após exclusão de registros sem imagem compatível ou com interferências visuais sobre o ponto de monitoramento.

6 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO RECOMENDADO

O procedimento recomendado está organizado em etapas sequenciais, de modo a garantir rastreabilidade na seleção das imagens, na extração das refletâncias e na decisão de validar ou excluir cada registro. A adoção dessas etapas é essencial para reduzir incertezas e evitar interpretações inadequadas em rios semiáridos.

Quadro 4 - Procedimento metodológico recomendado

Etapa	Procedimento	Critério técnico
1	Selecionar os registros de qualidade da água.	Priorizar parâmetros com potencial de resposta óptica, como cor verdadeira, turbidez e sólidos totais.
2	Definir a janela temporal entre campo e satélite.	Utilizar janela curta, preferencialmente de até +/- 3 dias.
3	Selecionar imagens Sentinel-2/MSI.	Priorizar imagens com baixa cobertura de nuvens e boa visibilidade sobre o ponto.
4	Realizar verificação visual da cena.	Excluir imagens com nuvem, sombra, falha radiométrica, margem dominante, vegetação aquática ou interferência no pixel.
5	Extrair refletâncias espectrais.	Extrair valores das bandas nos pontos de monitoramento, com atenção à largura do canal e à mistura espectral.
6	Calcular razões e índices espectrais.	Calcular bandas individuais, razões entre bandas e índices normalizados.

Etapa	Procedimento	Critério técnico
7	Organizar base integrada.	Registrar data da coleta, data da imagem, diferença temporal, valores in situ, bandas, índices e observações.
8	Interpretar resultados.	Usar os resultados como apoio exploratório, evitando adoção automática de modelos preditivos gerais.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A etapa de verificação visual deve ser tratada como critério obrigatório, especialmente em rios. Mesmo quando a cena apresenta baixa cobertura geral de nuvens, o ponto de coleta pode estar sob sombra, nuvem, margem ou sedimento exposto, o que compromete a representatividade da refletância extraída.

7 VARIÁVEIS ESPECTRAIS RECOMENDADAS

As variáveis espectrais indicadas nesta Nota Técnica foram selecionadas a partir da literatura sobre sensoriamento remoto da qualidade da água e da aplicação realizada no baixo curso do rio Jaguaribe. Recomenda-se iniciar a análise com bandas individuais do Sentinel-2/MSI e, em seguida, calcular razões espectrais e índices normalizados.

Quadro 5 - Bandas, razões e índices recomendados

Variável espectral	Composição	Aplicação principal	Observação técnica
B2	Azul	Cor verdadeira	Pode contribuir para interpretação de variações ópticas da água.
B3	Verde	Cor verdadeira, turbidez e índices	Banda importante para razões e índices normalizados.
B4	Vermelho	Turbidez e sólidos	Sensível à presença de partículas e alterações na refletância da água.
B8	Infravermelho próximo	Turbidez e sólidos	Uso deve considerar influência de margem e vegetação em rios estreitos.
SWIR1	Infravermelho de ondas curtas	Sólidos totais	Uso complementar; resolução espacial de 20 m exige cautela.
SWIR2	Infravermelho de ondas curtas	Sólidos totais	Uso complementar; maior risco de mistura espectral em canais estreitos.

Variável espectral	Composição	Aplicação principal	Observação técnica
B3/B2	Razão verde/azul	Cor verdadeira	Indicada para avaliação exploratória de variações de cor.
B4/B3	Razão vermelho/verde	Cor, turbidez e sólidos	Melhor razão espectral observada na aplicação ao Baixo Jaguaribe.
B8/B4	Razão NIR/vermelho	Turbidez e sólidos	Deve ser interpretada com cautela em função da influência das margens.
B8/B3	Razão NIR/verde	Turbidez e sólidos	Uso exploratório.
(B4-B3)/(B4+B3)	Índice normalizado vermelho-verde	Cor, turbidez e sólidos	Melhor índice normalizado observado na aplicação.
(B3-B2)/(B3+B2)	Índice normalizado verde-azul	Cor verdadeira	Uso exploratório para resposta óptica da água.
(B3-B8)/(B3+B8)	Índice normalizado verde-NIR	Condição óptica da água	Relaciona-se à lógica de separação água/superfície e deve ser validado localmente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

8 PRINCIPAIS ACHADOS DA APLICAÇÃO NO BAIXO JAGUARIBE

A aplicação da metodologia no baixo curso do rio Jaguaribe indicou correlações predominantemente fracas entre as bandas individuais Sentinel-2/MSI e os parâmetros cor verdadeira, turbidez e sólidos totais. As melhores associações ocorreram com razões e índices espectrais, especialmente a razão B4/B3 e o índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3).

A razão B4/B3 apresentou r = 0,341 para cor verdadeira, r = 0,306 para turbidez e r = 0,296 para sólidos totais. O índice normalizado (B4-B3)/(B4+B3) apresentou r = 0,317, r = 0,285 e r = 0,278, respectivamente. Apesar desses valores indicarem melhor desempenho relativo em comparação com outras variáveis, as associações permaneceram fracas, reforçando a necessidade de interpretação cautelosa.

Os modelos gerais de regressão apresentaram capacidade explicativa limitada, com melhor desempenho para cor verdadeira no modelo com razões e índices espectrais, cujo R^2 foi de 0,293. Por outro lado, os modelos por ponto de monitoramento apresentaram ajustes superiores em alguns trechos, especialmente para sólidos totais em JAG-14, com $R^2 = 0,833$, e para cor verdadeira e sólidos totais em JAG-16, com $R^2 = 0,755$ e $R^2 = 0,792$, respectivamente. Esses resultados indicam que a modelagem local por trecho pode ser mais adequada do que modelos gerais aplicados ao conjunto de pontos.

Quadro 6 - Síntese dos principais resultados e implicações técnicas

Resultado observado	Implicação técnica
Correlações fracas com bandas individuais.	Evitar o uso direto de bandas isoladas como modelo preditivo geral.
Melhor desempenho relativo de B4/B3.	Priorizar razões espectrais em análises exploratórias.
Bom desempenho relativo de (B4-B3)/(B4+B3).	Considerar índices normalizados como apoio à interpretação espectral.
Modelos gerais com baixa capacidade explicativa.	Não adotar modelo único para todo o trecho analisado sem validação independente.
Modelos por ponto com melhor ajuste em alguns trechos.	Avaliar a construção de modelos locais, específicos por ponto ou segmento do rio.
Influência do ambiente lótico.	Considerar fluxo contínuo, variação temporal rápida, margem, nuvem, sombra e mistura espectral.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

9 RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E OPERACIONAIS

Recomenda-se que o uso de imagens Sentinel-2/MSI no monitoramento da qualidade da água em rios semiáridos observe os seguintes critérios técnicos e operacionais:

- utilizar o sensoriamento remoto como ferramenta complementar, e não substitutiva, ao monitoramento in situ;
- priorizar imagens obtidas em datas próximas às campanhas de campo;
- adotar janelas temporais curtas, preferencialmente de até +/- 3 dias;
- descartar imagens com nuvens, sombras, falhas radiométricas ou interferências sobre o ponto de coleta;
- realizar verificação visual de cada cena antes da extração da refletância;
- considerar a largura do canal e a influência das margens na interpretação dos dados;
- priorizar análises por ponto ou por trecho do rio, evitando generalizações para todo o sistema;
- utilizar razões e índices espectrais como apoio exploratório;
- integrar informações de precipitação, vazão, operação hídrica e uso do solo sempre que disponíveis;
- manter as coletas in situ como referência principal para validação e tomada de decisão.

10 LIMITAÇÕES E CUIDADOS DE INTERPRETAÇÃO

A aplicação do Sentinel-2/MSI em ambientes lóticos apresenta limitações associadas à resolução espacial das imagens, à largura variável do canal, à influência das margens, à

presença de nuvens e sombras, à dinâmica de fluxo e à variação rápida dos parâmetros de qualidade da água. Essas limitações tornam mais complexa a relação entre os valores medidos em campo e a resposta espectral registrada pelo sensor orbital.

Os resultados obtidos no baixo curso do rio Jaguaribe não indicam desempenho suficiente para adoção operacional de modelos preditivos gerais nesta etapa. Assim, as análises devem ser tratadas como exploratórias e complementares, sendo recomendada validação com dados independentes antes de qualquer uso preditivo ou decisório.

Também deve ser considerado que bandas com resolução espacial de 20 m, como SWIR1 e SWIR2, podem sofrer maior influência da margem em rios estreitos, embora tenham apresentado contribuição complementar para interpretação dos sólidos totais. A seleção dessas bandas deve ser acompanhada de verificação visual e análise crítica da posição do pixel em relação ao corpo hídrico.

11 POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO PELA COGERH

A Nota Técnica pode subsidiar a incorporação gradual de dados orbitais às rotinas de monitoramento da qualidade da água da COGERH, especialmente como ferramenta de apoio à seleção de campanhas, identificação de períodos críticos, avaliação exploratória de trechos monitorados e ampliação da compreensão espacial da qualidade da água.

A aplicação periódica do procedimento pode contribuir para o aperfeiçoamento da base de dados, para a definição de pontos prioritários, para o planejamento de campanhas e para o fortalecimento da integração entre monitoramento convencional e geotecnologias. A metodologia também pode ser adaptada a outros trechos de rios semiáridos, desde que sejam observadas as especificidades locais e a necessidade de validação.

Quadro 7 - Possibilidades de incorporação institucional

Aplicação institucional	Contribuição esperada
Planejamento de campanhas	Identificar datas e trechos com maior potencial de análise orbital.
Apoio ao monitoramento	Complementar a leitura pontual das coletas com informações espaciais.
Triagem de imagens	Criar rotina para validação ou exclusão de cenas Sentinel-2/MSI.
Análise por trecho	Avaliar padrões locais e diferenças entre pontos de monitoramento.
Integração com dados hidrológicos	Relacionar refletância, precipitação, vazão e operação hídrica.
Aprimoramento da gestão	Gerar subsídios técnicos para comitês de bacia e tomadas de decisão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

12 ENCAMINHAMENTOS SUGERIDOS

Como encaminhamentos técnicos, recomenda-se ampliar a base de dados pareados entre coletas in situ e imagens Sentinel-2/MSI, sincronizar campanhas futuras com datas de passagem do satélite, testar janelas temporais menores, incorporar variáveis hidrológicas como vazão e precipitação antecedente, avaliar modelos específicos por trecho do rio e testar métodos não lineares, como Random Forest e outros algoritmos de aprendizado de máquina.

Também se recomenda manter o registro sistemático das imagens descartadas, indicando o motivo da exclusão, como presença de nuvem, sombra, falha radiométrica, influência de margem ou ausência de imagem compatível. Esse registro fortalece a rastreabilidade da análise e contribui para o aprimoramento metodológico em futuras aplicações.

13 PRODUTO COMPLEMENTAR: PLANILHA-MODELO

Recomenda-se que esta Nota Técnica seja acompanhada de uma planilha-modelo para organização dos dados integrados. A planilha deve permitir o registro das informações de campo, das datas das imagens, das variáveis espectrais extraídas, dos critérios de validação e das observações que justifiquem a inclusão ou exclusão de cada registro.

Quadro 8 - Campos recomendados para a planilha-modelo

Campo	Descrição
Ponto de monitoramento	Código do ponto da rede COGERH.
Município	Município associado ao ponto de monitoramento.
Data da coleta	Data da campanha in situ.
Data da imagem	Data da cena Sentinel-2/MSI selecionada.
Diferença temporal	Número de dias entre coleta e imagem orbital.
Parâmetro analisado	Cor verdadeira, turbidez ou sólidos totais.
Valor in situ	Resultado medido em campo ou laboratório.
Bandas B2, B3, B4 e B8	Refletâncias extraídas das bandas de 10 m.
Bandas SWIR1 e SWIR2	Refletâncias complementares das bandas de 20 m.
Razões e índices espectrais	Variáveis calculadas a partir das bandas.
Condição da imagem	Registro validado ou excluído.
Observação técnica	Motivo da exclusão ou observações sobre nuvem, sombra, margem, sedimento ou falha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

14 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre dados in situ e imagens Sentinel-2/MSI apresenta potencial para fortalecer o monitoramento da qualidade da água em rios semiáridos, desde que aplicada com critérios técnicos rigorosos. Os resultados obtidos no baixo curso do rio Jaguaribe indicam que o sensoriamento remoto pode apoiar análises exploratórias e avaliações por trecho, mas não substitui as coletas convencionais.

Assim, a adoção dessa abordagem deve ocorrer de forma complementar, integrada ao conhecimento local da bacia, às rotinas institucionais de monitoramento e à validação contínua com dados de campo. A principal contribuição desta Nota Técnica é sistematizar um procedimento prático para uso das imagens Sentinel-2/MSI como apoio à gestão da qualidade da água em ambiente lótico semiárido.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual. Brasília, DF: ANA, 2024.

BARBOSA, Claudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; MARTINS, Vitor Siqueira. Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

BRITO, Higor Costa de et al. Uso de sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 23, n. 90, p. 108-119, 2022. DOI: 10.14393/RCG239060922.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (Ceará). Síntese do Plano da Região Hidrográfica do Baixo Jaguaribe. Fortaleza: COGERH, 2021.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. Sentinel-2 MSI User Guide. Paris: ESA, 2024.

FEITOZA, Vítor Soares. Proposição de estações virtuais de clorofila-a para a Lagoa da Pampulha com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto. 2022. 140 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua) - Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, 2022.

HOSSAIN, A. K. M. Azad; MATHIAS, Caleb; BLANTON, Richard. Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using Landsat 8 satellite. Remote Sensing, v. 13, n. 18, 3785, 2021. DOI: 10.3390/rs13183785.

MAEDA, Tatiane Carvalho et al. Green chemistry: using more sustainable techniques to estimate the water quality of the Uberaba River using orbital optical sensors. Química Nova, v. 47, n. 10, p. 1-9, 2024. DOI: 10.21577/0100-4042.20240077.

MCFEETERS, Stuart K. 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. DOI: 10.1080/01431169608948714.

NECHAD, B.; RUDDICK, K. G.; PARK, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. Remote Sensing of Environment, v. 114, n. 4, p. 854-866, 2010. DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.022.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho; MAILLARD, Philippe; AMORIM, Camila Costa. Estimativa de parâmetros de qualidade da água em ambientes lênticos por meio de tecnologias de sensoriamento

remoto: uma revisão das últimas duas décadas. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia, v. 74, n. 3, p. 729-754, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-65357.

APÊNDICE A - MODELO DE PLANILHA DE INTEGRAÇÃO DOS DADOS

O quadro a seguir apresenta uma estrutura mínima recomendada para a planilha de integração entre dados in situ e dados Sentinel-2/MSI. A planilha pode ser adaptada conforme a rotina institucional e a disponibilidade de dados.

Quadro 9 - Estrutura mínima da planilha de integração

Campo	Tipo	Obrigatório?	Exemplo	Observação
codigo_ponto	Texto	Sim	JAG-14	Código oficial do ponto.
municipio	Texto	Sim	Quixeré	Município de localização.
data_coleta	Data	Sim	2023-05-10	Data da coleta in situ.
data_imagem	Data	Sim	2023-05-12	Data da imagem Sentinel-2/MSI.
dif_dias	Número	Sim	2	Diferença absoluta em dias.
parametro	Texto	Sim	Turbidez	Parâmetro de qualidade da água.
valor_insitu	Número	Sim	12,4	Valor observado em campo/laboratório.
B2	Número	Sim	0,034	Refletância banda azul.
B3	Número	Sim	0,041	Refletância banda verde.
B4	Número	Sim	0,052	Refletância banda vermelha.
B8	Número	Sim	0,061	Refletância banda NIR.
SWIR1	Número	Opcional	0,028	Banda complementar de 20 m.
SWIR2	Número	Opcional	0,021	Banda complementar de 20 m.
B4_B3	Número	Sim	1,268	Razão vermelho/verde.
indice_B4_B3	Número	Sim	0,118	(B4-B3)/(B4+B3).
imagem_valida	Texto	Sim	Sim	Sim/Não.
motivo_exclusao	Texto	Condicional	Nuvem sobre o ponto	Preencher quando a imagem for excluída.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE B - CHECKLIST OPERACIONAL PARA USO DE IMAGENS SENTINEL-2/MSI

O checklist a seguir deve ser utilizado antes da validação de cada imagem Sentinel-2/MSI na base integrada.

1. A data da imagem está dentro da janela temporal definida em relação à coleta in situ?
2. O ponto de coleta está visível na imagem?
3. Há nuvem sobre o ponto de monitoramento?
4. Há sombra de nuvem ou sombra topográfica sobre o ponto?
5. O pixel de extração está predominantemente sobre água?
6. Há influência aparente de margem, vegetação, bancos de sedimento ou estruturas próximas?
7. A largura do canal é compatível com a resolução espacial da banda utilizada?
8. As bandas de 20 m foram avaliadas com cautela quanto à mistura espectral?
9. As razões e índices foram calculados com base em refletâncias consistentes?
10. A decisão de validar ou excluir a imagem foi registrada na planilha?

ANEXO A – PLANILHA ORIGINAL DE DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DISPONIBILIZADA PELA COGERH

Visita	Amostragem	Corpo Hídrico	Ponto	Data Coleta	Profundidade m	Cor Verdadeira mg Pt/L	Turbidez NTU	Sólidos Totais Lab mg/L
5879	31132	RIO JAGUARIBE	Quixeré	14/04/2010	0,3		5,510	178,000
5898	31144	RIO JAGUARIBE	Quixeré	08/06/2010	0,3	20,000	3,020	1.020,000
7212	36144	RIO JAGUARIBE	Quixeré	06/07/2011	0,3	10,000	4,920	170,000
6903	121	RIO JAGUARIBE	Quixeré	15/03/2012	0,3	5,000	6,460	170,000
6921	133	RIO JAGUARIBE	Quixeré	13/06/2012	0,3	5,000	2,090	176,000
6939	147	RIO JAGUARIBE	Quixeré	02/10/2012	0,3	10,000	5,290	518,000
8597	21829	RIO JAGUARIBE	Quixeré	10/04/2013	0,3	5,000	4,040	196,000
8615	21921	RIO JAGUARIBE	Quixeré	12/06/2013	0,3	5,000	5,810	284,000
34103	56534	RIO JAGUARIBE	Quixeré	13/03/2014	0,3	20,000	5,510	238,000
34120	59615	RIO JAGUARIBE	Quixeré	27/05/2014	0,3	15,000	1,510	208,000
34139	56722	RIO JAGUARIBE	Quixeré	28/08/2014	0,3	10,000	1,280	227,500
9815	45322	RIO JAGUARIBE	Quixeré	26/03/2015	0,3	17,500	1,410	240,000
35030	59943	RIO JAGUARIBE	Quixeré	08/06/2016	0,3	50,000	1,540	291,000
10673	59981	RIO JAGUARIBE	Quixeré	23/08/2016	0,3	30,000	1,990	338,000
10694	46844	RIO JAGUARIBE	Quixeré	29/11/2016	0,3	32,500	3,320	371,000
35215	60395	RIO JAGUARIBE	Quixeré	22/03/2017	0,3	30,000	2,270	296,000
11588	48360	RIO JAGUARIBE	Quixeré	22/06/2017	0,3	25,000	2,040	335,000
11589	48363	RIO JAGUARIBE	Quixeré	21/09/2017	0,3	35,000	2,650	374,000
11590	48366	RIO JAGUARIBE	Quixeré	27/12/2017	0,3	40,000	2,170	328,000
12517	50027	RIO JAGUARIBE	Quixeré	27/03/2018	0,3	25,000	2,640	461,000
12518	50030	RIO JAGUARIBE	Quixeré	26/06/2018	0,3	25,000	2,670	481,000
12519	50033	RIO JAGUARIBE	Quixeré	25/09/2018	0,3	75,000	15,600	384,000
12520	50036	RIO JAGUARIBE	Quixeré	13/12/2018	0,3	100,000	3,740	271,000
13453	51743	RIO JAGUARIBE	Quixeré	19/02/2019	0,3	40,000	7,430	207,000
13454	51746	RIO JAGUARIBE	Quixeré	30/05/2019	0,3	30,000	1,090	413,000
13455	51749	RIO JAGUARIBE	Quixeré	27/08/2019	0,3	20,000	1,080	364,000
36048	62290	RIO JAGUARIBE	Quixeré	30/06/2021	0,3	20,000	1,970	259,000
36049	62293	RIO JAGUARIBE	Quixeré	16/09/2021	0,3	75,000	1,950	220,000
36046	62284	RIO JAGUARIBE	Quixeré	15/12/2021	0,3	20,000	1,070	213,000
37052	64498	RIO JAGUARIBE	Quixeré	29/06/2022	0,3	20,000	1,180	344,000
37054	64504	RIO JAGUARIBE	Quixeré	22/12/2022	0,3	40,000	7,250	166,000
38648	66401	RIO JAGUARIBE	Quixeré	09/03/2023	0,3	50,000	1,180	234,000
38649	66416	RIO JAGUARIBE	Quixeré	14/06/2023	0,3	25,000	1,040	278,000
38651	66409	RIO JAGUARIBE	Quixeré	07/12/2023	0,3	25,000	2,400	
39745	70021	RIO JAGUARIBE	Quixeré	13/06/2024	0,3	15,000	2,200	241,000
39746	70027	RIO JAGUARIBE	Quixeré	10/09/2024	0,3	20,000	1,500	274,000
39747	70033	RIO JAGUARIBE	Quixeré	12/12/2024	0,3	5,000	0,500	208,000
40852	73552	RIO JAGUARIBE	Quixeré	13/03/2025	0,3	5,000	0,600	296,000
40853	73558	RIO JAGUARIBE	Quixeré	11/06/2025	0,3	15,000	0,800	217,000
5879	31135	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	14/04/2010	0,3		9,540	200,000

5898	31147	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	08/06/2010	0,3	20,000	8,570	840,000
7212	36147	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	06/07/2011	0,3	20,000	18,000	250,000
6903	124	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	15/03/2012	0,3	5,000	15,400	252,000
6921	136	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	13/06/2012	0,3	5,000	2,370	246,000
6939	150	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	02/10/2012	0,3	100,000	50,350	1.240,000
6957	166	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	05/12/2012	0,3	5,000	22,900	256,000
8597	21832	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	10/04/2013	0,3	20,000	30,650	218,000
8615	23295	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	12/06/2013	0,3	5,000	34,800	386,000
34103	56536	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	13/03/2014	0,3	25,000	1,850	
34121	56630	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	28/05/2014	0,3	30,000	16,700	329,000
34139	56724	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	28/08/2014	0,3	50,000	18,700	281,500
9816	45327	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	02/06/2015	0,3	20,000	5,080	293,500
9813	59846	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	29/09/2015	0,3	40,000	7,790	298,500
35030	59944	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	08/06/2016	0,3	75,000	46,870	1.206,000
10693	46843	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	18/08/2016	0,3	125,000	55,150	1.905,000
35215	60397	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	22/03/2017	0,3	60,000	30,470	345,000
11588	48362	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	22/06/2017	0,3	40,000	34,800	932,000
11589	48365	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	21/09/2017	0,3	50,000	123,000	1.633,000
12517	50029	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	27/03/2018	0,3	25,000	79,900	1.456,000
12518	50032	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	26/06/2018	0,3	50,000	39,800	559,000
12519	50035	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	25/09/2018	0,3	75,000	120,000	2.012,000
12512	60651	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	12/12/2018	0,3	125,000	68,200	4.301,000
13454	51748	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	30/05/2019	0,3	60,000	37,800	616,000
13455	51751	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	27/08/2019	0,3	125,000	120,900	952,000
13456	51754	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	03/12/2019	0,3	50,000	216,900	4.223,000
36048	62292	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	30/06/2021	0,3	70,000	46,600	582,000
36049	62295	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	16/09/2021	0,3	100,000	170,000	2.700,000
37052	64500	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	29/06/2022	0,3	40,000	11,600	453,000
38644	66397	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	09/03/2023	0,3	50,000	19,100	313,000
38645	66422	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	21/06/2023	0,3	20,000	30,800	691,000
38647	66269	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	07/12/2023	0,3	30,000	22,200	
39745	70023	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	13/06/2024	0,3	25,000	25,900	515,000
39746	70029	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	10/09/2024	0,3	20,000	31,300	331,000
39747	70035	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	12/12/2024	0,3	20,000	1,300	370,000
40853	73560	RIO JAGUARIBE	Jaguaruana	11/06/2025	0,3	20,000	6,000	530,000
5879	31131	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	14/04/2010	0,3		9,770	266,000
7212	36143	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	06/07/2011	0,3	30,000	23,500	208,000
6903	120	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	15/03/2012	0,3	30,000	53,700	346,000
6921	132	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	13/06/2012	0,3	5,000	13,100	352,000
6939	146	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	02/10/2012	0,3	10,000	8,660	574,000
6957	162	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	05/12/2012	0,3	5,000	10,100	317,000
8597	21827	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	10/04/2013	0,3	10,000	11,950	260,000
8615	21920	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	12/06/2013	0,3	5,000	15,350	318,000
34103	56533	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	13/03/2014	0,3	30,000	3,590	
34121	56627	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	28/05/2014	0,3	30,000	6,780	378,000

34139	56721	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	28/08/2014	0,3	20,000	2,490	314,000
9816	59785	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	02/06/2015	0,3	20,000	1,650	373,500
9813	45319	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	29/09/2015	0,3	35,000	2,600	296,000
10687	59874	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	09/03/2016	0,3	225,000	48,720	676,500
11583	48350	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	21/03/2017	0,3	200,000	110,970	427,000
11584	48352	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	21/06/2017	0,3	40,000	27,600	969,000
11585	48354	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	20/09/2017	0,3	35,000	109,000	2.541,000
12514	50022	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	20/06/2018	0,3	50,000	11,300	809,000
12515	50024	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	11/09/2018	0,3	75,000	18,300	1.308,000
12512	60650	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	12/12/2018	0,3	125,000	37,200	1.931,000
13449	51732	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	14/02/2019	0,3	50,000	44,400	2.206,000
13450	51735	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	22/05/2019	0,3	40,000	7,200	405,000
13451	51738	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	05/09/2019	0,3	30,000	19,300	830,000
13456	60737	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	03/12/2019	0,3	30,000	18,400	1.224,000
36044	62279	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	29/06/2021	0,3	50,000	12,010	910,000
36045	63105	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	15/09/2021	0,3	100,000	24,200	2.829,000
36046	62285	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	15/12/2021	0,3	30,000	83,200	4.567,000
37050	64493	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	15/12/2021	0,3	30,000	83,200	4.567,000
37047	64484	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	23/03/2022	0,3	120,000	13,400	5.631,000
37048	64487	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	28/06/2022	0,3	50,000	25,400	611,000
38644	66396	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	09/03/2023	0,3	50,000	6,600	802,000
38645	66421	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	21/06/2023	0,3	35,000	7,780	657,000
38647	66268	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	07/12/2023	0,3	30,000	38,000	
39745	70019	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	13/06/2024	0,3	30,000	9,900	456,000
39746	70025	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	10/09/2024	0,3	40,000	13,900	892,000
39747	70031	RIO JAGUARIBE	Itaiçaba	12/12/2024	0,3	25,000	8,000	1.846,000