

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

ANDRÉ KENJI NONOMURA

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIA E CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS SUSPENSOS VIA IMAGENS ORBITAIS PARA O RIO IVAÍ/PR**

MARINGÁ

2024

André Kenji Nonomura

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIA E CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS SUSPENSOS VIA IMAGENS ORBITAIS PARA O RIO IVAÍ/PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Geografia da Universidade
Estadual de Maringá (UEM) para obtenção de título
de Bacharel em Geografia.

Orientador: Otávio Cristiano Montanher

MARINGÁ

2024

André Kenji Nonomura

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIA E CONCENTRAÇÃO DE
SEDIMENTOS SUSPENSOS VIA IMAGENS ORBITAIS PARA O RIO IVAÍ/PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Maringá (UEM) como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Geografia.

Data de aprovação: ___ / ___ / ___

BANCA EXAMINADORA

Orientador (a)

Dr. Otávio Cristiano Montanher – UEM

Examinador (a)

Dr. Américo José Marques – UEM

Examinador (a)

Dr. Eduardo Souza de Moraes – UEM

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família – irmão, avós, tios e tia – e, em especial, aos meus pais, Cristiane Miasaki Nonomura e Sérgio Hiroshi Nonomura, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante ao longo de toda a minha trajetória. Sem vocês, este momento não seria possível.

Ao meu orientador, Dr. Otávio Cristiano Montanher, pela paciência, dedicação e pelas contribuições que guiaram o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para alcançar este resultado.

Aos professores e colaboradores do curso de Geografia ao longo da minha formação, que contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, transmitindo conhecimentos e valores que levarei para a vida.

Aos colegas de curso e também aos colegas do período de estágio, que tornaram essa caminhada de aprendizado muito mais leve e significativa. Compartilhar momentos, trabalhar em equipe e aprender ao lado de vocês foi uma experiência enriquecedora que contribuiu de maneira fundamental para minha trajetória acadêmica e pessoal.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O estudo de corpos hídricos continentais é essencial para o monitoramento ambiental, pois está diretamente relacionado à qualidade da água e aos processos sedimentares. Desde a década de 1970, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para investigar a relação entre a reflectância da radiação eletromagnética (REM) e as características ambientais. Uma fração da radiação incidente retorna da superfície da água após passar por processos de absorção e espalhamento na atmosfera e na coluna d'água, transportando informações que possibilitam a caracterização detalhada dos sistemas aquáticos. A concentração de sedimentos em suspensão (CSS) desempenha um papel fundamental no ambiente geomorfológico dos corpos hídricos, fornecendo dados essenciais sobre taxas de erosão, transporte e deposição de sedimentos. Essas informações ajudam a compreender o desenvolvimento de redes de drenagem, além de serem indispensáveis para o manejo dos recursos hídricos. Este trabalho analisou a relação entre a reflectância espectral CSS no Rio Ivaí, Paraná, por meio de uma abordagem empírica baseada em modelos de regressão. Esses modelos foram utilizados para calcular o coeficiente de determinação (R^2), visando identificar padrões que possam subsidiar a elaboração de modelos estatísticos para estimar a CSS. A análise utilizou dados de reflectância extraídos de imagens orbitais capturadas pelos satélites Landsat 5, 7 e 8, complementados por medições de CSS realizadas in situ, coletadas nas estações fluviométricas de Teresa Cristina, Ubá do Sul, Vila Rica, Porto Bananeira, Porto Paraíso do Norte e Novo Porto Taquara. Os dados foram disponibilizados pelo portal Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA), e, após filtragem e correções, foram consolidados em gráficos com valores de R^2 detalhados por estação. Os resultados evidenciaram uma grande variabilidade nas concentrações de CSS e nos padrões de reflectância ao longo do Rio Ivaí, o que dificultou a criação de modelos preditivos robustos. Entre os principais achados, destacam-se: i) valores de R^2 variando entre 1×10^{-5} (banda azul) e 0,621 (banda infravermelho); ii) menores valores de R^2 predominando nas bandas azul e verde; e iii) valores mais elevados de R^2 nas bandas do vermelho e infravermelho. Apesar das limitações, observou-se um padrão consistente de melhor desempenho das bandas espectrais à medida que o comprimento de onda aumentou. Conclui-se que, embora os valores de R^2 não tenham atingido resultados satisfatórios, recomenda-se a redução das variabilidades em estudos futuros, visando aprimorar a robustez e a confiabilidade dos modelos preditivos.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Reflectância espectral, Sedimentos suspensos, Rio Ivaí, Modelagem estatística.

ABSTRACT

The study of continental water bodies is essential for environmental monitoring, as it is directly related to water quality and sedimentary processes. Since the 1970s, remote sensing has been widely used to investigate the relationship between the reflectance of electromagnetic radiation (EMR) and environmental characteristics. A fraction of the incident radiation returns from the water surface after undergoing absorption and scattering processes in the atmosphere and water column, carrying information that enables the detailed characterization of aquatic systems. The concentration of suspended sediments (CSS) plays a fundamental role in the geomorphological environment of water bodies, providing essential data on erosion rates, sediment transport, and deposition. This information helps to understand the development of drainage networks and is indispensable for water resource management. This study analyzed the relationship between spectral reflectance and CSS in the Ivaí River, Paraná, using an empirical approach based on regression models. These models were used to calculate the coefficient of determination (R^2), aiming to identify patterns that could support the development of statistical models to estimate CSS. The analysis used reflectance data extracted from orbital images captured by Landsat 5, 7, and 8 satellites, complemented by in situ CSS measurements collected at fluviometric stations Teresa Cristina, Ubá do Sul, Vila Rica, Porto Bananeira, Porto Paraíso do Norte, and Novo Porto Taquara. The data were provided by the Hidroweb portal of the National Water Agency (ANA) and, after filtering and corrections, were consolidated into graphs with R^2 values detailed by station. The results revealed significant variability in CSS concentrations and reflectance patterns along the Ivaí River, making it challenging to create robust predictive models. Key findings include: i) R^2 values ranging from 1×10^{-5} (blue band) to 0.621 (infrared band); ii) lower R^2 values predominating in the blue and green bands; and iii) higher R^2 values in the red and infrared bands. Despite the limitations, a consistent pattern of improved spectral band performance with increasing wavelength was observed. It is concluded that, although the R^2 values did not reach satisfactory levels, reducing variability in future studies is recommended to enhance the robustness and reliability of predictive models.

Keywords: Remote sensing, Spectral reflectance, Suspended sediments, Ivaí River, Statistical modeling.

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1 - MEDIDAS IN SITU DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE ÁGUA CLARA E DE ÁGUA COM VÁRIOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO DE SOLO ARGILOSO VARIANDO DE 0 A 1000 MG/L.	19
FIGURA 2 - MEDIDAS IN SITU DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE ÁGUA CLARA E DE ÁGUA COM VÁRIOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO DE SOLO SILTOSO VARIANDO DE 0 A 1000 MG/L.	20
FIGURA 3 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IVAÍ	22
FIGURA 4 - MAPA DE SEGMENTOS DO RIO IVAÍ.....	22
FIGURA 5 - MAPA DE ALTIMETRIA DA BACIA DO RIO IVAÍ	24
FIGURA 6 - MAPA DE LITOTIPOS DA BACIA DO RIO IVAÍ.....	24
FIGURA 7 - FREQUÊNCIA RELATIVA DE DADOS DE CSS OBTIDOS IN SITU (ANA).....	28
FIGURA 8 - MÉDIAS ANUAIS DE CSS.....	29
FIGURA 9 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO TERESA CRISTINA	30
FIGURA 10 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO UBÁ DO SUL.....	30
FIGURA 11 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO VILA RICA.....	31
FIGURA 12 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO PORTO BANANEIRA.....	31
FIGURA 13 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	32
FIGURA 14 -REGRESSÃO LOGARÍTMICA DA ESTAÇÃO NOVO PORTO TAQUARA	32
FIGURA 15 - REGRESSÃO LOGARÍTMICA DE TODAS ESTAÇÕES JUNTAS	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1	ESTUDOS DO RIO IVAÍ.....	11
2.2	UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS	14
2.3	AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS: COLETA, PROCESSAMENTO E DISPERSÃO.....	16
2.4	COMPORTAMENTO DE REFLECTÂNCIA	18
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.2	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	25
3.3	MODELO DE REGRESSÃO.....	26
4	RESULTADOS	28
5	DISCUSSÃO	34
6	CONCLUSÃO.....	37

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas aquáticos possuem um papel fundamental de usufruto da sociedade, seja para desenvolvimento social ou econômico, como para o ecossistema e a biodiversidade dos seres vivos em seu entorno. Para a população, são uma fonte vital de água potável, essencial para consumo, agricultura, atividades comerciais e industriais no geral.

Para os ecossistemas, os rios são responsáveis por manter a biodiversidade ao longo de suas margens e cursos d'água. Eles abrigam uma variedade de espécies aquáticas, como peixes, anfíbios e invertebrados, além de plantas e animais terrestres que dependem dos recursos hídricos para sobreviver. As matas ciliares, também desempenham um papel crucial de proteção dos cursos d'água contra impactos ambientais, como por exemplo, erosão, poluição, assoreamento e também contribuem para questões de preservação da qualidade da água, através da regulação da temperatura da água e mantendo o equilíbrio ecológico do rio e seu entorno (COGO, 2005).

Os ecossistemas fluviais estão expostos a uma ampla gama de agentes estressores que, variando em natureza e intensidade, desempenham um papel fundamental na destruição e degradação dos habitats. Esses estressores causam mudanças significativas na morfologia dos rios, afetando diretamente o regime de vazão, reduzindo os corredores fluviais e degradando as zonas ripárias. Essas transformações resultam em perdas consideráveis na biodiversidade e na integridade ecológica dos ambientes aquáticos. A preservação dos sistemas lóticos brasileiros, que incluem rios e riachos, tornou-se um desafio cada vez mais complexo para a sociedade atual, especialmente em um cenário de intensificação dos distúrbios ambientais que afetam esses ecossistemas de forma recorrente (RODRIGUES; MALAFAIA; CASTRO, 2010).

A concentração de sedimentos em suspensão (CSS) na água é um importante indicador para entender o funcionamento dos ecossistemas aquáticos e da qualidade dos corpos hídricos, já que o mesmo está diretamente ligado a morfologia dos canais e os processos de assoreamento em reservatórios. A CSS está intimamente relacionada ao ambiente geomorfológico dos corpos hídricos, fornecendo informações sobre as taxas de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que são essenciais para o desenvolvimento das redes de drenagem e das planícies de inundação (MONTANHER, 2013).

Os principais fatores responsáveis pela turbidez da água e pela dispersão da radiação incluem partículas suspensas, como bactérias, fitoplâncton, detritos orgânicos e inorgânicos,

além de compostos dissolvidos, embora em menor proporção. Contudo fatores como erosão das margens dos rios e áreas adjacentes, crescimento excessivo de algas, alterações no fluxo do rio, efluentes domésticos e industriais podem elevar o valor de turbidez, gerando impactos como maior presença de sedimentos em suspensão influenciando no aumento de níveis de turbidez e podendo elevar a temperatura do corpo hídrico, redução da luz disponível para as plantas com alteração na taxa de fotossíntese. (SILVEIRA *et.al.*, 2016 apud USEPA, 1997).

Para se manter um controle ambiental dos rios é necessário realizar a observação e coleta de dados que ajudem a esclarecer a situação de salubridade desses corpos d'água. Esses dados podem ser adquiridos *in loco* e de forma remota utilizando a captação de radiação eletromagnética (REM) por satélites orbitais aplicando índices espectrais, como por exemplo o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) que é utilizado para identificar e monitorar a presença de água em superfícies aquáticas, como rios, lagos e áreas inundadas. pois consegue distinguir entre água, vegetação e solo, uma vez que a água apresenta características espectrais únicas em comparação com outros tipos de cobertura do solo (JENSEN, 2011).

A coleta de dados *in loco* apresenta desafios específicas que devem ser levados em consideração. Primeiramente, o acesso físico a determinados locais pode ser limitado por questões geográficas, como terrenos íngremes, matas densas ou áreas alagadiças. Além disso, essas atividades frequentemente demandam um alto custo de equipamentos e deslocamento, bem como tempo significativo para a execução de medições. Há também o fator da variabilidade climática, que pode prejudicar a coleta durante períodos de chuva ou eventos extremos, comprometendo a obtenção de dados representativos por impedimento de acesso a entrada de propriedades particulares de REM.

Para contornar esses desafios, existe então a possibilidade do uso de novas tecnologias que permite monitorar simultaneamente diversos pontos em corpos d'água, incluindo áreas remotas ou de difícil acesso. Além disso, a quantificação da CSS, uma métrica essencial para esse tipo de controle, pode ser realizada de forma mais econômica por meio dessas tecnologias. Com sensores adequados, é possível ainda obter dados em escala temporal diária, ampliando a eficiência e precisão do monitoramento ambiental (PAULISTA, et al. 2023).

A partir do estudo de Destefani (2005) realizado no rio Ivaí, a maior bacia hidrográfica situada inteiramente no estado do Paraná, destaca-se a relevância dessa região devido à sua extensão e diversidade ambiental. A bacia do rio Ivaí abrange solos com a maior variedade de características ambientais, além de apresentar perfis geológicos e geomorfológicos distintos, que refletem a complexidade do seu território. Localiza-se também em uma zona de transição

entre os climas tropical e subtropical úmido, ambos influenciando as características hídricas do rio.

Em termos econômicos, a bacia do rio Ivaí se destaca devido aos seus solos altamente férteis, que permitem o cultivo em larga escala de soja, milho, trigo e, em menor proporção, de outras culturas como a cana-de-açúcar. Outras atividades econômicas, como a agropastoril e a extração de argila nas várzeas, também contribuem abastecendo setores produtivos, como as olarias da região.

Esses fatores destacam a importância do rio Ivaí tanto para a economia quanto para o meio ambiente do Paraná, mas também trazem à tona a preocupação com o uso intensivo dos recursos naturais na região, que pode impactar negativamente os aspectos ambientais da bacia. A realização de uma pesquisa voltada à estimativa de sedimentos no rio Ivaí pode gerar dados que auxiliem na compreensão de seus padrões de funcionamento e no planejamento de estratégias para melhor manejo dos recursos hídricos, promovendo o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental do rio.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre a reflectância espectral e a CSS no Rio Ivaí, Paraná, utilizando uma abordagem empírica baseada em modelos de regressão. Através dessa análise, buscou-se estabelecer uma correlação quantitativa entre a reflectância da radiação eletromagnética e a CSS, empregando dados de reflectância extraídos de imagens orbitais dos satélites Landsat 5, 7 e 8, complementados por medições de CSS realizadas *in situ*. A aplicação dos modelos de regressão permitiram identificar padrões que poderão subsidiar a criação de futuros modelos estatísticos para estimar a CSS de corpos hídricos continentais, contribuindo para o monitoramento eficiente e o manejo sustentável dos recursos hídricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A CSS é um parâmetro fundamental para o estudo de corpos d'água, refletindo a quantidade de partículas em suspensão presentes na coluna d'água. Esses sólidos podem incluir materiais orgânicos e inorgânicos, como argila, silte, matéria orgânica particulada e outros sedimentos, sendo essencial para compreender processos hidrológicos, morfodinâmicos e biogeoquímicos em sistemas aquáticos, além de ser um indicador importante da qualidade da água e dos impactos de atividades antrópicas ou eventos climáticos extremos (RODRIGUES, MALAFAIA, CASTRO, 2010).

A estimativa da CSS é realizada por meio de modelos empíricos ou algoritmos semianalíticos, que correlacionam dados de reflectância obtidos por sensoriamento remoto com medições *in situ*. Produtos de sensoriamento remoto, como imagens de satélites (por exemplo, Landsat e Sentinel), são amplamente utilizados para monitorar a CSS em grandes escalas espaciais e temporais. Esses dados permitem uma visão sinótica e contínua dos corpos d'água, auxiliando na análise de padrões de deposição de sedimentos, na avaliação de impactos ambientais e no planejamento de ações de mitigação (MARINHO, WACHHOLZ, SOUZA, 2021).

Contudo a estimativa de CSS no Rio Ivaí exige uma base sólida de conhecimentos, tanto sobre os aspectos físicos da bacia hidrográfica quanto sobre as técnicas de sensoriamento remoto e modelos estatísticos para o estudo de sistemas fluviais. Nesse contexto, é essencial compreender os processos hidrodinâmicos que governam o transporte de sedimentos em suspensão no rio, bem como as características gerais que influenciam a produção e a mobilização de sedimentos na bacia do Ivaí.

2.1 Estudos do Rio Ivaí

No contexto do Rio Ivaí, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para investigar a hidrologia e o transporte de sedimentos, dados os desafios associados à sua extensa bacia hidrográfica e à variabilidade das suas condições ambientais.

Destefani (2005) desenvolveu um estudo focado na caracterização e análise da variabilidade do regime hidrológico do Rio Ivaí, com o objetivo de verificar a periodicidade e a estacionariedade do regime fluvial, além de determinar o tempo de permanência de diferentes vazões no canal, com base em dados de estações fluviométricas distribuídas ao longo do rio. A pesquisa resultou nos seguintes dados da bacia:

- Na seção Rio dos Patos, localizada na parte superior da bacia, as vazões abaixo da média de 21 m³/s permanecem no canal 65% do tempo, enquanto as vazões acima da média têm uma duração de apenas 35%.
- Na seção Tereza Cristina, na região intermediária do rio, as vazões superiores à média de 77 m³/s ocupam o canal em 52% do tempo, enquanto as inferiores permanecem 46%.
- Na seção Porto Espanhol, situada em um trecho mais a jusante, as vazões acima da média de 200 m³/s duram 40% do tempo, enquanto as vazões inferiores à média permanecem 60%.
- Na seção Ubá do Sul, próxima à foz do rio, foi observado que as vazões maiores e menores que a média de 276 m³/s possuem tempos de permanência semelhantes aos da seção anterior, com 40% e 60%, respectivamente.

Já na questão sedimentológica, o estudo de Meurer, Bravard e Stevaux (2011), realizou a análise de imagens CM. Uma metodologia desenvolvida para avaliar a textura dos sedimentos marinhos e fluviais, utilizando o diagrama CM, um gráfico de dispersão em escala logarítmica que relaciona dois parâmetros: o parâmetro C, que representa o primeiro percentil da amostra e indica o diâmetro que é ultrapassado por apenas 1% dos grãos, e M, que corresponde ao diâmetro mediano dos grãos.

Para esse estudo foi feito uma coleta de 63 amostras de sedimentos marginais em diferentes pontos ao longo do rio, as amostras foram preparadas em laboratório e a preparação envolveu a secagem e a homogeneização das amostras para garantir a precisão das análises subsequentes. A granulometria foi determinada utilizando um granulômetro laser de alta precisão, que permite a medição detalhada da distribuição dos tamanhos das partículas dos sedimentos.

Em seguida, as características granulométricas foram analisadas, e os dados obtidos foram utilizados para construir as imagens CM. Essas imagens permitiram interpretar a

dinâmica dos sedimentos ao longo do rio, relacionando os parâmetros C e M com os processos de transporte e deposição influenciados por fatores como fluxo, declividade e turbulência.

Os resultados da análise granulométrica dos sedimentos marginais do rio Ivaí indicaram as seguintes características e padrões de transporte e deposição ao longo do curso do rio:

Na porção que abrange o Rio dos Patos e o alto curso do Rio Ivaí até Tereza Cristina, predominam altas declividades e forte turbulência, permitindo o transporte de sedimentos grosseiros, como partículas maiores que 1000 μm (areia muito grossa) e, em cheias intensas, até seixos de 5000 μm . Após as cheias, sedimentos finos são depositados em paleo-canais atrás dos diques marginais, onde a turbulência é menor, resultando em depósitos lamacentos.

Entre Tereza Cristina e Tapira, ocorre uma transição na dinâmica sedimentar. Após Tereza Cristina, sedimentos maiores que 1000 μm deixam de compor os depósitos marginais, mas partículas grossas ainda são transportadas durante cheias.

Na seção de Ubá do Sul, a redução da turbulência junto às margens favorece a deposição de sedimentos muito finos, como silte e argila, especialmente no recuo das águas. Após Tapira, com a menor declividade, o transporte por suspensão uniforme é limitado a partículas de até 200 μm (areia fina). No entanto, grandes cheias ainda conseguem depositar sedimentos de até 1500 μm (areia muito grossa) nas margens.

Na porção inferior do rio, a energia do fluxo diminui ainda mais, com depósitos marginais enriquecidos por partículas finas (100 μm a 6 μm), resultado da retenção pela vegetação e da menor turbulência. Também possui a influência do Rio Paraná, especialmente em Porto Jundiá que bloqueia a saída das águas do Ivaí durante cheias, reduzindo sua capacidade de transporte.

Um outro estudo, realizado por Kuerten, Santos e Silva (2009), buscou explorar as variações das características hidrossedimentares e a geomorfologia do leito do rio Ivaí ao longo de seu curso inferior, abrangendo um trecho de 110 km entre as cidades de Tapira e Icaraíma. A pesquisa fundamentou-se em metodologias como sondagens batimétricas, análises granulométricas e medições de velocidade de fluxo, proporcionando uma compreensão detalhada da interação entre as variáveis hidrológicas e suas implicações na morfologia do leito fluvial.

O estudo revelou que o rio Ivaí, em seu baixo curso, apresenta um padrão meândrico fortemente encaixado, com um índice de sinuosidade de 1,7. O canal flui predominantemente sobre arenitos da Formação Caiuá, onde afloramentos do substrato geram corredeiras. A

morfologia do leito varia significativamente em resposta às condições hidrológicas: durante períodos de baixas vazões, as seções transversais exibem uma topografia mais irregular, resultante do reprocessamento e da movimentação longitudinal de sedimentos. Já em períodos de altas vazões, a morfologia do leito torna-se mais suavizada, indicando um transporte de sedimentos mais intenso, sob a forma de dunas.

Em seções como Tapira e Herculândia, onde as velocidades e os gradientes de declividade são maiores, observou-se a presença de sedimentos menos selecionados, sugerindo um maior movimento longitudinal do material de fundo. Por outro lado, em Icaraíma, durante baixas vazões, a dinâmica é inversa, influenciada pelo efeito de barramento do canal secundário do rio Paraná.

A concentração média de sedimentos suspensos durante o período de estudo foi de 23,2 mg/L, com variações associadas às condições hidrológicas. A análise granulométrica dos sedimentos coletados evidenciou variações significativas, destacando que, sob fluxo baixo e homogêneo, a morfologia do leito tende a ser mais suavizada, enquanto, sob fluxo alto, formam-se feições mais irregulares, com sedimentos de menor grau de seleção.

O conjunto desses estudos realizados demonstram a complexidade da dinâmica hidrológica e sedimentológica do Rio Ivaí, características que estão intrinsecamente ligadas à extensão de sua bacia hidrográfica e à sua variabilidade ambiental. Os resultados apresentados nos oferecem uma visão abrangente sobre os padrões de vazão e transporte de sedimentos ao longo do rio, permitindo compreender como esses processos fluviais moldam a bacia hidrográfica em análise.

2.2 Utilização do sensoriamento remoto para estimativa de concentração de sedimentos

Nos dias atuais, a utilização de imagens orbitais tem se consolidado como uma ferramenta útil para o monitoramento ambiental. Sua capacidade de coletar informações em grande escala e com alta frequência temporal, torna-o eficiente para analisar e compreender fenômenos ambientais em diferentes contextos. No estudo de estimativa de CSS realizado no rio Teles Pires por Paulista et al. (2023) destacam três abordagens principais, cada uma com suas peculiaridades e aplicações específicas que complementam os métodos de coleta in loco.

Essas abordagens são descritas como:

Na abordagem empírica, são realizadas regressões simples ou múltiplas entre os valores de reflectância das imagens de satélite e os parâmetros de qualidade da água. Já na abordagem semi-empírica, o comportamento espectral dos parâmetros estudados deve ser medido, seja in loco ou em laboratório, com a seleção de bandas espectrais específicas para captar essa resposta. Por fim, a abordagem analítica consiste em uma avaliação física, na qual as propriedades ópticas inerentes específicas são estudadas ao longo de toda a coluna d'água e, posteriormente, essas características são relacionadas às propriedades ópticas aparentes dos parâmetros de qualidade da água. (Paulista et al. 2023, p. 02, tradução nossa).

No estudo mencionado, foi utilizada uma abordagem empírica, na qual foram realizadas análises de regressão entre os valores de reflectância obtidos a partir de imagens de satélite e as medições correspondentes de CSS coletadas em amostras de campo. Essa metodologia permitiu a criação de um modelo capaz de prever a CSS com base nos dados de reflectância derivados de satélite.

Os pesquisadores concentraram-se nos valores de reflectância de bandas espectrais específicas, especialmente na banda B4 (vermelha), do satélite Sentinel-2 A e B, que foi identificada como o melhor estimador para CSS. A relação entre a reflectância nessa banda e a CSS foi analisada para estabelecer um modelo de estimativa das concentrações de sedimentos. E dentre os modelos estudados, o exponencial foi o que demonstrou oferecer o melhor ajuste e maior precisão na previsão da CSS, apresentando os menores erros quando comparado aos dados observados, indicando que o modelo captura, de forma eficaz, a relação entre a reflectância na banda vermelha e os níveis de CSS.

No estudo realizado por Montanher e Souza Filho (2015) sobre a estimativa de concentração de sólidos em suspensão (CSS) no alto rio Paraná, analisando os efeitos da construção da barragem de Porto Primavera, desenvolveram-se três modelos para estimar a CSS com base em diferentes condições da água. Com esses modelos, calcularam-se a média e a variância da CSS para dois grupos de dados: antes e depois da construção da referida barragem. Em seguida, aplicou-se um t-test para determinar as diferenças significativas nos níveis de CSS.

O estudo demonstrou, após o barramento, uma diminuição significativa na CSS. A média da CSS antes da barragem era de 24,52 mg/L, com uma variância de 15,82 mg/L, enquanto após sua conclusão, a média da CSS caiu para 4,91 mg/L, com uma variância de 3,7 mg/L.

Peixoto, Guasselli e Pereira Filho (2018) conduziram uma pesquisa que investigou a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão no Rio Ivaí, localizado no estado do Rio Grande do Sul, por meio da análise de imagens obtidas pelo satélite Landsat 8. Para

alcançar esse objetivo, os pesquisadores avaliaram diferentes modelos matemáticos com o intuito de determinar aquele que proporcionasse o melhor ajuste entre os dados de concentração de sólidos em suspensão (TSS - Total Suspended Solids) e a reflectância espectral da água.

Os resultados indicaram uma forte correlação entre a concentração de TSS e a reflectância medida nas imagens de satélite. Entre os modelos testados, o modelo exponencial destacou-se por apresentar o melhor desempenho, com um coeficiente de determinação $R^2=0,84$, evidenciando sua robustez e precisão na estimativa dos níveis de sedimentos em suspensão.

Esses estudos ajudam a reforçar o potencial da utilização de sensoriamento remoto como uma ferramenta eficiente para o monitoramento de parâmetros de qualidade da água em ambientes fluviais. Além disso, os resultados contribuem para o aprimoramento das metodologias aplicadas no monitoramento de recursos hídricos, especialmente em regiões onde o monitoramento contínuo é essencial.

2.3 Aquisição e Análise de Dados: Coleta, Processamento e Dispersão

Com base nas características da bacia do Rio Ivaí, iniciar o estudo da CSS exige uma estratégia de coleta de dados que contemple suas variações espaciais e temporais. A CSS, influenciada por diversos fatores como clima, tipo de solo e uso da terra, exige monitoramento contínuo para se compreender as mudanças nas condições hidrológicas e ambientais de uma bacia hidrográfica. Nesse contexto, a Agência Nacional de Águas (ANA) oferece o Portal HidroWeb, parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), uma plataforma que reúne um amplo conjunto de dados hidrometeorológicos coletados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Esse banco de dados fornece informações essenciais, como níveis de rios, vazões, precipitação, dados climáticos, qualidade da água e registros de sedimentação (ANA, [s.d.]).

De acordo com a metodologia descrita no Guia de Práticas Sedimentométricas, elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e adotado como referência pela ANA, os métodos de coleta de dados de CSS realizados de forma direta (ou *in loco*) consistem em métodos de amostragem por integração na vertical. Na amostragem por integração na vertical, a área da seção transversal do rio é dividida em uma série de verticais,

cujo número e espaçamento dependem das características hidrológicas e geomorfológicas do rio, como largura, profundidade, vazão e padrão de fluxo (CARVALHO et al., 2000).

No entanto, é comum encontrar lacunas temporais nos dados das estações disponíveis, gerando inconsistências que podem ser atribuídas a falhas na coleta, manutenção das estações ou problemas técnicos, comprometendo a continuidade e a qualidade das séries históricas. Essas lacunas podem dificultar a avaliação precisa das variações da CSS, uma vez que a falta de registros contínuos impede a identificação de tendências e padrões.

Para suprir tais lacunas, pode-se utilizar os modelos de estimativa de CSS através da utilização de imagens orbitais. No caso foram utilizados os satélites do programa Landsat: 5, 7 e 8. Esses satélites possuem os sensores TM (Landsat 5), ETM+ (Landsat 7) e OLI (Landsat 8), que possuem várias faixas espectrais abrangendo o espectro visível (azul, verde e vermelho), o infravermelho próximo, médio e termal. Essas bandas espectrais alinhadas com índices métricos e técnicas de modelagem estatísticas possibilitam o desenvolvimento de estudos de sedimentação dos corpos hídricos, monitoramento de corpos hídricos, monitoramento ambiental entre outras atividades.

Para o modelo de estimativa de CSS, utilizamos a reflectância de quatro bandas espectrais principais que abrangem a região do espectro eletromagnético entre 400 e 900 nm (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), sendo elas consideradas as mais adequadas para aplicações de sensoriamento remoto de ambientes aquáticos (BARBOSA, NOVO, MARTINS, 2019).

Idealmente, à medida que a CSS aumenta, há um aumento correspondente no retroespalhamento da REM, resultando em um aumento da reflectância do corpo d'água. Essa relação é observada em experimentos controlados, mas, na prática, quando se relacionam dados de CSS com dados de reflectância, há uma dispersão significativa dos dados (MONTANHER, 2013).

Diversos fatores contribuem para essa dispersão nos dados. Entre os principais, destacam-se a reflexão especular REM que ocorre na superfície da água (sem interação com os componentes internos) correções atmosféricas inadequadas, baixa resolução radiométrica dos sensores utilizados e a heterogeneidade das substâncias presentes nas amostras coletadas em diferentes locais e momentos. Além disso, a presença de outros constituintes opticamente ativos (COAs), como fitoplâncton e material orgânico dissolvido, interfere diretamente na interação entre a REM e os sedimentos em suspensão (MONTANHER, 2013).

Sobretudo, é importante ressaltar os processos de atenuação na atmosfera, antes e depois de interagirem com corpos d'água, pois apresentam um caráter perturbador para

análise. Isso ocorre porque, além de não fornecerem informações diretas sobre as massas d'água, eles interferem nos dados que vêm da coluna d'água. Para mitigar ou eliminar esses efeitos indesejados, da atmosfera utilizam-se métodos de remoção ou redução durante a aplicação de códigos de máscara no Google Earth Engine (GEE), que ajudam a filtrar as interferências atmosféricas e melhorar a precisão das informações extraídas das imagens (BARBOSA, NOVO, MARTINS, 2019).

Existem também os processos de interação e atenuação que acontecem na superfície da água, em que pode ser utilizada a banda do infravermelho ondas curtas para realizar a remoção do efeito de *sun glint*, ou reflexão especular, que representa o espelho d'água causado pela reflexão direta da luz solar na superfície da água. Esses efeitos não possuem relação com os elementos em suspensão ou dissolvidos e pode distorcer a interpretação dos dados de CSS (MONTANHER, 2013).

Modelos empíricos e algoritmos semianalíticos são frequentemente utilizados para estimar a CSS a partir de dados de reflectância obtidos por sensores remotos. A relação entre a reflectância e a CSS é estabelecida através de correlações estatísticas, permitindo a quantificação da concentração de sólidos suspensos em corpos d'água (BARBOSA, NOVO, MARTINS, 2019). No entanto, para conduzir esse processo de forma eficiente, é essencial realizar um cruzamento entre as datas dos registros de CSS das estações e os dados de reflectância capturados pelos satélites. Para tanto, é importante compreender o comportamento espectral da reflectância, garantindo a aplicação adequada dos modelos e a obtenção de resultados confiáveis.

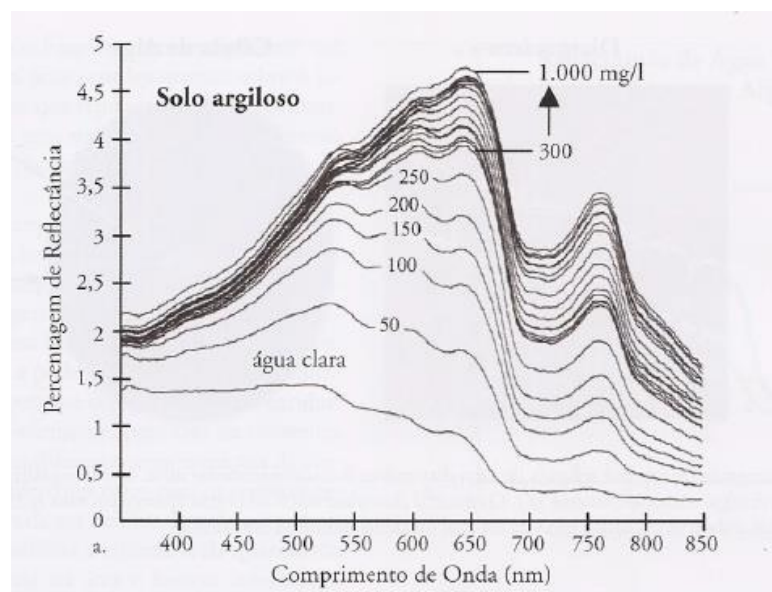
2.4 Comportamento de reflectância

A relação entre a CSS e a reflectância vem sendo estudada desde a década de 1970 para compreender os padrões de turbidez em corpos d'água. Diferentes faixas do espectro eletromagnético oferecem variações na sensibilidade para identificar e quantificar esses sedimentos, sendo que alguns comprimentos de onda específicos apresentam respostas mais adequadas conforme variam os níveis de CSS.

Jensen (2011), por meio de experimentos laboratoriais com sedimentos de solos siltosos e argilosos, apresentou nas Figuras 2 e 3 a correlação entre a CSS e a reflectância. Concluiu-se que a reflectância aumenta no espectro visível à medida que há maior acúmulo de

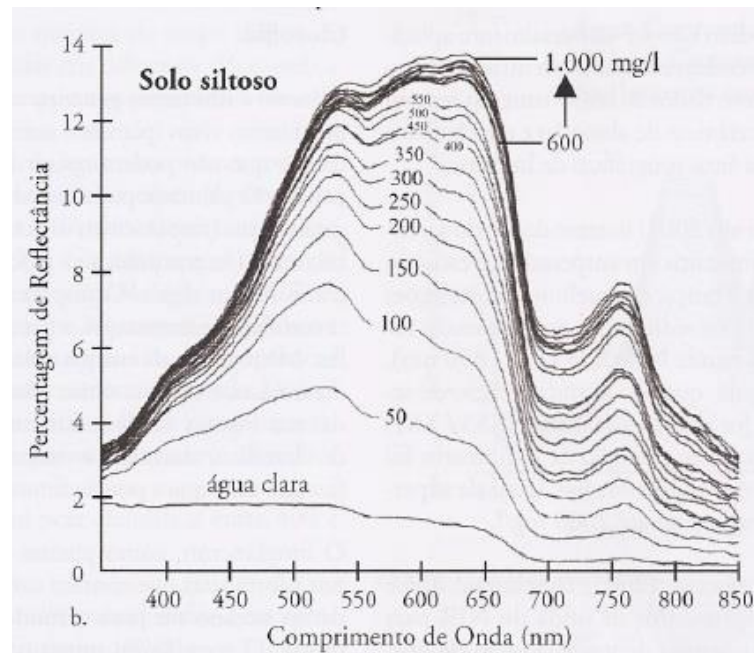
CSS no corpo d'água. Dentro desse espectro, a faixa de comprimento de onda entre 580 e 690 nm mostrou-se eficaz para fornecer informações relevantes sobre o tipo de sedimento em suspensão. Já a faixa entre 714 e 880 nm (infravermelho próximo) demonstrou maior sensibilidade para estimar a quantidade de sedimentos em suspensão, devido a resposta da reflectância a determinados níveis de concentração de sedimentos, possibilitando uma análise mais precisa dos níveis de turbidez.

Figura 1 - Medidas in situ de reflectância espectral de água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimento de solo argiloso variando de 0 a 1000 mg/L.



Fonte: Jensen, 2011.

Figura 2 - Medidas in situ de reflectância espectral de água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimento de solo siltoso variando de 0 a 1000 mg/L.



Fonte: Jensen, 2011.

Contudo, nesta pesquisa, os dados não foram coletados in loco e abrangem uma gama de variedade de sedimentos encontrados no rio Ivaí. Whitlock et al. (1982 apud MONTANHER, 2013) destaca que esses fatores podem gerar incertezas nos valores de radiância, causadas por ruídos ou limitações radiométricas, que representam fatores restritivos para o uso de regressão que é amplamente utilizada para análise de dados de sistemas aquáticos, para estabelecer relações entre a reflectância e a CSS.

Montanher (2013) também cita estudos de Holyer (1978), Lodhi et al. (1997) e Ritchie & Shiebe (2000), apontando que, conforme a concentração de CSS aumenta, o pico de reflectância se move para comprimentos de onda mais longos, enquanto os comprimentos de onda mais curtos se tornam menos sensíveis às alterações na concentração de CSS. Esta saturação em comprimentos de onda mais curtos restringe a precisão das medições radiométricas feitas por sensores TM como no Landsat 5, que, apesar de terem bandas espectrais fixas, nem sempre cobrem os comprimentos de onda ideais para cada nível de CSS. Portanto, a habilidade de identificar diversos níveis de CSS se altera ao longo do espectro. Apesar de bandas específicas poderem ser apropriadas para concentrações menores, sua sensibilidade decresce para concentrações mais elevadas até que se tornem ineficazes. E o inverso ocorre no espectro do infravermelho.

3 METODOLOGIA

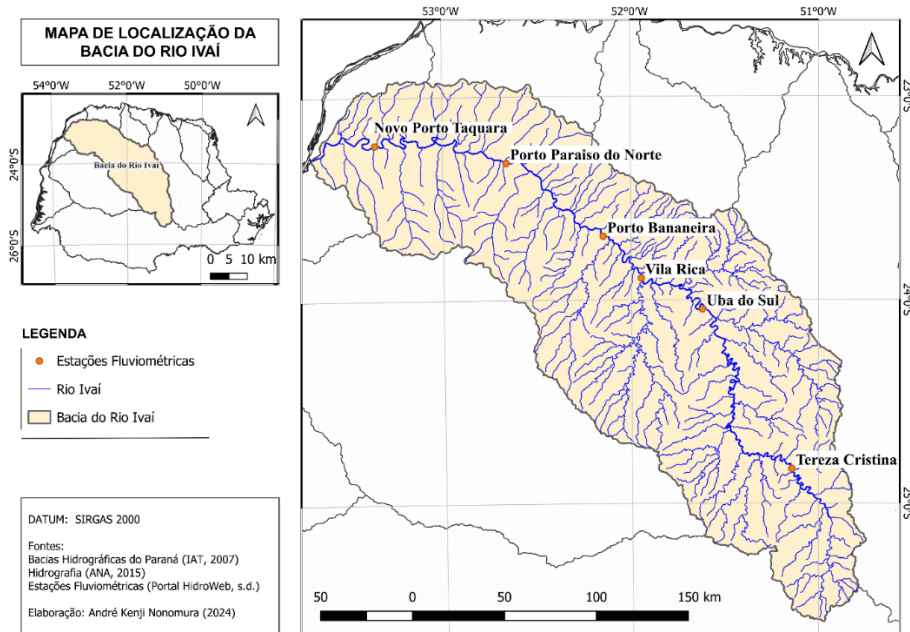
3.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Ivaí (Figura 1), situada na região sul do Brasil, no estado do Paraná, ocupa uma extensa área de 36.587 km². Localiza-se entre as coordenadas de 22°56'17" a 25°35'27" de latitude sul e 50°44'17" a 53°41'43" de longitude oeste. O Rio Ivaí percorre 680 km e é um importante afluente da margem esquerda do curso superior do Rio Paraná, com uma vazão média diferente ao longo de seu percurso (DESTEFANI, 2005).

Seguindo o percurso do rio da montante até o exutório, apresentou-se os seguintes dados de cada estação. Na estação Tereza Cristina, a vazão média é de 77 m³/s. Na sequência, na estação Ubá do Sul, a vazão média atinge 276 m³/s, enquanto na estação Vila Rica é registrada uma vazão média de 431 m³/s. Na estação Porto Bananeira, a média é de 571 m³/s, seguida por Porto Paraíso do Norte, com 599 m³/s. Por fim, no Novo Porto Taquara, a vazão média chega a 728 m³/s, evidenciando o aumento contínuo da vazão à medida que o rio se aproxima do exutório (DESTEFANI, 2005).

Sua nascente se origina no sudeste do estado, a partir da junção dos rios dos Patos e São João, na Serra da Boa Esperança, situada no segundo planalto paranaense, ambos com altitudes superiores a 800 m e suas águas seguem até desaguar no Rio Paraná, a cerca de 230 m de altitude (DESTEFANI, 2005).

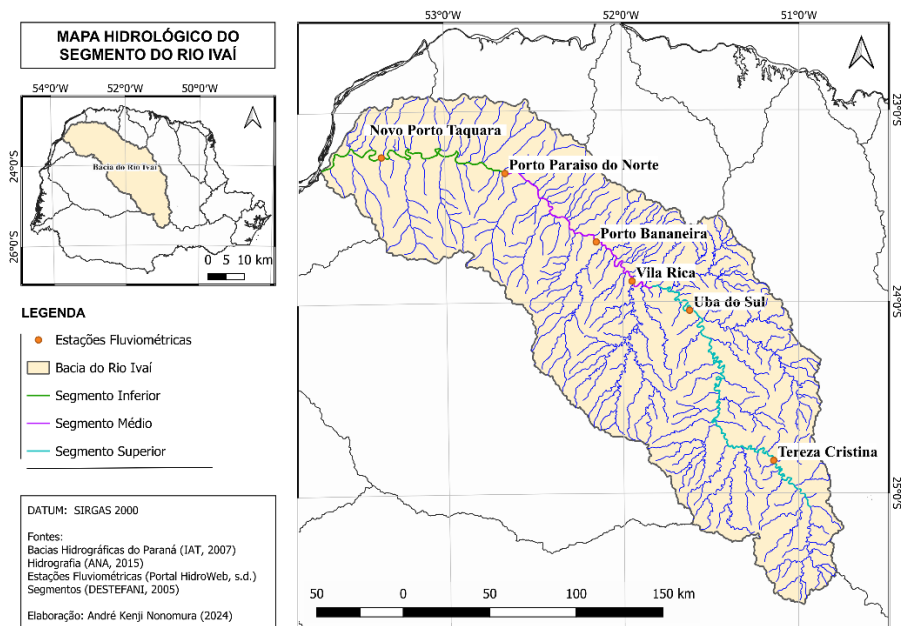
Figura 3 - Mapa de localização da Bacia do Rio Ivaí



Fonte: Autor, 2024.

Devido à sua grande extensão e à diversidade de elementos naturais que influenciam a hidrologia, a bacia hidrográfica do rio Ivaí apresenta uma ampla variedade de características, pode ser subdividida em três segmentos principais, definidos por suas características geológicas, geomorfológicas, topográficas e de declividade. De acordo com Destefani (2005) os segmentos podem ser definidos da seguinte forma (Figura 4):

Figura 4 - Mapa de segmentos do Rio Ivaí



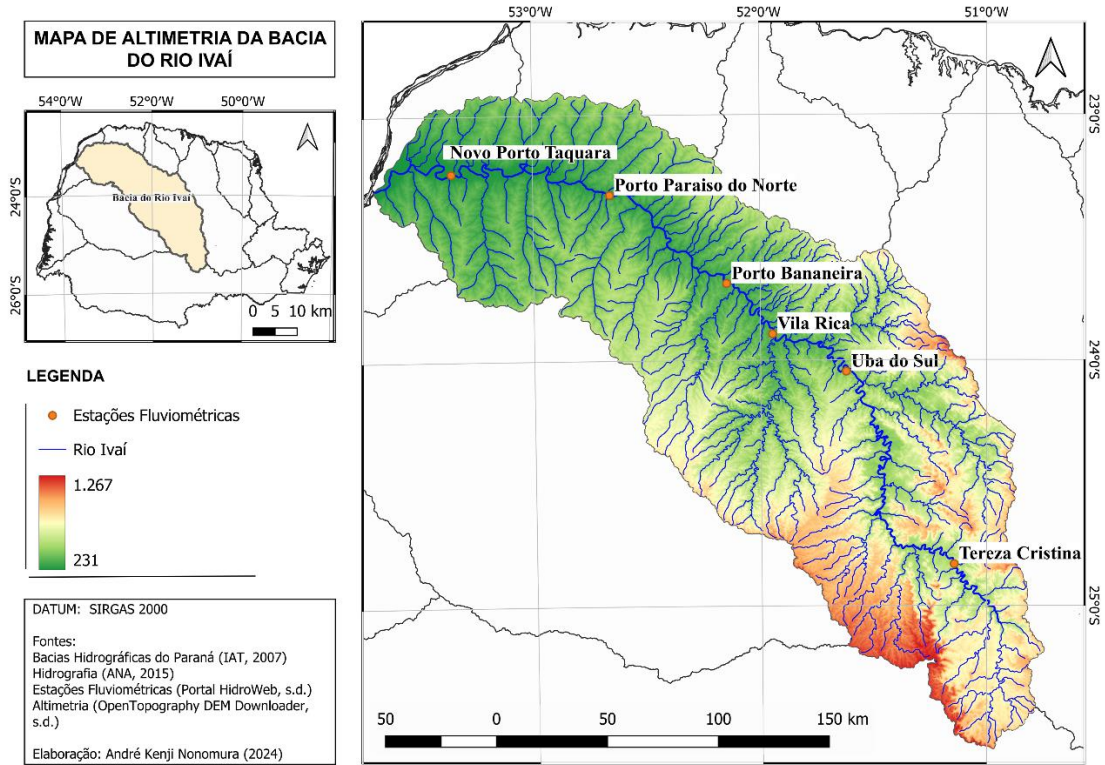
Fonte: Autor, 2025.

- **Segmento Superior:** O rio Ivaí se estende por cerca de 440 km, da nascente até a confluência com o rio Alonso, apresentando as maiores declividades da bacia, especialmente entre a nascente do rio dos Patos e o rio São João, a mais de 900 m de altitude. Nesse trecho, o rio desce rapidamente, com quedas abruptas e declividades elevadas, que se suavizam ao longo do percurso. Até a estação fluviométrica de Ubá do Sul, o rio Ivaí desce 120 m ao longo de 290 km e, no fim do segmento superior, o desnível é de 80 m distribuídos em 54 km. Possui uma geologia marcada por rochas sedimentares da Bacia do Paraná, como argilitos e calcários, formando um relevo acidentado, com morros e mesetas, e áreas de corredeiras.
- **Segmento Médio:** Com extensão de aproximadamente 170 km, o segmento médio se estende desde a estação fluviométrica de Vila Rica até um pouco além de Porto Paraíso do Norte, entre altitudes de 300 m e 250 m. Este trecho possui uma declividade média de apenas 0,03%, diminuindo gradualmente em direção a jusante, com um desnível total de 50 m. Neste segmento, o rio Ivaí corre sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral, em uma região de relevo de menor energia, com morros que se tornam mais arredondados à medida que se avança rio abaixo.
- **Segmento Inferior:** Compreende um percurso de 164 km que tem seu início nas áreas de planície até a foz do rio Ivaí, entre altitudes de 250 m e 230 m. Neste trecho, o rio passa a escoar sobre os arenitos da Formação Caiuá e sedimentos aluvionares da planície, possuindo uma declividade muito baixa, de aproximadamente 0,01%, o que confere ao rio uma topografia bastante suave, sem a presença de grandes quedas ou corredeiras. A planície aluvial se torna gradativamente mais larga ao longo deste trecho, variando de 3 a 5 km de largura, chegando a entre 6 e 10 km próximos da foz sendo uma característica genética do rio Paraná.

Por possuir grande extensão o transporte e a deposição de sedimentos do Rio Ivaí e seus afluentes variam significativamente ao longo de seu curso, influenciados pela turbulência, declividade e dinâmica das cheias. Essas condições determinam a granulometria dos sedimentos transportados e sua disposição nos diferentes trechos da bacia.

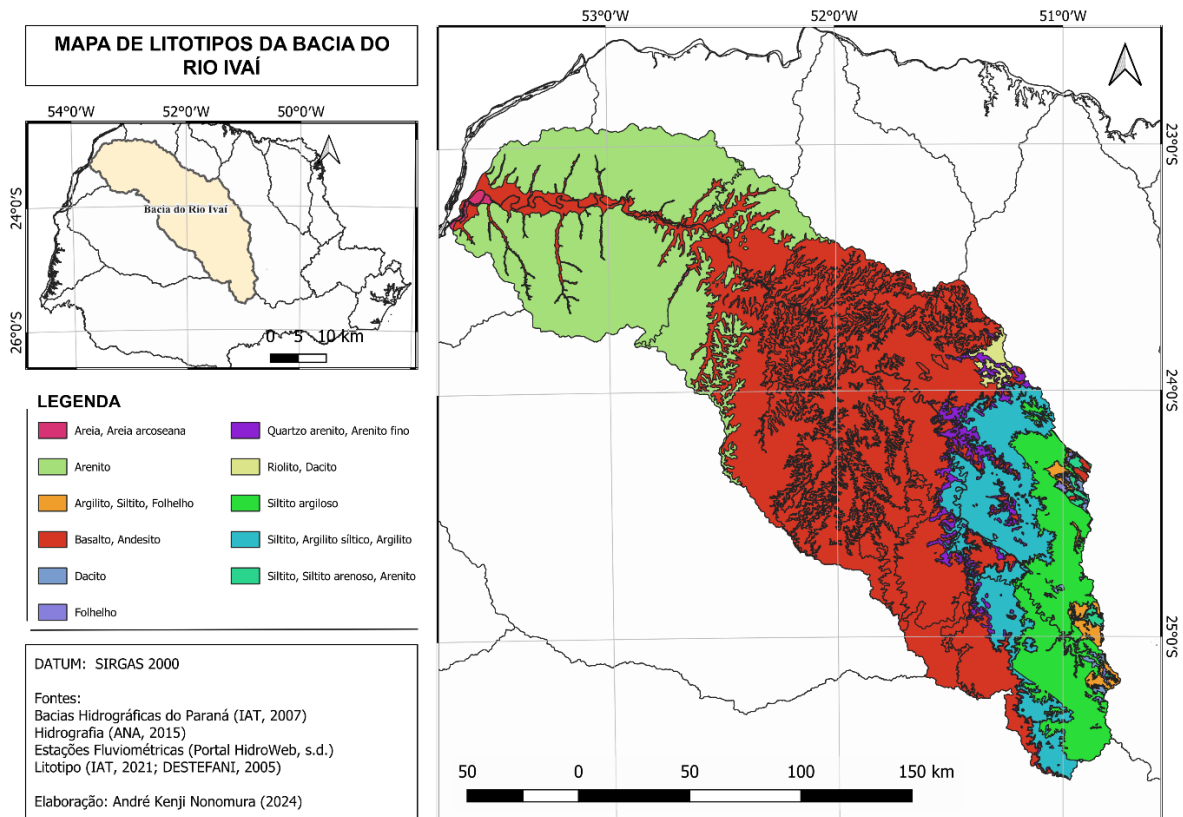
E com base nos dados sobre os segmentos, serão apresentados os mapas de altimetria (Figura 5) e litotipo (Figura 6), com o objetivo de facilitar a visualização e compreensão das características físicas e geológicas da bacia.

Figura 5 - Mapa de altimetria da bacia do Rio Ivaí



Fonte: Autor, 2025.

Figura 6 - Mapa de litotipos da bacia do Rio Ivaí



Fonte: Autor, 2025.

3.2 Coleta e tratamento de dados

Para os dados *in loco*, foram utilizadas séries históricas disponibilizadas pelo HidroWeb, que permitem analisar as variações de longo prazo de CSS e identificar padrões de deposição de sedimentos estimados futuramente. No caso específico do Rio Ivaí, existem um total de 17 estações fluviométricas distribuídas ao longo de seu curso. Dentre elas, apenas seis estações possuem séries históricas de dados referentes à CSS. As estações são:

Tabela 1 - Estações Fluviométricas do Rio Ivaí

Estação	Código	Latitude	Longitude	Qtd. dados	Intervalo temporal
Tereza Cristina	64625000	-24.83	-51.1422	109	1982 / 2018
Ubá do Sul	64655000	-24.0417	-51.6228	120	1982 / 2018
Vila Rica	64660500	-23.9	-51.9511	91	1990 / 2018
Porto Bananeira	64675002	-23.6747	-52.1172	65	1980 / 2008
Porto Paraíso do Norte	64685000	-23.3244	-52.6653	115	1977 / 2018
Novo Porto Taquara	64693000	-23.1994	-53.3156	3467	1974 / 2018

Fonte: Autor, 2024

Para a aquisição de dados de reflectância, utilizou-se o GEE, obtendo o máximo de imagens disponíveis de uma área delimitada próxima às estações fluviométricas, com trechos de rio que possuíssem ao menos 100 m de largura. Esse critério foi estabelecido para minimizar o risco de contaminação dos dados com informações das margens do rio, considerando que as imagens possuem uma resolução espacial de 30 m. Assim, ao selecionar trechos com largura suficiente, foi possível focar nas características centrais do corpo d'água, garantindo uma análise mais precisa da CSS sem interferência dos elementos marginais.

Para conduzir esse processo, será necessário realizar um cruzamento entre as datas dos registros de CSS das estações e os dados de reflectância capturados pelos satélites. Para garantir maior precisão na modelagem, apenas registros de reflectância com até dois dias de diferença em relação às datas das medições de CSS serão considerados, assegurando uma

melhor correspondência e compatibilidade entre os conjuntos de dados. Além disso, é necessário realizar o tratamento dos dados, incluindo a remoção dos efeitos de *sunlint* por meio de uma razão de bandas, a exclusão de valores de reflectância negativos e a eliminação de dados inconsistentes. Exemplos de inconsistências incluem valores de reflectância baixos associados a concentrações muito altas de CSS e, inversamente, valores de reflectância elevados vinculados a concentrações baixas de CSS.

3.3 Modelo de regressão

Como detemos dados CSS obtidos por estações fluviométricas, será utilizada uma abordagem empírica baseada em modelos estatísticos de regressão. Esse método é amplamente empregado para modelar e expressar a relação entre reflectância de REM e a CSS permitindo uma análise detalhada da interação do conjunto (MONTANHER, 2013). O modelo de regressão linear simples, frequentemente aplicado neste contexto, é descrito pela seguinte equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \xi$$

Em que:

Y = variável dependente;

β_0 = intercepto populacional;

β_1 = inclinação populacional;

X = variável independente;

ξ = desvio do Y em relação a seu valor estimado pela reta ajustada (componente aleatório).

O modelo de regressão linear simples apresentado utiliza apenas uma variável independente para explicar a variabilidade da variável dependente. No entanto, a análise dos gráficos, constatou que o modelo de regressão logarítmica era o mais adequado para representar o comportamento espectral da reflectância, devido aos dados apresentarem uma taxa de variação inicial mais acentuada que diminui progressivamente à medida que a variável independente (CSS) aumenta. A equação do modelo pode ser expressa como:

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

Onde:

y = variável dependente (no caso, a reflectância);

x = variável independente (por exemplo, comprimento de onda ou outro fator relacionado às bandas espectrais);

a = intercepto do modelo (valor de y quando $x = 1$, já que $\ln(1) = 0$);

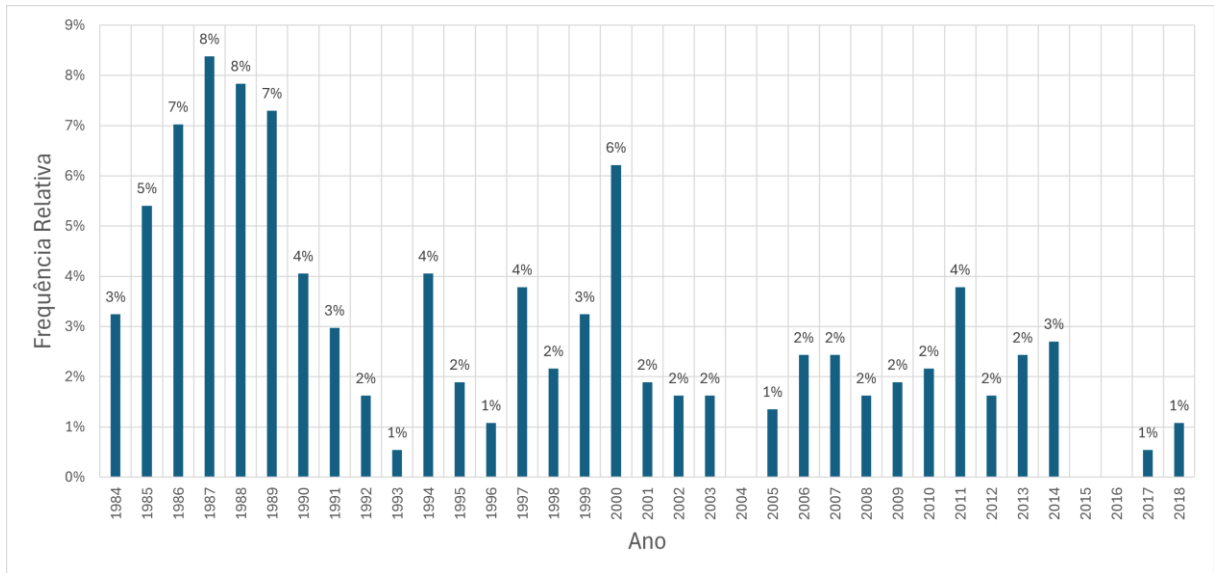
b = coeficiente de inclinação, que indica a taxa de mudança de y com relação ao logaritmo de x ;

$\ln(x)$ = logaritmo natural da variável independente.

4 RESULTADOS

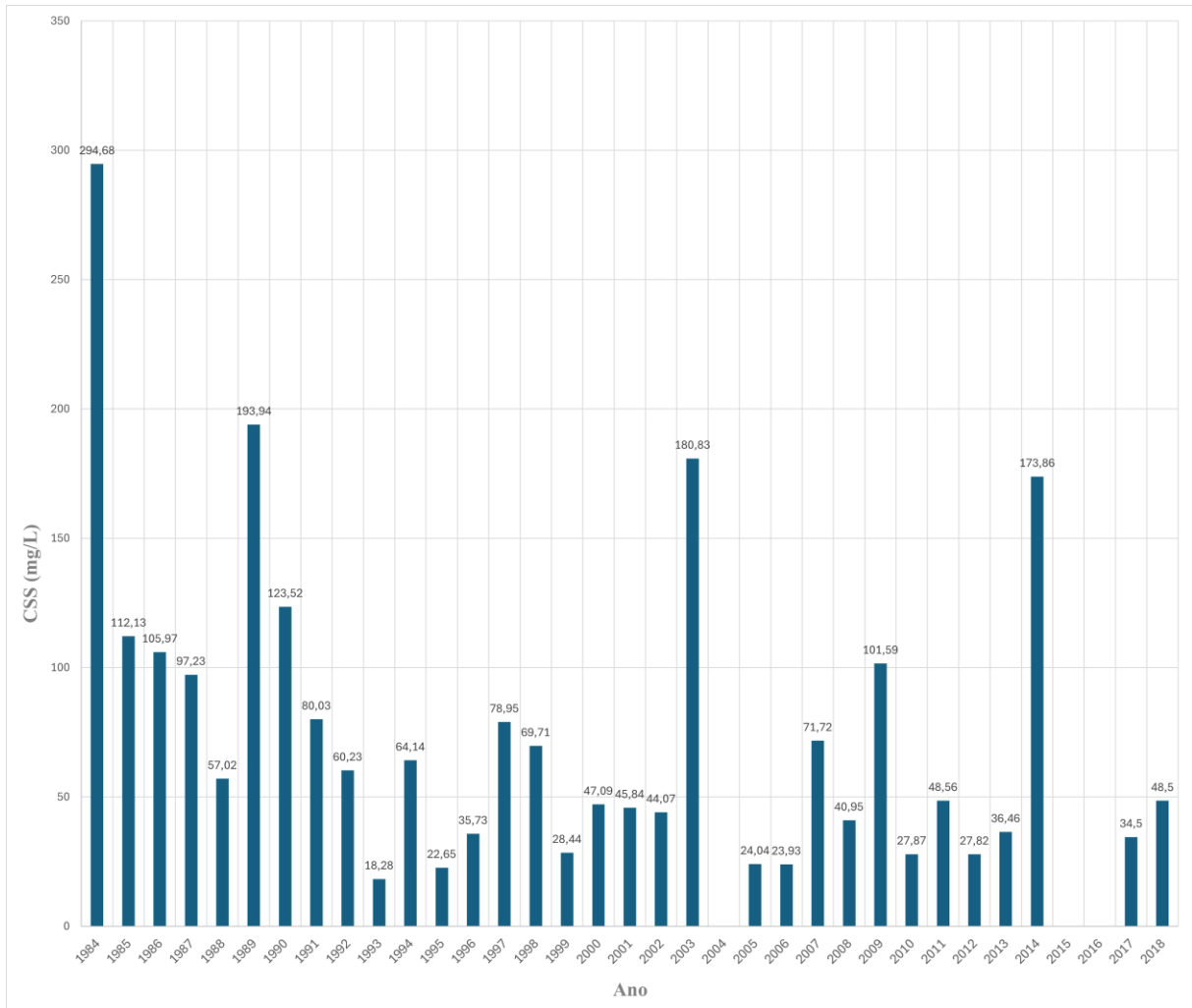
A série histórica disponível compreendeu o período de 1984 a 2018, com exceção dos anos de 2004, 2015 e 2016, que não possuíam registros. A seleção deste intervalo temporal foi fundamentada na compatibilidade com os dados provenientes dos sensores a bordo dos satélites Landsat 5, 7 e 8, cujas imagens orbitais foram utilizadas para análise. Com base nos dados obtidos, foi elaborado um gráfico na Figura 4 representando a frequência relativa de dados de CSS por ano todas as estações hidrométricas e o gráfico na Figura 5 representando as médias anuais de CSS.

Figura 7 - Frequência relativa de dados de CSS obtidos in situ (ANA)



Fonte: Autor, 2024.

Figura 8 - Médias anuais de CSS



Fonte: Autor, 2024.

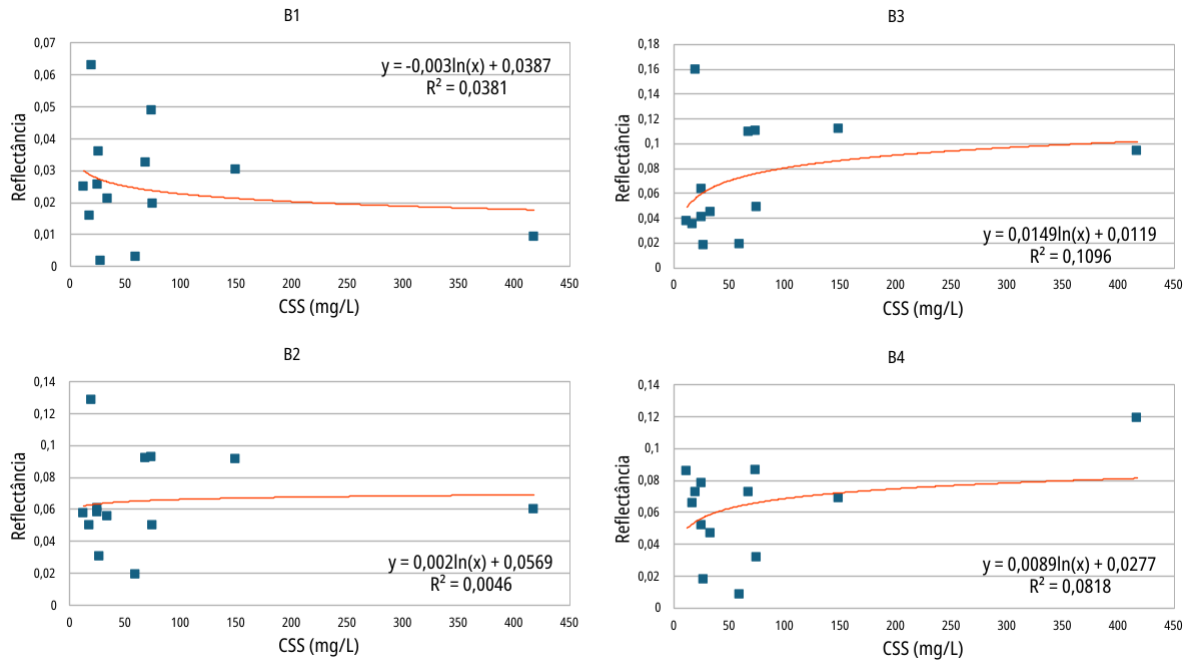
Durante o período de 1984 a 1990, observou-se um maior número de CSS, o que pode ser atribuído, em grande parte, à alta frequência de coletas realizadas na estação Novo Porto Taquara, que abrangeu amostras registradas mais constantemente em comparação a outras estações.

Com os dados filtrados, foram confeccionados gráficos de regressão para as quatro bandas espectrais recomendadas para pesquisa de sensoriamento remoto de corpos hídricos como discutido ao longo da metodologia: B1 (Azul), B2 (Verde), B3 (Vermelho) e B4 (Infravermelho).

Após a aplicação de todos os filtros, correções e modelagem, obtiveram-se os seguintes gráficos separados por cada estação e no final um gráfico unindo os dados de todas

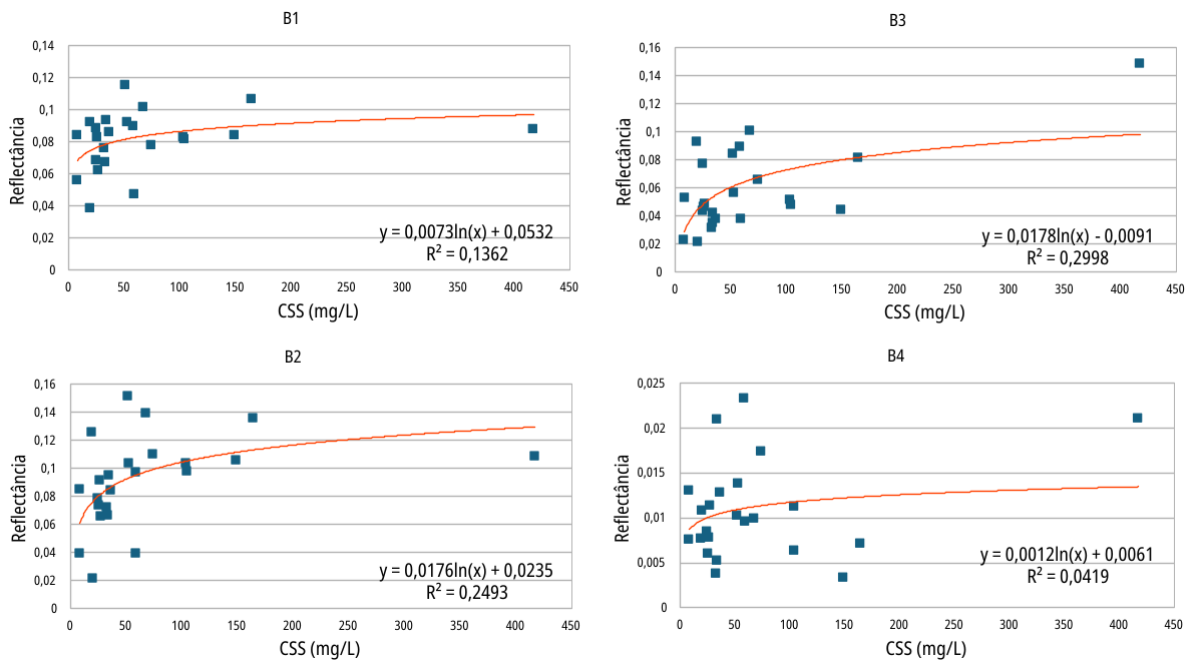
as estações juntas. Para complementar, os valores de R² obtidos e a quantidade de dados utilizados por cada estação, após o processamento, estão detalhados na Tabela 2.

Figura 9 - Regressão logarítmica da estação Teresa Cristina



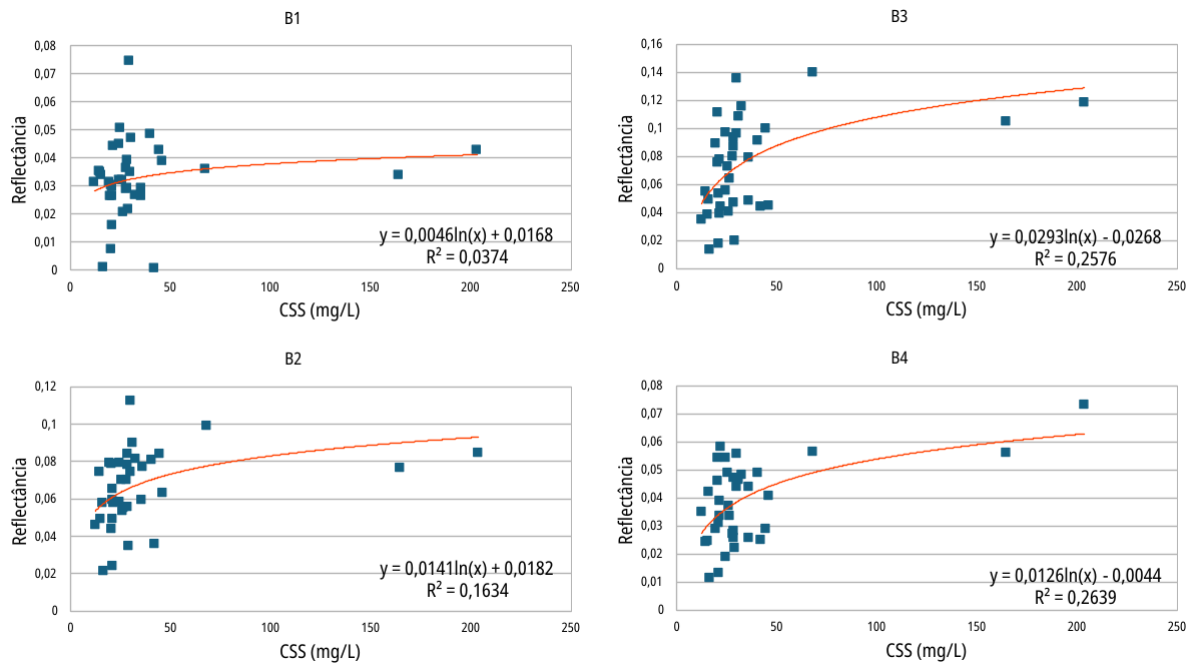
Fonte: Autor, 2024.

Figura 10 - Regressão logarítmica da estação Ubá do Sul



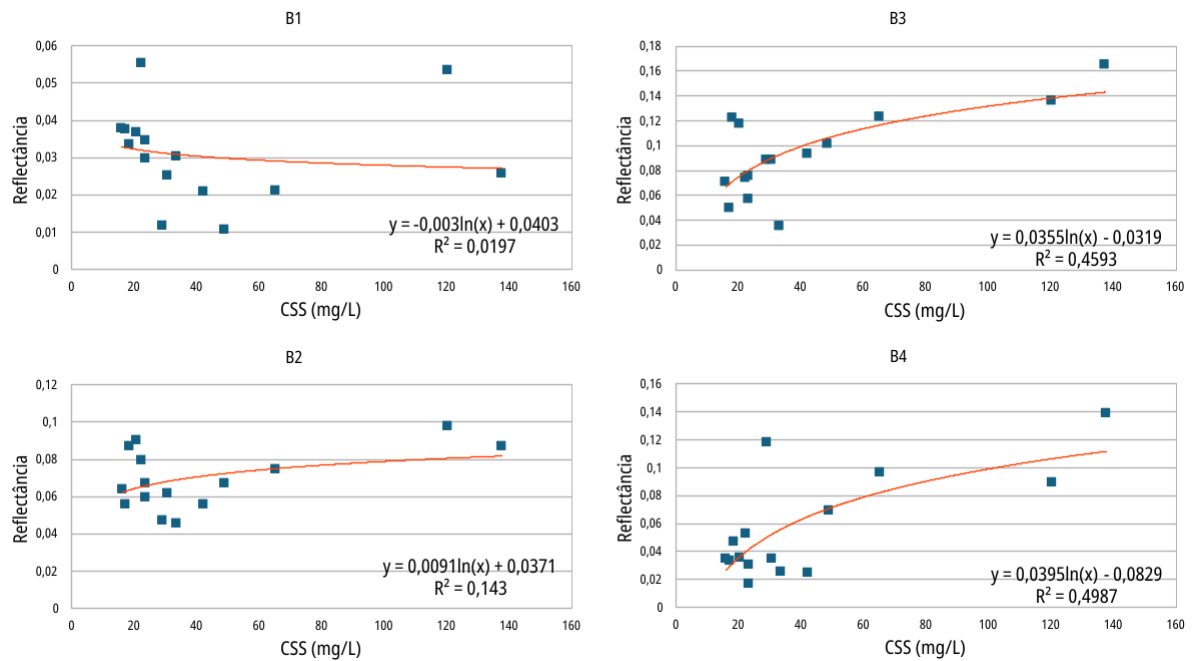
Fonte: Autor, 2024.

Figura 11 - Regressão logarítmica da estação Vila Rica



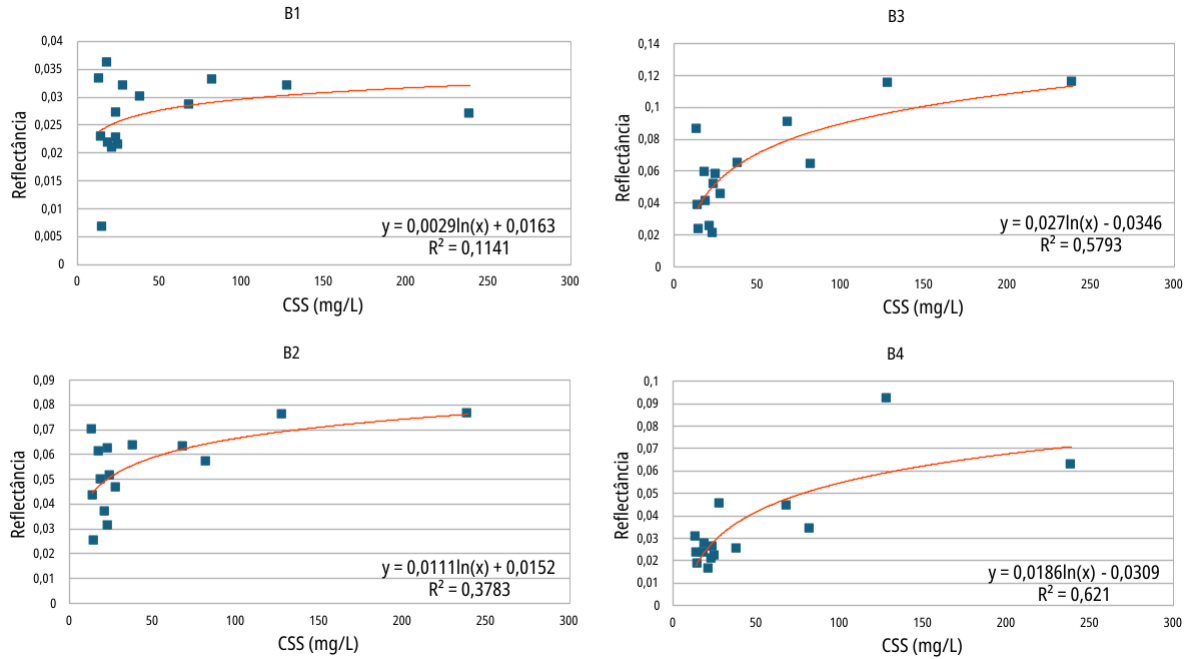
Fonte: Autor, 2024.

Figura 12 - Regressão logarítmica da estação Porto Bananeira



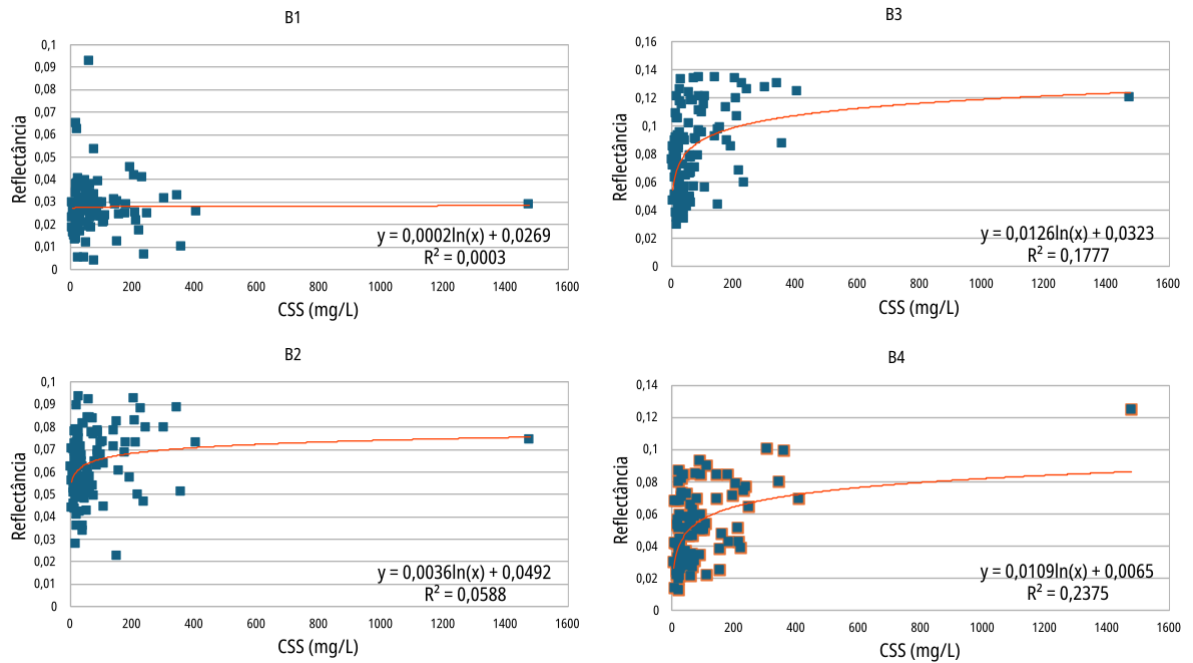
Fonte: Autor, 2024.

Figura 13 - Regressão logarítmica da estação Porto Paraíso do Norte



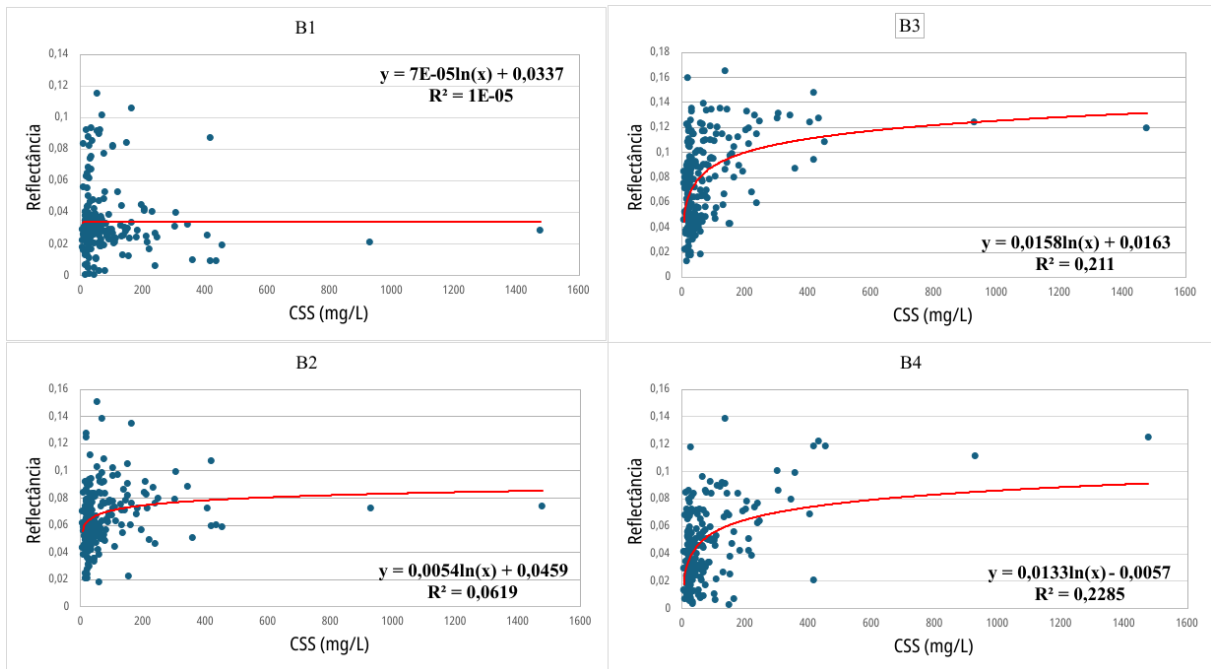
Fonte: Autor, 2024.

Figura 14 - Regressão logarítmica da estação Novo Porto Taquara



Fonte: Autor, 2024.

Figura 15 - Regressão logarítmica de todas estações juntas



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 2 - Valores de R² e quantidade de dados utilizados por estação após correções, filtros e modelagem.

Estação / Bandas	B1	B2	B3	B4	Qty. Dados Utilizados
Teresa Cristina	0,0381	0,0046	0,1096	0,0818	19
Ubá do Sul	0,1362	0,2493	0,2998	0,0419	23
Vila Rica	0,0374	0,1634	0,2576	0,2639	36
Porto Bananeira	0,0197	0,143	0,4593	0,4987	15
Porto Paraíso do Norte	0,1141	0,3783	0,5793	0,621	15
Novo Porto Taquara	0,0003	0,0588	0,1777	0,2375	112
Todas as estações conjuntas	1E-05	0,0619	0,211	0,2285	220

Fonte: Autor, 2025.

5 DISCUSSÃO

A partir dos resultados, os valores de R^2 encontrados podem ser considerados como uma fraca correlação, significando que o modelo tem baixa capacidade de explicar a variabilidade dos dados analisados. Os resultados variaram entre 1×10^5 (para o parâmetro B1, considerando o gráfico da Figura 12 da união de todas estações) e 0,621 (para B4, no gráfico da Figura 10 da estação de Porto Paraíso do Norte). Esses números refletem uma significativa limitação de predição do modelo, especialmente para os menores valores de R^2 , que indicam quase nenhuma relação explicativa entre os dados modelados e os observados.

Ao comparar os valores máximos de CSS observados nas estações, nota-se uma diferença significativa que influencia o desempenho dos modelos. Por exemplo, o valor máximo próximo a 1500 mg/L em Novo Porto Taquara contrasta com os 140 mg/L registrados em Porto Bananeira. Em geral, estações com valores mais elevados, como Porto Taquara, tendem a apresentar maior variabilidade nos dados, o que resulta em maior dispersão nos ajustes dos modelos e, conseqüentemente, valores mais baixos de R^2 .

Por outro lado, os melhores resultados de R^2 foram observados nas estações de Porto Bananeira e Porto Paraíso do Norte. Nessas estações, os dados de CSS se concentraram majoritariamente entre 10 mg/L e 50 mg/L, com poucos valores extremos e apenas dois registros acima de 100 mg/L. Essa menor variabilidade favoreceu na consistência do modelo, refletindo valores mais altos de R^2 .

Em contraste, as demais estações, que apresentaram maior variabilidade de valores altos e baixos nos registros de CSS, demonstraram valores mais baixos de R^2 . Esse padrão reforça a influência da amplitude de variação dos dados de CSS no desempenho dos modelos, indicando que maior estabilidade nos dados pode melhorar a qualidade do ajuste, especialmente em bandas de maior comprimento de onda, onde o modelo apresenta melhor desempenho.

Destaca-se também que os valores mais baixos de R^2 predominaram nas bandas B1 e B2. Esse comportamento já era esperado, conforme apontado na metodologia, que ressaltam que essas bandas apresentam menor correlação entre a reflectância espectral e os índices de CSS. Essa limitação pode ser atribuída ao fato de que essas bandas são mais suscetíveis a ruídos atmosféricos, como dispersão e absorção da luz, o que compromete a precisão das medições (BARBOSA et al, 2019).

Em contrapartida, valores mais elevados de R^2 foram encontrados nas bandas B3 e, especialmente, na banda B4, que apresentou o melhor desempenho em termos de correlação. Essas tendências foram consistentes em todas as estações observadas, evidenciando que o aumento do comprimento de onda está diretamente associado a uma melhoria no desempenho dos modelos (MONTANHER, 2013).

Outro fator que pode ser considerado para os resultados é a localização dos pontos de coleta, que varia ao longo do percurso do rio. A posição geográfica das estações pode influenciar diretamente os dados de reflectância devido às características específicas de cada trecho do rio, como a composição sedimentar, a energia hídrica e a granulometria dos sedimentos.

Os dados das estações Teresa Cristina e Ubá do Sul, localizadas próximas à montante do Rio Ivaí, apresentam maior inconsistência nos valores de reflectância em comparação com as demais estações. Esse comportamento pode ser atribuído à grande variabilidade litológica presente no segmento superior da bacia (Figura 6). Essa região é caracterizada por uma diversidade de litotipos, incluindo siltitos, argilitos siltitos, argilitos, quartzitos, arenitos, arenitos finos e folhelhos. Essa heterogeneidade litológica influencia diretamente as propriedades ópticas da superfície, uma vez que a reflectância é sensível às características físicas e químicas dos materiais superficiais, como textura, cor e composição mineralógica. Logo, em áreas com alta variabilidade litológica, a reflectância pode variar significativamente devido às diferentes respostas espectrais de cada litotipo.

Conforme o rio se aproxima de sua porção intermediária, os valores de reflectância começam a se estabilizar, possibilitando melhores ajustes nos modelos. Nessa região, os sedimentos são mais recentes e menos consolidados, o que os torna mais suscetíveis à erosão e ao transporte devido à maior energia hídrica. Na estação Porto Bananeira, por exemplo, a média de vazão é significativamente maior, atingindo 571 m³/s. Essa condição provavelmente resulta em uma menor competência de transporte, o que favorece a deposição de partículas maiores e reduz a fragmentação dos sedimentos. Consequentemente, há um predomínio de partículas mais finas em suspensão, que são transportadas com maior facilidade, contribuindo para o aumento dos níveis de turbidez do rio.

Essa tendência pode estar influenciando as estações localizadas ao longo do curso intermediário do rio, associando-se a uma redução na variabilidade dos padrões de reflectância devido à maior homogeneidade nos sedimentos transportados. Além disso, é provável que o modelo seja mais eficiente em condições com maiores concentrações de sedimentos e talvez mais adaptado à mineralogia predominante no baixo curso do rio do que

no alto curso, onde as características sedimentológicas e hidrodinâmicas podem diferir significativamente.

Na estação de Novo Porto Taquara, observa-se um cenário particular devido à predominância de dados coletados nas décadas de 1980. Durante esse período, havia registros quase diários por determinado intervalo de tempo, mas a confiabilidade desses dados pode ser questionada. Essa incerteza está associada, em parte, à dependência de satélites mais antigos, como o Landsat 5. Além disso, a estação encontra-se próxima ao exutório, na baixa vertente do rio, onde ocorrem efeitos de retenção de sedimentos no encontro do Rio Ivaí com o Rio Paraná, o que pode influenciar a qualidade e a representatividade dos dados coletados.

Por último, apresentamos o gráfico de regressão logarítmica dos dados de todas as estações combinadas (Figura 12). Este gráfico também apresentou resultados de R^2 baixos e insatisfatórios. Além disso, observa-se uma grande discrepância na quantidade de dados coletados entre as diferentes estações, sendo a maior contribuição proveniente da estação de Novo Porto Taquara. Essa predominância de uma grande quantidade de uma única estação pode levar à descaracterização dos dados de reflectância do Rio Ivaí como um todo, comprometendo a representatividade dos resultados dos outros segmentos do corpo hídrico.

Diante dessa situação, optou-se por realizar o estudo de forma individualizada, analisando cada estação separadamente. Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa das especificidades de cada localidade, possibilitando a identificação de padrões distintos e a obtenção de resultados mais representativos.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados, é evidente que a grande variabilidade observada nos dados das diferentes estações ao longo do Rio Ivaí representa um desafio significativo para a coleta de dados e a obtenção de análises consistentes. A amplitude dessa variabilidade, tanto nos valores de CSS quanto nos padrões de reflectância, afeta diretamente a capacidade dos modelos de fornecer previsões robustas, como evidenciado pelos baixos valores de R^2 encontrados em diversos gráficos.

A influência de fatores como localização geográfica, composição sedimentar, energia hídrica, granulometria dos sedimentos, variabilidade climática e inconsistências nos dados coletados reforça a complexidade do estudo de ambientes fluviais. Entre as dificuldades enfrentadas, podem ter ocorrido erros na estimativa da reflectância, desafios associados à correção dos efeitos atmosféricos e do fenômeno *sun glint* no GEE, além da influência da utilização de diferentes linhagens de satélites ao longo dos anos, que podem introduzir variações nos dados devido a diferenças nos sensores e nas resoluções em geral.

Além disso, também pode estar atrelado a complexidade inerente à análise de dados espectrais em ambientes externos, fora do controle de laboratório. Áreas de estudo como corpos d'água são elementos dinâmicos e estão em constante transformação devido a processos naturais, como alterações no nível d'água, sedimentação, presença de matéria orgânica, e eventos climáticos sazonais ou extremos. Além das influências de fatores externos, como mudanças na cobertura do solo ao redor dos corpos d'água ou na qualidade da água devido a atividades antropogênicas que contribuem ainda mais para a variabilidade nos dados espectrais.

Apesar dessas limitações, os resultados evidenciaram padrões consistentes e relevantes. Um deles é o comportamento das bandas espectrais, que apresentaram melhor desempenho à medida que o comprimento de onda aumentou. Isso está alinhado à metodologia, que aponta que a relação entre reflectância e CSS tende a se saturar em comprimentos de onda mais curtos para níveis mais baixos de CSS, enquanto apresenta maior precisão em comprimentos de onda maiores.

Diante das variabilidades apresentadas, fica evidente a inconsistência dos dados e resultados obtidos, o que inviabiliza a criação de modelos preditivos robustos. Nesse contexto, acredita-se que seria mais viável a utilização de um único satélite, com sensores e resoluções previamente estabelecidos, aliada à temporalidade dos dados coletados e ao

período de atividade do satélite. Por exemplo, poderia ser utilizado exclusivamente o satélite Landsat 5, que operou de 1984 a 2013, com foco nos dados de CSS coletados pela estação escolhida dentro desse mesmo período temporal.

Dessa forma há potencial de reduzir as variabilidades observadas, uma vez que a homogeneidade dos dados seria otimizada. Além disso, a utilização de um conjunto de dados mais consistente permitiria um refinamento mais preciso das correções atmosféricas e a mitigação de fenômenos como o *sun glint*, melhorando, assim, a precisão dos modelos e, conseqüentemente, a qualidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, Hidroweb [base de dados on line]. Brasília : ANA. [s. d.]. Disponível em: <<http://www.hidroweb.ana.gov.br>>.

BARBOSA, Claudio C. F.; NOVO, Evlyn M. L. M.; MARTINS, Vitor S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. 2000.

COGO, Michelle Cristine. **O papel dos sedimentos em suspensão no metabolismo de rios de micro e meso-escala no estado de Rondônia**. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DESTEFANI, Edilaine Valéria. **Regime hidrológico do Rio Ivaí - PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

HOLYER, Ronald J. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, n. 4, p. 323-338, 1978.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. 2º ed. São Paulo: Parêntese, 2011.

KUERTEN, S.; SANTOS, M.L. dos; SILVA, A. **Variação das características hidrosedimentares e geomorfologia do leito do rio Ivaí – PR, em seu curso inferior**. São Paulo – UNESP, *Geociências*, v. 28, n. 2, p. 143-151, 2009.

MARINHO, R. R; WACHHOLZ, F; SOUZA, R. **Monitoramento do sedimento suspenso no Lago Catalão (Iranduba, AM) com dados Landsat-8**. Geografia por sensoriamento remoto. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2021.

MENDES, Josué Camargo. **Contribuição à estratigrafia da série Passa Dois no Estado do Paraná**. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. *Geologia*, n. 10, p. 5-115, 1954.

MEURER, M.; BRAVARD, J.-P.; STEVAUX, J. C. **Granulometria dos sedimentos marginais do rio Ivaí com vistas à compreensão da dinâmica hidrosedimentar montante-jusante**. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 12, n. 1, 2011.

MONTANHER, Otávio Cristiano. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens Landsat 5**. 2013. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

MONTANHER, O. C.; SOUZA FILHO, E. E. **Estimating the suspended sediment concentration in the upper Paraná river using LANDSAT 5 data: data retrieval on a large temporal scale and analysis of the effects of damming**. GEOGRAFIA, Rio Claro, v. 40, n. 1, p. 159-176, jan./abr. 2015.

PAULISTA, R. S. D. et al. **Estimating suspended sediment concentration using remote sensing for the Teles Pires River, Brazil**. Sustainability, v. 15, n. 9, 2023.

PEIXOTO, D. W. B; GUASSELLI, L. A; PEREIRA FILHO, W. **Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão a partir de imagens Landsat 8 em PCHs no Rio Ivaí-RS**. *Geociências*, v. 37, n. 1, p. 147-154, 2018. São Paulo: UNESP.

RODRIGUES, A. S. L; MALAFAIA, G; CASTRO, P. T. A. **A importância da avaliação do habitat no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos: uma revisão**. *SaBios: Revista Saúde e Biologia*, n.1, v. 5, p. 26-42, jan./jul. 2010.

RODRIGUES, S. C. A. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. 2012. Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Ensino de Matemática no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

ROGERSON, Peter. **Métodos estatísticos para geografia: um guia para o estudante**. Tradução: Paulo Fernando Braga Carvalho, José Irineu Rangel Rigotti. 3. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2012.

SEENIPANDIAN, Kaliraj; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N. S. **Multispectral image analysis of suspended sediment concentration along the Southern coast of Kanyakumari, Tamil Nadu, India.** *Journal of Coastal Sciences*, v. 1, n. 1, p. 63-71, 2014.

SILVEIRA, Adalfran Herbert De Melo et al. **Avaliação do grau de turbidez no rio potengi e entorno da barragem de campo grande no município de são paulo do potengi/rn.** Anais. CONIDIS. Campina Grande: Realize Editora, 2016.