



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Assinatura térmica da pluma do Rio Zambeze avaliada por sensoriamento remoto

Autor

Lopes António Nhampossa

Quelimane, Setembro, 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Assinatura térmica da pluma do Rio Zambeze avaliada por sensoriamento remoto

Autor:

Lopes António Nhampossa

(Lopes António Nhampossa)

Supervisor:

Fialho PJ Nehama

(Prof. Doutor Fialho PJ Nehama)

Co- Supervisores:

H Machaieie

(Prof. Doutor Hélder Machaieie)

Avaliador:

Chauque

(Licenciado Anselmo Chauque)

Nélio Sitoe

(Mestre Nélio Sitoe)

Presidente do Júri

Banito Magestade

(Mestre Banito Magestade)

Quelimane, Setembro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus Todo poderoso pela força e sabedoria concedida ao longo desta jornada.

À minha família, em especial meu pai, **Antônio Nhampossa** e minha mãe, **Fátima Armando**, meus irmãos, **Rosalina, Ernesto, Joana, Ana Maria e Cleiton**, meu Tio **Lopes G. Nhampossa** pelo amor incondicional, pelo apoio nos momentos difíceis e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos meus professores e orientadores, que compartilharam conhecimentos valiosos e me guiaram com paciência e dedicação.

*Se você não lutar por alguma coisa será
vencido por qualquer coisa
“E tudo o que fizerdes,
fazei-o de todo o coração”
(Colossenses 3:23)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, saúde e sabedoria concedidas ao longo desta jornada. Aos meus pais, António Nhampossa e Fátima Armando, e ao meu guardião Lopes G. Nhampossa, por todo amor, apoio e sacrifício, estendo minha gratidão aos meus irmãos pelo incentivo constante.

Sou profundamente grato ao meu supervisor, Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama, e aos co-supervisores, Prof. Doutor Hélder Machaieie e Msc. Nélcio das Neves, pela orientação dedicada e pelas valiosas contribuições à realização desta monografia.

Agradeço à UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE pela bolsa de estudos e a todos os docentes e funcionários da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, que contribuíram para minha formação académica.

Aos colegas e amigos com quem compartilhei esta caminhada — em especial Larion Mendes, Amilton Roberto, Bécia Nhantumbo, Donaldo Amado, Estevão Mazuze, Ivaldo Fumo, Belson Cumbe, Arsenio Vilankulos, Antonio Alfoi, Warren Nhamage, Eugenio Nguenha, João Pacul e tantos outros pelo companheirismo e pelos momentos inesquecíveis vividos durante a licenciatura.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste *trabalho*.

O meu Muito Obrigado!!

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu **Lopes Antonio Nhampossa** declaro, que este trabalho foi elaborado por mim, de forma original, sem qualquer prática de plágio ou violação de normas éticas, todas as fontes consultadas foram devidamente referenciadas e os conteúdos citados estão em conformidade com as normas acadêmicas. Esta Monografia representa meu esforço e dedicação para a obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, na Universidade Eduardo Mondlane.

O Candidato:



(Lopes António Nhampossa)

RESUMO

Neste estudo, a assinatura térmica da pluma do rio Zambeze, no Banco de Sofala, foi analisada usando imagens diárias de Temperatura de Brilho (TB) do sensor SLSTR (canal S9) do satélite Sentinel-3, entre 2020 e 2024. A análise dos limiares térmicos indicou que $TB = 21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,35$), representando o limiar mais adequado para delimitar a extensão da pluma. A relação entre a área da pluma, considerando este limiar, e a descarga fluvial apresentou coeficiente de determinação moderado ($R^2 = 0,31$), mostrando que a vazão explica apenas parcialmente a variabilidade observada. As imagens revelaram três padrões morfológicos dominantes: plumas arredondadas ou com bulbos, associadas a dispersão oceânica intensa; plumas alongadas e confinadas à costa; e formas intermediárias moduladas por giros de mesoescala e correntes costeiras. Limitações na cobertura de nuvens restringiram a amostragem em certos períodos. Os resultados demonstram que, embora a TB do SLSTR seja eficaz para mapear a pluma, a dinâmica espacial e temporal é fortemente modulada pela interação entre descarga, ventos, correntes e estruturas mesoescalares, evidenciando a necessidade de integração com dados oceanográficos e modelagem numérica para uma interpretação robusta da dinâmica fluvial e oceânica.

Palavras-chave: pluma fluvial; pluma térmica; SLSTR; Sentinel-3; Temperatura de Brilho; Rio Zambeze;

ABSTRACT

In this study, the thermal signature of the Zambeze River plume in the Sofala Bank was analyzed using daily Brightness Temperature (BT) images from the SLSTR sensor (S9 channel) onboard the Sentinel-3 satellite, between 2020 and 2024. Threshold analysis indicated that $BT = 21.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ yielded the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.35$), representing the most suitable threshold to delineate the plume's spatial extent. The relationship between plume area, considering this threshold, and river discharge showed a moderate coefficient of determination ($R^2 = 0.31$), indicating that discharge only partially explains the observed variability. The images revealed three dominant morphological patterns: rounded plumes or with bulges, associated with intense offshore dispersion; elongated plumes confined to the coast; and intermediate forms modulated by mesoscale eddies and coastal currents. Limitations in cloud coverage restricted sampling during certain periods. The results demonstrate that, although SLSTR BT is effective for mapping the plume, its spatial and temporal dynamics are strongly modulated by the interaction of river discharge, winds, currents, and mesoscale structures, highlighting the need to integrate oceanographic data and numerical modeling for a robust understanding of fluvial and oceanic dynamics.

Keywords: river plume; thermal plume; SLSTR; Sentinel-3; Brightness Temperature; Zambeze River

Lista de figuras

Figura 01: Representação simplificada da captação do sinal refletido por corpos aquáticos por um sistema sensor orbital (Fonte: Albuquerque & Belem, 2016)	8
Figura 02: Coeficientes de absorção do fitoplâncton, da água pura e da matéria orgânica dissolvida em vários comprimentos de onda (Fonte: Rudorff, 2006, adaptado)	9
Figura 03: Batimetria do Banco de Sofala, obtida no conjunto de dados GEBCO_2023.....	13
Figura 04: Contagem de Pixéis validos.....	20
Figura 05: Correlação entre área da pluma e descarga fluvial para diferentes limites de temperatura de brilho.....	21
Figura 06: Média mensal da descarga do rio Zambeze.....	22
Figura 07: Relação entre área da pluma térmica em função da descarga do rio Zambeze	23
Figura 08: Temperatura do brilho (°C) diária de 2020 a 2021.....	24
Figura 09: Temperatura do brilho (°C) diária de 2022 a 2023.....	25
Figura 10: Temperatura do brilho (°C) diária de 2023 a 2024.....	26
Figura 11 (Anexo): Rosa dos ventos diárias nas componentes U e V (2020 a 2024)	43
Figura 12 (Anexo): Mapas diárias de anomalia positiva da altura do mar (SLA) entre 2020 a 2024.....	43
Figura 13 (Anexo): Correntes diárias Zonal e Meridional de 2020 a 2024.....	44

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Significado
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter (Matéria Orgânica Dissolvida Colorida)
DAAC	Distributed Active Archive Center
DOC	Dissolved Organic Carbon (Carbono Orgânico Dissolvido)
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NetCDF	Network Common Data Form
RGB	Red, Green, Blue (Composição colorida)
ROMS	Regional Ocean Modeling System
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SST	Sea Surface Temperature
TB	Temperatura de Brilho
POI	Propriedades Óticas inerentes
TIR	Thermal Infrared (Infravermelho Térmico)
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

Lista de Símbolos

Símbolo / Unidade	Descrição
°C	Graus Celsius
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
km ²	Quilômetros quadrados
µm	Micrômetro
R ²	Coeficiente de determinação
$\bar{x}$	Média aritmética
Σ	Desvio padrão
NaN	Not a Number (valor ausente ou inválido)

Lista de equações

Equação 01: Cálculo da área do pixel.....	17
Equação 03: Cálculo da área da pluma térmica.....	17

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Problematização e Justificativa	2
1.1.1. Problematização	2
1.1.2. Justificativa.....	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo Geral	3
1.2.1. Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II	4
2. Revisão de literatura.....	4
2.1. Plumas dos Rios	4
2.6. Impacto da pluma fluvial nos ecossistemas marinhos	6
2.7. Importância da pluma do rio no ambiente marinho	7
2.10. Satélite Sentinel-3 e sensor SLSTR	10
2.11. Detecção de Nuvens no Instrumento SLSTR	10
CAPÍTULO III	12
2. Metodologia	12
2.1. Descrição da área de estudo	12
2.1.1. Fonte de dados de TB.....	13
2.1.2. Dados de Descarga do Rio Zambeze.....	15
2.2. Métodos	15
2.2.1. Aquisição, Seleção e Pré-processamento dos Dados	15
2.2.2. Contagem de pixéis para a determinação do melhor limiar que representa a área da pluma 16	
2.2.3. Relação entre a área da pluma térmica e a descarga fluvial do rio Zambeze.....	18
2.2.4. Descrição espacialmente a pluma térmica do rio Zambeze com base em imagens diárias de TB 19	
CAPÍTULO IV	20

3.	Resultados	20
3.1.	Contagem dos pixéis da área da pluma em diferentes limites de temperatura.....	20
3.2.	Determinação do melhor limiar que representa a área da pluma	21
3.3.	Variação da média mensal da descarga fluvial	22
3.4.	Relação entre a descarga fluvial a área da pluma térmica.....	23
3.5.	Descrição espacial da pluma do rio Zambeze	24
4.	Discussão.....	28
	Conclusão	30
6.	Recomendações	32
7.	Bibliográficas Referências	33
8.	Anexos.....	45

CAPÍTULO I

1. Introdução

As plumas fluviais, também chamadas de plumas térmicas ou de rio, são regiões costeiras caracterizadas por propriedades específicas (temperatura, turbidez, cor, salinidade) influenciadas pelo escoamento de rios (Horner-Devine, 2015). Essas regiões, que podem ser identificadas por uma assinatura térmica distinta em relação ao ambiente marinho, ocorrem em mares continentais e plataformas oceânicas. Elas são formadas pela descarga de água doce que transporta materiais orgânicos, inorgânicos e poluentes, alterando significativamente a estrutura física e biogeoquímica da zona costeira (Nguyen et al., 2021). No geral, a dispersão das plumas fluviais é condicionada por diversos fatores físicos, entre os quais se destacam a força dos ventos, a descarga fluvial, as ondas, marés, correntes costeiras e a rotação da Terra (Ahn et al., 2005; Teodoro et al., 2008; Nehama, 2008; Lahet & Stramski, 2009; Osadchiev et al., 2021).

Estudos regionais e internacionais convergem para mostrar que a morfologia e extensão das plumas fluviais são controladas por uma combinação de descarga, vento, correntes costeiras e dinâmica de mesoescala (Ahn et al., 2005; Dzwonkowski, 2005; Warrick & Farnsworth, 2017). Para o rio Zambeze, modelagens e observações indicam um padrão bidirecional de dispersão e forte sensibilidade ao vento e às condições locais de circulação (Nehama & Reason, 2012; Nehama & Reason 2014; Nehama & Reason, 2021; Oguntuyinbo, 2023). Estudos de campo em plumas pequenas e médias confirmam que frentes térmicas respondem rapidamente a variações sinóticas do vento, mas faltam séries in situ contínuas e validações diárias de produtos térmicos para consolidar essas relações (Osadchiev et al., 2021; Nguyen et al., 2021). Em paralelo, embora o uso de dados térmicos TB de sensores como o SLSTR seja tecnicamente viável, há uma lacuna clara: poucos estudos aplicaram uma rotina diária de TB com teste sistemático de limiares para relacionar área da pluma e descarga fluvial ao longo do banco de sofala, o que motiva o presente estudo.

Apesar dos avanços, poucos trabalhos abordaram sistematicamente a assinatura térmica da pluma do Zambeze. Assim, o presente estudo propõe uma abordagem inovadora baseada na análise de imagens diárias de TB, extraídas da banda térmica S9 do sensor SLSTR a bordo do satélite Sentinel-3. Diferentemente dos estudos anteriores baseados em dados hidrográficos ou ópticos, o SLSTR oferece resolução espacial de 1 km, medições globais de alta precisão, correções atmosféricas específicas e cobertura quase diária. Dessa forma, a metodologia envolve a aplicação de limiares térmicos variados, análise diária das imagens e correlação com dados de descarga fluvial. Essa abordagem permite mapear, com maior precisão, a extensão horizontal da pluma térmica no período de 2020 a 2024, contribuindo para a compreensão dos mecanismos físicos associados à descarga fluvial e à sua

dispersão. Portanto, o estudo busca preencher lacunas existentes e promover avanços no monitoramento ambiental regional por meio do sensoriamento remoto.

1.1.Problematização e Justificativa

1.1.1. Problematização

As plumas fluviais constituem feições costeiras formadas pela descarga de água doce carregada de sedimentos, nutrientes e poluentes, influenciando diretamente a estrutura física e biogeoquímica dos ecossistemas marinhos (Nehama, 2014; Machaieie et al., 2022). Entre estas, destaca-se a pluma do rio Zambeze, uma das mais relevantes do sudoeste do Oceano Índico, cuja dinâmica é fortemente modulada por múltiplas forçantes físicas, incluindo a descarga fluvial, ventos, correntes superficiais e estruturas de mesoescala (Malauene et al., 2021).

Apesar da sua reconhecida importância ecológica e socioeconômica, os mecanismos que regulam a variabilidade espacial e temporal da pluma do Zambeze permanecem insuficientemente compreendidos, sobretudo no que se refere à extensão térmica e à sua relação com a descarga fluvial.

O avanço do sensoriamento remoto, especialmente com sensores térmicos como o SLSTR (Sentinel-3), oferece oportunidades promissoras para mapear a extensão da pluma com maior precisão e frequência temporal. Contudo, em regiões tropicais a aplicação dessas ferramentas enfrenta limitações, como elevada cobertura de nuvens, instabilidades radiométricas e complexidade atmosférica sobre áreas costeiras. Embora a temperatura da superfície do mar (TSM) seja amplamente utilizada, ainda são escassos os estudos que aplicam a TB como parâmetro alternativo e potencialmente mais robusto na caracterização de plumas térmicas costeiras. Persistem, assim, lacunas metodológicas, sobretudo quanto ao uso de séries diárias de imagens térmicas de alta resolução para a identificação e o monitoramento da pluma do rio Zambeze. Essa limitação restringe a compreensão dos padrões térmicos reais de dispersão e dificulta o desenvolvimento de estratégias eficazes de monitoramento ambiental costeiro. Diante desse contexto, o presente estudo formula o seguinte problema central: *De que forma a Temperatura de Brilho pode ser aplicado para avaliar a assinatura térmica da pluma do rio Zambeze?*

1.1.2. Justificativa

A pluma do rio Zambeze exerce forte influência sobre os processos físico-químicos e ecológicos do Banco de Sofala, uma das regiões mais produtivas da costa moçambicana e fundamental para atividades econômicas como a pesca artesanal e industrial (Gammelsrød, 1992; Malauene et al., 2021). Apesar da sua importância, a caracterização térmica da pluma com base em séries de alta resolução temporal e espacial ainda é escassa. Nesse contexto, este estudo propõe o uso da TB, derivada do sensor SLSTR a bordo do satélite Sentinel-3, como indicador para mapear a extensão da pluma entre 2020 e 2024. A TB apresenta vantagens sobre a tradicional Temperatura da Superfície do Mar (TSM), sobretudo em ambientes costeiros tropicais sujeitos a elevada variabilidade atmosférica e maior cobertura de nuvens. Essa característica torna a TB uma alternativa metodológica robusta para caracterizar plumas térmicas no Banco de Sofala. Assim, o presente estudo busca preencher uma lacuna científica relevante ao aplicar sistematicamente a TB na caracterização da pluma do Zambeze, contribuindo não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para o fornecimento de subsídios técnicos ao monitoramento ambiental costeiro e à formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos marinhos no delta do Zambeze.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a assinatura térmica da pluma do rio Zambeze por meio do sensoriamento remoto utilizando o sensor SLSTR.

1.2.1. Objetivos Específicos

- ❖ Contar os pixels válidos para determinação do melhor limite que representa a área da pluma com base na TB;
- ❖ Quantificar a área da pluma térmica e a descarga fluvial do rio zambeze;
- ❖ Descrever espacialmente a pluma térmica do rio Zambeze com base em imagens diárias de TB entre 2020 e 2024.

CAPÍTULO II

2. Revisão de literatura

2.1. Plumas dos Rios

As plumas fluviais, também chamadas de plumas térmicas ou de rio, são feições costeiras caracterizadas por propriedades específicas (como temperatura, turbidez, cor e salinidade) resultantes da interação entre águas continentais e marinhas. Elas ocorrem tanto em mares semi-fechados quanto em plataformas oceânicas e distinguem-se por sua assinatura térmica, consequência do contraste de densidade entre a água doce e a água salgada (Nguyen et al., 2021; Albuquerque & Belem, 2016). Em termos de escala, a área de uma pluma pode ser de 3 a 5 ordens de magnitude superior à sua profundidade (Alberto, 2002). Pequenos rios com descargas da ordem de 1 a 10 m³/s podem originar plumas de 10 a 100 m de extensão, enquanto grandes rios formam plumas que chegam a cobrir centenas a milhares de km² (Arai, 2014). Apesar de o volume global de água doce que chega ao oceano ser relativamente reduzido, as plumas podem ocupar até 20% das plataformas continentais (Barile, 2004), desempenhando papel central nos fluxos de fluatibilidade, calor, nutrientes, sedimentos terrígenos e poluentes (Osadchiv et al., 2021).

2.2. Caracterização da Pluma Fluvial

As plumas fluviais são compostas por águas de baixa salinidade enriquecidas em nutrientes, poluentes, material particulado e, frequentemente, apresentam temperaturas relativamente elevadas (Capão, 2007). Próximas à foz, comportam-se como um jato de água doce sobre o oceano, dominado por processos de advecção dependentes da descarga e do balanço de momento e volume (Geernaert & Plant, 1990; Fong & Stacey, 2003; Nezlin et al., 2005). À medida que se afastam da desembocadura, tornam-se progressivamente controladas por dispersão lateral, gradientes de fluatibilidade e correntes oceânicas (Fong & Stacey, 2003).

No hemisfério sul, a rotação da Terra induz deflexão ciclônica, originando correntes costeiras com a linha de costa à esquerda (Warrick et al., 2004). O transporte e a morfologia da pluma resultam da interação entre descarga fluvial, vento, ondas, correntes de maré e topografia da plataforma continental (Durand et al., 2002; Mestres et al., 2007; Warrick et al., 2007; Nehama & Reason, 2021). Plumam com alta carga de sedimentos podem apresentar comportamento negativamente fluatante, deslocando-se ao longo do fundo oceânico após eventos de grande descarga, geralmente concentradas a cerca de 1 km da foz (Warrick et al., 2004; Jensen, 2000). Segundo Yankovsky & Chapman (1997), as plumas podem ser classificadas em superficiais (restritas à camada superior da coluna de água) ou de fundo, capazes de alcançar toda a coluna até cerca de 200 m de profundidade e mais de 100 km de extensão (Arai, 2014; Kirk, 2011).

2.2.Características Morfodinâmicas das Plumas Fluviais

As plumas fluviais são estruturas dinâmicas formadas pela descarga de água doce no oceano, carregadas de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica. Sua forma, dispersão e persistência são controladas pela interação entre vazão fluvial, batimetria, ventos, marés e gradientes térmicos (Garvine, 1995; Fong & Geyer, 2001).

Sob condições de alta descarga, ventos costeiros favoráveis e baixa energia de mistura, a pluma apresenta contornos definidos e propagação costeira concentrada. Em contraste, baixa vazão ou ventos oceânicos intensos geram plumas difusas, altamente dispersivas e de difícil delimitação em imagens de satélite (Nezlin & DiGiacomo, 2005; Moller et al., 2010). A magnitude espacial pode ser classificada objetivamente: ausente quando <1,5 km da costa, quase ausente entre 1,5–5 km, e presente quando ultrapassa 5 km em extensão ou largura (Lentz & Limeburner, 1995; Moller et al., 2010).

2.3. Sedimentos

Os rios transportam sedimentos erodidos do solo para o oceano, que podem permanecer suspensos, aumentando a turbidez, ou se depositar no fundo marinho (Geyer, 2004). O transporte e deposição dependem da vazão, mistura com água salgada, correntes e topografia local (Alberto, 2002; Arai, 2014). Sedimentos mais densos se depositam primeiro, mas podem ser ressuspensos por correntes, formando depósitos de longo prazo (Capão, 2007). Em geral, a concentração sedimentar diminui com a profundidade, embora o fundo possa apresentar acúmulo local significativo (Warrick et al., 2007).

2.4. Matéria Orgânica Dissolvida Colorida

Os rios transportam grande quantidade de matéria orgânica dissolvida (MOD), que atua como indicador ótico de plumas fluviais, influenciando absorção e espalhamento da luz, detectável por sensoriamento remoto (Binding & Bowers, 2003; Fu & Cazenave, 2000). Os principais componentes incluem pigmentos de fitoplâncton, partículas orgânicas/inorgânicas e carbono orgânico dissolvido (DOC), derivados da decomposição de matéria orgânica (Arraut et al., 2005; Esteve, 1998; Novo, 2001). Entre os indicadores mais usados estão CDOM e DOC, cujas concentrações variam inversamente à salinidade nas regiões estuarinas (Bowers et al., 2000; Siddorn et al., 2001). Assim, altos valores de CDOM ocorrem próximos às fozes e diminuem com o aumento da salinidade (Del Castillo & Miller, 2008; Vignudelli et al., 2004).

2.5. Poluentes Antropogénicos

Os poluentes de origem antropogénica chegam ao oceano principalmente por escoamento superficial, descargas de esgoto, deposição atmosférica e infiltração de águas subterrâneas contaminadas (Ahn et al., 2005; Wittmanova et al., 2022). Eventos de alta descarga, como tempestades, intensificam a entrada de nutrientes, sedimentos finos e micro-organismos, favorecendo a proliferação de fitoplâncton ou macroalgas de rápido crescimento (Barile, 2004; Orlandi et al., 2014).

A identificação da pluma poluída pode ser feita por turbidez, clorofila-a, bactérias indicadoras fecais e propriedades ópticas inerentes (PIOs), como absorção por pigmentos fitoplanctónicos, detritos e CDOM, que evidenciam a origem e a intensidade da poluição (Gancheva et al., 2021; Ahn et al., 2005; Kim et al., 2009; Gaspar et al., 2016). A dispersão desses poluentes depende de correntes, ventos, densidade da água e energia hidrodinâmica, podendo ser modificada por coagulação de partículas e processos de deposição, prolongando a persistência da poluição e alterando a qualidade da água e ecossistemas costeiros (Hickey & Banas, 2003; Goodyear, 1982; Gaspar et al., 2016). Estudos de sensoriamento remoto indicam que plumas poluídas podem se estender por vários quilómetros, transportando contaminantes que afetam biodiversidade e recursos hídricos (Lins, 2017; Warrick & Farnsworth, 2017).

2.6. Impacto da pluma fluvial nos ecossistemas marinhos

As plumas fluviais influenciam significativamente os ecossistemas marinhos, alterando salinidade, estratificação, transporte de nutrientes e poluentes, com impactos diretos na produtividade primária e na biodiversidade costeira (Froidefond, 1998; Ahn et al., 2005). No rio Zambeze, por exemplo, a pluma afeta a distribuição de sedimentos e a salinidade até cerca de 120 km a jusante e 65 km em direção ao mar, influenciando a produtividade, a dinâmica das pescarias e os níveis tróficos superiores (Malauene et al., 2018; Nehama & Reason, 2021; Arai, 2014; Mann & Lazier, 2006).

Em outros rios, como Mekong, Congo, Bzyb e em regiões costeiras do Mediterrâneo, as plumas modulam a circulação oceânica, promovem proliferações de fitoplâncton e macroalgas, alteram comunidades bentónicas e interferem no ciclo de nutrientes e na qualidade da água (Zeng et al., 2022; Nixon & Buckley, 2002; Geyer, 2004; Alberto, 2002; Orlandi et al., 2014). A dispersão e intensidade dos impactos dependem de ventos, correntes, hidrodinâmica local e descargas fluviais, podendo estender os efeitos da pluma por dezenas de quilómetros além da foz (Osadchiev et al., 2021; Arraut et al., 2005; D'Alimonte & Zibordi, 2003).

Assim, as plumas desempenham papel central na dinâmica física e biológica dos ecossistemas costeiros, sendo essenciais o monitoramento contínuo para compreender suas implicações na biodiversidade e na sustentabilidade das pescarias (Hopkins et al., 2013; Gordon et al., 1988).

2.7. Importância da pluma do rio no ambiente marinho

As plumas fluviais desempenham papel central na ecologia e morfodinâmica costeira, transportando água doce, nutrientes, sedimentos e poluentes do rio para o oceano (D'Alimonte & Zibordi, 2003). Essas entradas provocam alterações físicas, como estratificação, padrões de fluxo e tempo de residência, e mudanças químicas na matéria particulada e dissolvida, impactando diretamente a composição, abundância e distribuição de organismos (Arai, 2014; Azevedo et al., 2007; Alberto, 2002; Sklar & Browder, 1998).

Em sistemas como o Rio Colômbia e o Lago Michigan, as plumas criam zonas de alimentação e crescimento para peixes juvenis, aumentam o tempo de residência das partículas e promovem transporte eficiente ao longo da plataforma continental, sustentando biomassa elevada de fitoplâncton, zooplâncton e peixes devido ao enriquecimento nutricional (Grimes & Kingsford, 1996; Hickey & Banas, 2003; Smith & Simpkins, 2018; Grimes & Finucane, 1991; Kingsford & Suthers, 1994; García-Isarch et al., 2006).

Apesar de processos de oligotrofização em algumas regiões, as plumas continuam influentes, fornecendo áreas estratégicas para alimentação, crescimento e reprodução de peixes e invertebrados (Evans et al., 2011; Novo, 2001; Goodyear, 1982). Em Moçambique, a pluma do rio Zambeze enriquece viveiros naturais de camarão, essenciais para a economia local e exportações (Lutjeharms, 2006; Kolasinski et al., 2012).

2.8. Sensoriamento remoto na detecção de plumas fluviais

O sensoriamento remoto é uma ferramenta essencial para monitorar plumas fluviais, permitindo observar processos físicos, químicos e biológicos nas zonas costeiras. Os sensores orbitais detectam a radiação solar refletida pela superfície da água, que é influenciada pelos componentes opticamente ativos: fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida (MOD), pigmentos como clorofila-a e partículas inorgânicas (figura 1), (Esteves, 1998; Novo, 2001; Morel, 1980; Gordon et al., 1988).

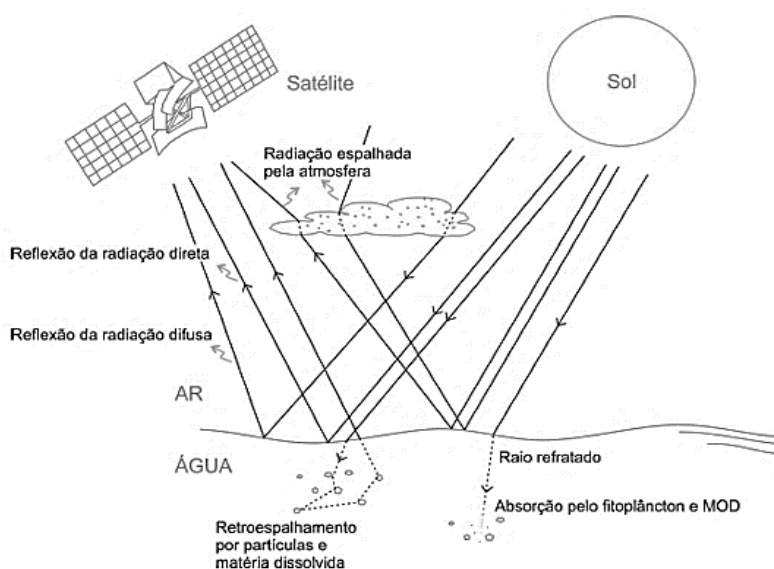


Figura1: A representação simplificada da captação do sinal refletido por corpos aquáticos por um sistema sensor orbital., Fonte: (Albuquerque & Belem, 2016).

A clorofila-a, por exemplo, absorve luz nas faixas azul e vermelha e reflete no verde, sendo usada como indicador da biomassa fitoplanctônica, (figura 2).

Em áreas costeiras, altas concentrações de sólidos suspensos e matéria orgânica colorida aumentam a reflexão nas faixas do vermelho e infravermelho próximo, facilitando a identificação de plumas (Arai, 2014). A detecção depende da **assinatura espectral** desses constituintes e da aplicação de algoritmos de sensoriamento remoto que interpretam a resposta espectral da água.

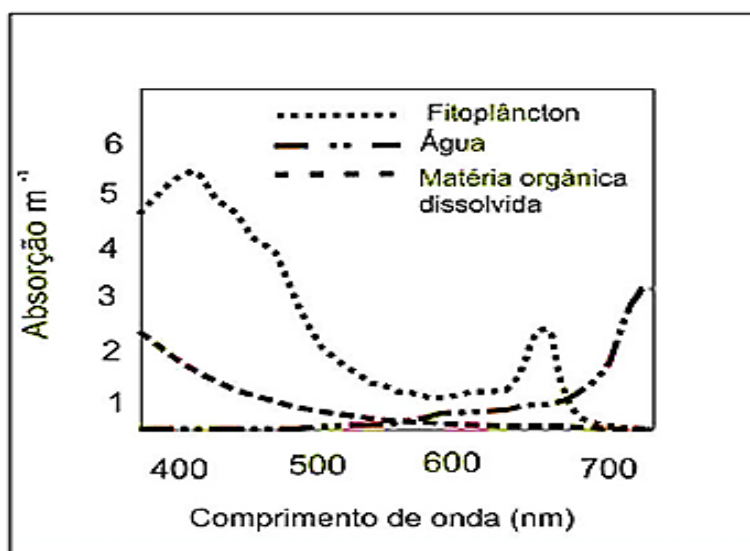


Figura 2: Os coeficientes de absorção do fitoplâncton, da água pura e da matéria orgânica dissolvida em vários comprimentos de onda Fonte: (Rudorff, 2006), adaptado.

Estudos globais e regionais ilustram o potencial dessa abordagem. Pietrzak et al. (2011) utilizaram dados AVHRR para mapear temperatura e material particulado no Mar do Norte; Osadchiev & Sedakov (2018) combinaram Landsat 8 e Sentinel-2 para rastrear movimento de plumas com algoritmos de fluxo óptico; em Moçambique, Machaieie et al. (2022) monitoraram a pluma costeira do Banco de Sofala com imagens MODIS-Aqua, observando variações sazonais ligadas à descarga fluvial, precipitação e ventos.

O uso de sensores térmicos e espectrais de alta resolução aprimora o monitoramento, permitindo análise detalhada da dinâmica espacial e temporal das plumas, contribuindo para a gestão sustentável dos ecossistemas costeiros.

2.9. Temperatura do brilho (TB)

A TB é uma variável fundamental no sensoriamento remoto, especialmente em bandas do infravermelho térmico (TIR). Representa a temperatura que um corpo negro ideal precisaria ter para emitir a mesma radiação registrada pelo sensor. Embora não corresponda exatamente à temperatura física real da superfície, a TB é uma estimativa indireta da radiação emitida, utilizada para inferir variáveis ambientais como TSM, temperatura do ar, cobertura de nuvens e aerossóis (Choung & Kim, 2019).

Estudos validam a TB como proxy confiável. Choung & Kim (2019) observaram forte correlação entre TSM medida in situ e TB derivada de sensores Landsat-8. Pelta et al. (2016) mostraram alta precisão na estimativa da temperatura do ar em Tel Aviv ($R^2 = 0,81$) ao longo de 30 anos. Sun et al.

(2024) destacaram que aerossóis, como poeira, podem reduzir a precisão da TB em até 2 °C, sendo necessária a aplicação de correções radiativas para melhorar a fidelidade dos produtos térmicos.

2.10. Satélite Sentinel-3 e sensor SLSTR

O Sentinel-3 é uma missão do programa Copernicus da União Europeia, dedicada ao monitoramento global dos oceanos e da superfície terrestre, fornecendo produtos quase em tempo real, como cor dos oceanos, altura do nível do mar e temperatura de brilho. Um de seus principais instrumentos é o SLSTR, um radiômetro multicanal projetado para medições precisas da temperatura superficial, além da detecção de nuvens, aerossóis e focos de incêndio. O SLSTR possui 11 canais espectrais: três térmicos no infravermelho (3,7 μm , 10,85 μm e 12 μm), seis visíveis e de ondas curtas (0,55–2,25 μm) e dois canais para fogo ativo. Os canais térmicos medem a temperatura da superfície, enquanto os visíveis auxiliam na triagem de nuvens, monitoramento de vegetação e aerossóis. As varreduras ocorrem a 200 por minuto, com resolução de 1 km nos canais térmicos e 500 m nos canais visíveis. O sensor opera com duas cadeias de varredura independentes, oferecendo faixa nadir de ~1.400 km e faixa oblíqua de ~740 km, permitindo cobertura quase simultânea e melhorando a correção atmosférica. Os produtos são disponibilizados em formato NetCDF, compatível com softwares científicos, e podem ser reamostrados para grades raster mantendo a localização original dos pixels.

O tempo médio de revisita é de 1,8 dias no equador para um satélite e pode chegar a 0,8 dias com dois satélites operando, diminuindo em latitudes mais altas. A combinação de alta resolução espacial e frequência de aquisição torna o SLSTR ideal para monitorar plumas costeiras, como as do rio Zambeze, capturando variações térmicas sutis e dinâmicas no ambiente oceano-atmosférico.

2.11. Detecção de Nuvens no Instrumento SLSTR

A detecção de nuvens é essencial para garantir a confiabilidade de dados de sensoriamento remoto em ambientes costeiros e oceânicos. No SLSTR, pixels nublados são identificados por testes aplicados à TB e à reflectância. Entretanto, desafios como desalinhamento entre canais, nuvens finas ou fragmentadas, brilho solar e águas costeiras opticamente brilhantes podem comprometer a classificação.

Para superar essas limitações, pesquisadores da EUMETSAT desenvolveram um algoritmo bayesiano que combina variáveis espectrais, espaciais e estatísticas, estimando a probabilidade de cada pixel estar nublado. Esse método reduz falsos positivos e melhora a consistência espacial da classificação, especialmente em regiões costeiras. Cada cena gera o parâmetro `summary_cloud`, utilizado neste estudo como `flag_in_cloud`, indicando a probabilidade de contaminação por nuvens e aumentando a confiabilidade das análises térmicas.

Além disso, estratégias complementares baseadas em limiares físicos podem ser aplicadas. Por exemplo, o canal S5 (1,6 μm , infravermelho de onda curta) é usado para mascarar pixels com alta reflectância ($>2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$) no canal térmico S9, identificando áreas potencialmente nubladas. A combinação de métodos probabilísticos e limiares físicos permite maior robustez no filtramento de dados em cenas com elevada nebulosidade.

CAPÍTULO III

2. Metodologia

2.1. Descrição da área de estudo

O Rio Zambeze, um dos maiores sistemas fluviais da África, nasce na Zâmbia Ocidental e atravessa países como Angola e Zimbábue antes de entrar em território moçambicano pela província de Tete (Beilfuss & Dos Santos, 2001; Turpie et al., 1999). Dentro de Moçambique, percorre aproximadamente 800 km, atravessando as províncias de Tete, Sofala e Zambézia (Beilfuss & Brown, 2010). Ao longo deste trajeto, recebe afluentes importantes, como os rios Shire, Revúbuè e Luenha, que aumentam significativamente sua descarga (Davies et al., 2000; Nehama & Reason, 2014). Finalmente, desagua no Oceano Índico através de um extenso delta localizado no Banco de Sofala, na região central da costa moçambicana, estendendo-se de Angoche (17°S) até Nova Mambone (21°S) (Figura 3) (Machaieie et al., 2022). Ao longo de seu percurso em Moçambique, o rio Zambeze apresenta um regime de vazão marcado pela sazonalidade, influenciando diretamente o transporte de sedimentos, moldando a morfologia deltaica e impactando os ecossistemas costeiros associados (Nehama, 2008).

Hidrologicamente, o rio Zambeze apresenta uma marcada sazonalidade. A estação chuvosa ocorre entre outubro e março, e é caracterizada por precipitações intensas e vazões médias que podem ultrapassar 4.000 m³/s durante o período de pico, geralmente entre fevereiro e março (Reason & Jagadheesha, 2005; Nehama & Reason, 2014, Nehama & Reason, 2021). Por outro lado, a estação seca estende-se de abril a setembro, com precipitação muito reduzida e descargas fluviais que podem decrescer para valores próximos de 1.300 m³/s, principalmente entre setembro e outubro. Em termos médios anuais, a vazão gira em torno de 3.000 m³/s, representando aproximadamente 85% da descarga de água doce que alimenta o Banco de Sofala (Gammelsrød, 1996; Siddorn et al., 2001).

O clima da região é classificado como subtropical húmido, apresentando duas estações bem definidas: uma seca e relativamente fria, entre abril/maio e setembro, e outra quente e chuvosa, entre outubro e março (Hoguane, 2007).

O Banco de Sofala é uma plataforma costeira rasa com destaque para as maiores amplitudes de maré do sudoeste do Oceano Índico, podendo atingir até 6,4 metros durante marés vivas (Pugh, 1987; Chevane et al., 2016), em contraste com os 3 metros observados na plataforma norte e sul (Hoguane, 2007). A batimetria da região, conforme apresentado na Figura 3, evidencia a natureza rasa da plataforma, com profundidades médias entre 15 e 30 metros, favorecendo a retenção da pluma fluvial e a sua interação com ventos e marés (Lutjeharms, 2006; Nehama, 2012).

Ecologicamente, o Banco de Sofala constitui uma das zonas de maior produtividade biológica da região, beneficiado pelo aporte terrígeno de nutrientes transportados pelo Zambeze, o que contribui para a produtividade pesqueira, com destaque para as pescarias de camarão (Lutjeharms, 2006; Kolasinski et al., 2012; Mann & Lazier, 2006).

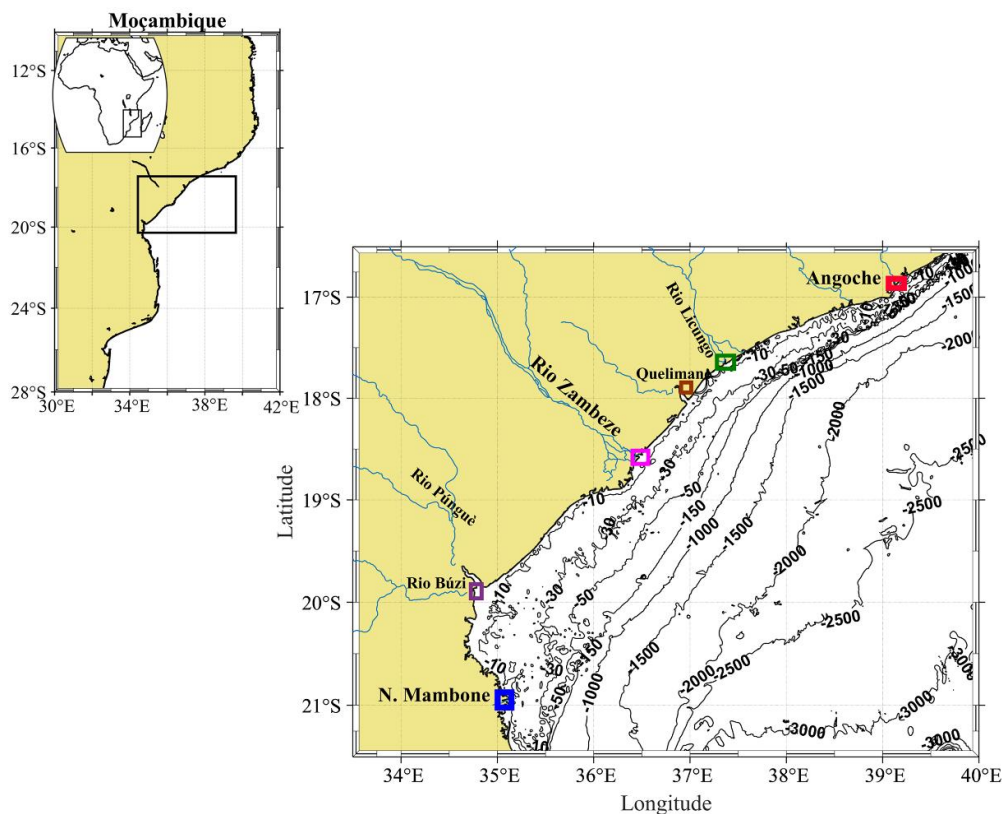


Figura 3: Mapa batimétrico do Banco de Sofala, elaborado com base nos dados GEBCO_2023, com resolução espacial de aproximadamente 450 metros (15 segundos de arco). Os quadrados coloridos indicam pontos de referência relevantes para a análise: o quadrado roxo representa a foz do rio Chinde, principal canal do delta do Zambeze; o quadrado vermelho marca o Estuário dos Bons Sinais; o quadrado verde indica a foz do rio Licungo; e o quadrado lilás corresponde à foz do rio Búzi.

2.1.1. Fonte de dados de TB

Neste estudo, foram utilizadas imagens diárias de BT obtidas pelo sensor SLSTR, a bordo dos satélites Sentinel-3, do programa europeu Copernicus. Os dados correspondem ao nível 1B com resolução espacial de 1 km na visada nadir, adquiridos para o período entre 2020 e 2024 por meio do portal EUMETSAT Product Viewer (<https://view.eumetsat.int>), e processados no formato NetCDF-4.

O SLSTR fornece medições de BT no topo da atmosfera (TOA) em três canais térmicos: S7 (3,74 μm), S8 (10,85 μm) e S9 (12,00 μm). Neste trabalho, foi adotado o canal S9, por apresentar maior estabilidade radiométrica, menor sensibilidade à absorção de vapor de água e melhor desempenho na detecção de variações térmicas em regiões costeiras. O canal S7, embora útil para detecção de fogo ativo, é frequentemente sujeito à saturação térmica em condições de alta radiação solar. Já o canal S8, apesar de ser amplamente utilizado, possui maior largura espectral, o que o torna mais suscetível à interferência atmosférica, especialmente em ambientes com alta umidade relativa. Dessa forma, o canal S9 oferece uma resposta espectral mais limpa e confiável para monitoramento térmico superficial, com resultados mais consistentes em comparação com os demais canais. Estudos comparativos demonstram que o canal S9 é altamente consistente com sensores de referência como MODIS, ABI e SEVIRI, sendo amplamente recomendado para estudos de superfície (Luo & Minnett, 2020; Shrestha et al., 2019).

Os produtos SL_1_RBT incluem, além da BT, metadados como, sinalizadores de qualidade (detecção de nuvens e pixels inválidos), geolocalização (lat/lon) e tempo por pixel, variáveis atmosféricas oriundas do modelo ECMWF (temperatura, umidade, pressão), integradas por meio da grade de ponto de amarração (tie-point grid), calibração radiométrica baseada em corpos negros internos e no sistema VISCAL.

O processamento dos dados SLSTR envolve duas etapas principais. A primeira refere-se à grade do instrumento, onde ocorre a calibração das medições radiométricas e a geolocalização precisa de cada pixel. A segunda etapa corresponde à grade da imagem, na qual os dados são reamostrados para uma grade raster de 1 km, aplicando-se máscaras de nuvem tanto a básica quanto a bayesiana (Bayesian cloud) além da incorporação de variáveis auxiliares e campos meteorológicos.

Desde 19 de abril de 2016, todos os produtos SLSTR de nível 1 tanto NRT quanto NTC, estão disponíveis no portal da EUMETSAT, sendo que o modo Near Real Time (NRT) entrega os dados em até 3 horas após a aquisição, e o modo Non Time Critical (NTC), com entrega em até 30 dias, foi o adotado neste estudo por oferecer maior rigor de validação e confiabilidade científica. Todos os produtos utilizados possuem qualidade assegurada pela EUMETSAT e ESA, atendendo aos requisitos técnicos necessários para aplicações ambientais e estudos em regiões costeiras.

No entanto, algumas limitações conhecidas devem ser consideradas na interpretação dos dados. Entre elas, destaca-se o erro de registro entre os canais térmicos S7, S8 e S9, com deslocamentos de até 250 m para o SLSTR-A, além do limite superior de temperatura no canal S7, fixado em 305 K. A máscara de nuvem bayesiana, embora mais eficiente que a básica, apresenta sobrestimação de nebulosidade em regiões de frentes oceânicas e zonas costeiras, com maior ocorrência de falsos

positivos e sensibilidade excessiva à refletância da superfície, o que pode prejudicar a detecção precisa da pluma. Esse problema é mais acentuado nos produtos NRT, motivo pelo qual recomenda-se o uso de produtos NTC em estudos costeiros. Por fim, os campos meteorológicos derivados do ECMWF podem apresentar inconsistências pontuais nos produtos NRT, como a atribuição incorreta de valores fixos em pixels terrestres.

2.1.2. Dados de Descarga do Rio Zambeze

Foram utilizados dados diários de descarga fluvial da estação hidroelétrica de Tete, localizada a aproximadamente 440 km a montante da foz do rio Zambeze (Machaieie et al., 2022). Para garantir consistência temporal com os dados de satélite, foram consideradas apenas as medições realizadas às 06:00. Nos dias em que não houve registro nesse horário, a lacuna foi preenchida utilizando a média das medições das 06:00 dos três dias anteriores. Essa abordagem estatística visa reduzir a inconsistência nos dados devido à ausência de medições pontuais, garantindo uma série temporal mais contínua para análise.

2.2. Métodos

2.2.1. Aquisição, Seleção e Pré-processamento dos Dados

A seleção dos dados considerou critérios temporais e espaciais compreendidos entre 2020 e 2024, com foco na região oceânica adjacente à foz do rio Zambeze, delimitada pelas coordenadas 34.5°E a 39.5°E de longitude e 21°S a 17°S de latitude. Foram utilizadas imagens da coleção EO: EUM:DAT:0411 (produto SLSTR nível 1B), com baixa cobertura de nuvens, priorizando imagens obtidas entre 06h e 07h UTC.

As variáveis extraídas incluíram coordenadas geográficas, TB obtida no canal S9 (12 μm) na visada nadir (TB_in), máscaras de nuvens derivadas de sinalizador padrão do produto SLSTR (flag_in_cloud e summary_cloud, armazenados no canal S5 – 1,6 μm) e uma máscara térmica adaptativa. Nesta máscara, algumas imagens com pixels com TB inferior a 20.9 °C foram automaticamente classificados como potencialmente cobertos por nuvens, sendo esse valor o limite máximo de detecção. O limite inferior de nuvens variou entre as imagens, dependendo das condições específicas de cada cena, podendo chegar a valores tão baixos quanto 10 °C, garantindo a exclusão de pixels opticamente brilhantes que poderiam interferir na análise da pluma. Pixels com refletância no canal S5 $> 2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ também foram excluídos, reforçando a confiabilidade da triagem, em conformidade com estratégias sugeridas em aplicações práticas do SLSTR

Esses procedimentos, permitem mitigar limitações conhecidas do sensor SLSTR, especialmente em ambientes costeiros. A aplicação combinada de filtros espectrais, limiares térmicos, exclusão de

valores inconsistentes e uso de máscaras geográficas assegurou a seleção de 25 imagens confiáveis de TB, com mínima interferência atmosférica, terrestre ou instrumental, garantindo a representatividade física das plumas térmicas detectadas.

2.2.2. Contagem de pixels para a determinação do melhor limiar que representa a área da pluma

Foi realizada uma análise detalhada baseada em cada imagens diárias de Temperatura de Brilho (TB). A abordagem consistiu na aplicação de diferentes limiares térmicos para isolar as regiões de água costeira influenciadas pela descarga do rio Zambeze, considerando que essas áreas apresentam, em geral, temperaturas superiores às do oceano aberto.

Inicialmente, aplicou-se uma varredura sistemática de limiares térmicos entre 19.5 °C a 27.0 °C, com incrementos de 0,3. Essa varredura permitiu identificar os contornos térmicos mais compatíveis com a morfologia esperada da pluma. Com base na consistência visual e espacial observada em diversas imagens, o intervalo entre 21°C a 22.3, °C foi identificado como o mais adequado para delimitar a pluma térmica do Zambeze.

A seleção desse intervalo não foi arbitrária, resultou de uma análise repetida dos padrões térmicos priorizando os casos em que a pluma se apresentava conectada à foz do rio e se estendia em direção ao oceano aberto. Adotou-se como critério fundamental a presença de um gradiente térmico contínuo de TB, decrescente da costa para o longe da costa, e diretamente ligado à desembocadura. Plumais desconectadas da foz foram desconsideradas por não refletirem a dinâmica real da descarga fluvial.

A pluma térmica foi, então, definida como a região oceânica onde os valores de TB excediam os do entorno, indicando a influência de águas continentais aquecidas. As imagens selecionadas passaram por rigoroso critério de qualidade, excluindo-se cenas com cobertura significativa de nuvens ou interferência atmosférica, e priorizando aquelas que evidenciavam com clareza do bojo térmico partindo da desembocadura e se dispersando no oceano. No entanto, foi utilizado os seguintes procedimentos:

a) Resolução espacial: Mantida em 1 km, conforme a documentação dos dados dos produtos SLSTR. A área de cada pixel foi calculada pela equação:

Equação 1:
$$Area\ do\ pixel(km^2) = geospacial_lon_resolution \times geospacial_lat_resolution$$

Onde: *geospacial_lon_resolution* é a resolução espacial em latitude e *geospacial_lat_resolution* é a resolução espacial em longitude.

b) Delimitação geográfica: Para garantir que os cálculos fossem restritos à área costeira de interesse, os pixels foram filtrados com base em limites geográficos predefinidos, entre as coordenadas 34.7°E a 38.0°E de longitude e 21.0°S a 17.0°S de latitude. A seleção foi realizada seguindo a condição de latitudes (mín & max) e longitudes (min & max), que representa a região costeira de interesse.

No entanto, como os sensores de satélite também registram valores sobre áreas terrestres, foi necessário aplicar uma máscara de terra, assegurando que apenas os dados oceânicos fossem considerados na análise da pluma. Para isso, utilizou-se um shapefile global de feições terrestres (do Natural Earth), que permitiu identificar os pixels correspondentes à terra. Esses pixels foram automaticamente convertidos para valores nulos (NaN), sendo visualmente representados em vermelho escuro nos mapas, excluindo-os das estatísticas térmicas e da contagem de área da pluma.

c) Limiar térmico: Foi aplicada uma matriz de limiares de temperatura entre 19.5°C e 27.0°C, com incrementos de 0.3°C, ajustados individualmente por imagem conforme as condições atmosféricas.

d) Filtragem e contagem de pixels válidos: Após remoção dos pixels com nuvens (via NaN), os pixels que satisfaziam os critérios térmicos e geográficos foram contados:

$$\text{Equação 2: } N^{\circ} \text{Pixel validos} = \text{valid_lon_lat} \& \text{valid_TB};$$

Onde, *valid_lon_lat* - representa a condição de latitudes (mín & max) e longitudes (min & max), que representa a região costeira de interesse, e *valid_TB* – representa a temperatura do brilho válida

e) Cálculo da área da pluma térmica:

A área total da pluma foi determinada multiplicando-se o número de pixels válidos pela área de cada pixel:

$$\text{Equação 3: } \text{Area}_{\text{total}} = N^{\circ} \text{Pixel validos} \times \text{Area do pixel (km)}^2$$

Onde:

N° de pixels válidos - representa a quantidade de pixels que satisfazem simultaneamente os critérios: Estão dentro da região geográfica de interesse (definida por coordenadas de latitude e longitude), Não estão cobertos por nuvens (ou seja, não foram mascarados como NaN), e têm valores de temperatura de brilho dentro do intervalo limiar adotado.

Área do pixel (km^2) - é o valor correspondente à área física representada por cada pixel da imagem de satélite. Como os dados têm resolução espacial de 1 km, essa área é derivada do produto entre a resolução longitudinal e latitudinal.

Esse processo foi repetido para todas as imagens disponíveis no período estudado. Os resultados geraram uma matriz de áreas da pluma sob diferentes limiares térmicos, permitindo observar variações temporais e espaciais da pluma ao longo dos anos.

Metodologicamente, essa abordagem segue o padrão adotado por Machaieie e outros (2022), que utilizou limiares espectrais (Rrs555) para estimar a extensão de plumas fluviais, e por Laguna-Zárate e seus colaboradores (2021), que consideraram um gradiente térmico mínimo de 2 °C acima da temperatura ambiente para delimitar plumas térmicas em áreas costeiras influenciadas por fontes artificiais de calor.

Para determinar o limiar térmico que melhor representa a extensão da pluma do rio Zambeze nas 25 imagens representativas, aplicou-se um modelo de regressão linear simples entre a área da pluma contada e a descarga do rio em diferente limiar de TB, de modo a conhecer o melhor limiar que representa a área da pluma térmica. Os resultados foram organizados em uma curva de R^2 em função dos limiares testados, possibilitando a identificação do intervalo com maior sensibilidade à influência do rio

2.2.3. Relação entre a área da pluma térmica e a descarga fluvial do rio Zambeze

Para a verificação da relação e a força de associação entre a área da pluma e a descarga foi extraído também o coeficiente de determinação (R^2), entre área da pluma e a descarga fluvial com objetivo de verificar a força da relação entre a presença térmica da pluma e a contribuição do rio, ou seja, testar se a extensão da pluma responde proporcionalmente ao volume de descarga fluvial, e para responder isso foi calculada a equação da recta para conhecer as tendências destas duas variáveis. Também foi realizada uma análise de significância estatística para cada regressão, por meio do cálculo do p-valor. As correlações com ($P > 0,05$) foram consideradas não estatisticamente significativas e destacadas graficamente por triângulos.

2.2.4. Descrição espacialmente a pluma térmica do rio Zambeze com base em imagens diárias de TB

Com base nas imagens diárias de Temperatura de Brilho (TB) disponíveis, no recorte espacial compreendido entre as coordenadas 34.7°E a 38.0°E de longitude e 21.0°S a 17.0°S de latitude, foram aplicados procedimentos de filtragem e mascaramento destinados a isolar a assinatura térmica da pluma do rio Zambeze. Inicialmente, utilizaram-se os sinalizadores padrões do produto SLSTR (*flag_in_cloud* e *summary_cloud*) para identificar e excluir pixels afetados pela presença de nuvens, reduzindo assim o risco de interferências atmosféricas na análise da superfície oceânica.

Adicionalmente, foram calculadas as porcentagens de cobertura de nuvens em cada imagem, possibilitando avaliar o grau de comprometimento dos dados e a confiabilidade das observações diárias. Esse controle permitiu selecionar imagens com menor interferência atmosférica, assegurando maior contraste térmico entre as águas fluviais costeiras e o oceano adjacente. A pluma térmica foi então descrita a partir do contraste espacial evidenciado nas imagens, onde as águas continentais, mais quentes, destacaram-se em relação às águas oceânicas. A assinatura observada apresentou formatos variados, assumindo tanto feições concentradas próximas à foz como padrões mais difusos, resultantes da interação com ventos, correntes e processos de maré. Em diversos momentos, a pluma.

CAPÍTULO IV

3. Resultados

3.1. Contagem dos pixels da área da pluma em diferentes limites de temperatura

A Figura 04 apresenta o resultado da contagem de pixels válidos dentro da região geográfica delimitada pelo quadrado em preto com baixa opacidade. Os pixels foram contabilizados de acordo com os limites de TB estabelecidos. Esta é uma das 24 imagens analisadas, com intervalo de limites variando de 22,0 °C a 22,8 °C, em incrementos de 0,3 °C. Antes da contagem, cada imagem passou por tratamento prévio, incluindo mascaramento de nuvens e aplicação de limites inferiores de temperatura para excluir valores considerados nuvens. Para a imagem (figura 04) ilustrada, foi adotado um limite inferior de 21,0 °C, ou seja, pixels com TB abaixo deste valor foram tratados como nuvens e removidos da análise, conforme indicado pela mancha visível no canto inferior da figura. Entretanto, toda a região com TB entre 22 °C a 28 °C foi contabilizada e utilizada para o cálculo da área da pluma, servindo de base para a análise das correlações entre área da pluma e variáveis como a descarga fluvial. Esse mesmo procedimento foi aplicado a todas as imagens analisadas neste estudo, sempre dentro do retângulo definido, assegurando consistência metodológica na estimativa da área da pluma térmica

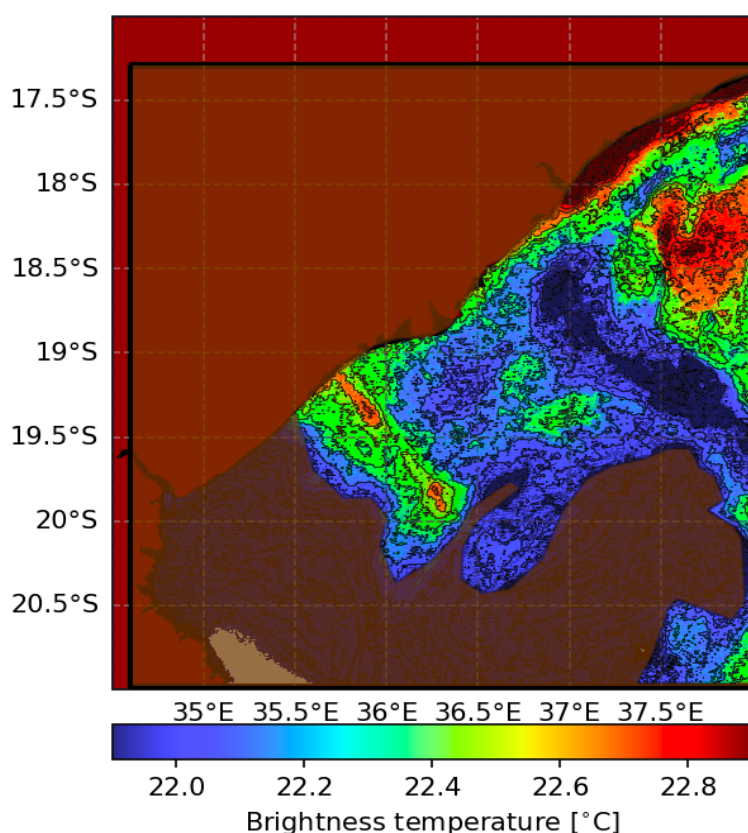


Figura 04: Contagem dos pixels válidos que representa a área da pluma

3.2.Determinação do melhor limiar que representa a área da pluma

A Figura 05 apresenta os coeficientes de determinação (R^2) entre a área da pluma térmica e a descarga fluvial do rio Zambeze, considerando diferentes limiares de temperatura de brilho (TB). Observa-se que a correlação é, em geral, baixa, com valores de R^2 variando entre 0,0 e 0,35, o que indica fraca relação estatística entre as variáveis analisadas. O maior valor de R^2 foi registrado em torno de 21,6 °C, atingindo aproximadamente 0,35. Esse resultado, embora moderado, destaca que este limiar térmico é o mais representativo para delimitar a área da pluma, pois marca a condição em que a influência da descarga fluvial se reflete de forma mais evidente na extensão da pluma térmica. Assim, pode-se considerar que a partir desse valor de temperatura de brilho a pluma tende a perder a sua assinatura térmica, delimitando o seu limite externo.

Nos demais limiares, os valores de R^2 mantêm-se próximos de zero. Essa baixa correlação indica que, além da descarga fluvial, outros fatores físicos podem exercer papel dominante na dispersão e variabilidade da pluma.

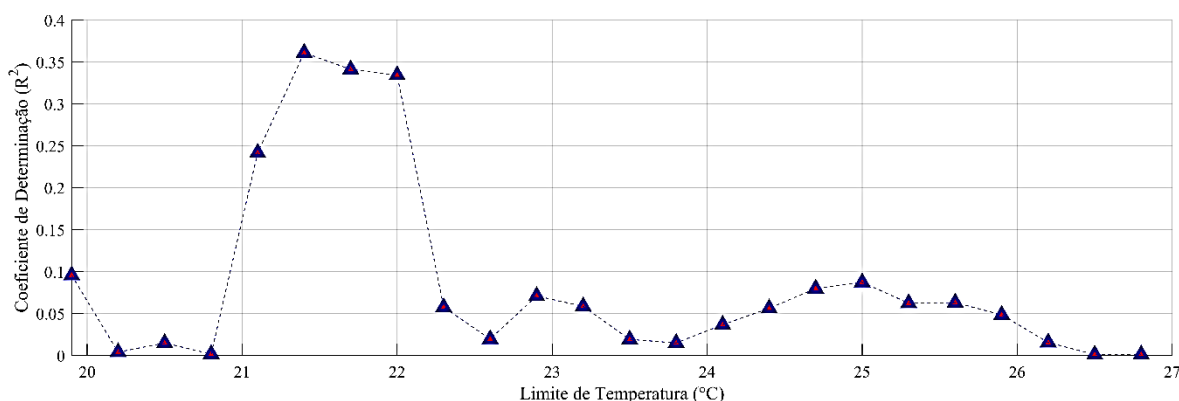


Figura 05: Coeficiente de Determinação (R^2) entre a área da pluma e descarga em diferentes limites de TB.

3.3. Variação da média mensal da descarga fluvial

A Figura 6 apresenta a variação da média mensal da descarga fluvial do rio Zambeze, medida na estação hidrológica de Tete, localizada a aproximadamente 440 km a montante da foz principal do rio. No período entre 2020 e 2024, observa-se um padrão sazonal bem marcado, com descargas máximas, dos quais alguns deles correspondentes à estação chuvosa (outubro a março) e valores mínimos durante a estação seca (abril a setembro). As maiores descargas do período analisado foram registradas em abril de 2022, acima de ($3500 \text{ m}^3/\text{s}$), novembro de 2022 ($3000 \text{ m}^3/\text{s}$), outubro de 2021, dezembro de 2023 e agosto de 2024. As menores descargas ocorreram em setembro de 2020 a baixo de ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$), agosto de 2021 ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$), junho de 2023 e maio de 2024. Embora nem todos os picos e declínios de vazão coincidam rigorosamente com os limites convencionais das estações chuvosa (outubro a março) e seca (abril a setembro), a figura evidencia a ocorrência de descargas máximas e mínimas bem distribuídas ao longo do período analisado, refletindo a variabilidade hidrológica mensal do rio Zambeze.

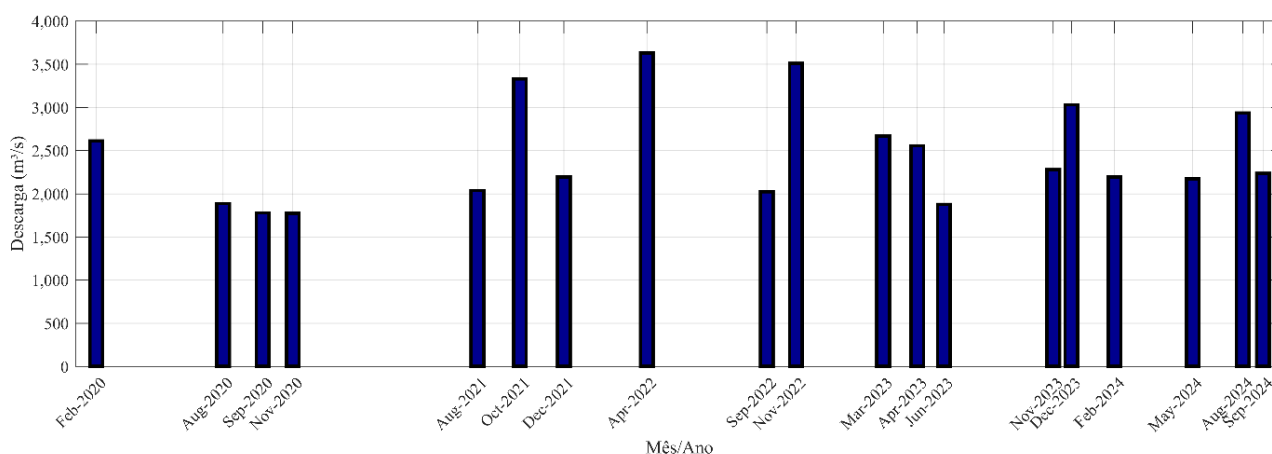


Figura 6: Media mensal da descarga do rio Zambeze

3.4. Relação entre a descarga fluvial a área da pluma térmica

As Figuras 7 apresentam a relação diária e o coeficiente de determinação entre a descarga fluvial do rio Zambeze e a área da pluma térmica. A análise evidencia um comportamento altamente variável, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,3 indicando que menos de 31% da variação da área da pluma pode ser explicada unicamente pela descarga fluvial. Esse valor baixo reforça que a expansão e retração da pluma térmica são fortemente influenciadas por outros fatores físicos, além da vazão do rio. A regressão linear $R^2=0,3$ indica inclinação negativa, confirmando que em alguns dias a pluma diminuiu mesmo quando a descarga aumentou (23-02-2020 e 06-03-2023). Em contrapartida, há episódios de resposta direta da pluma ao aumento da vazão, como em 03-12-2021, 26-11-2022, 24-04-2023, 09-12-2023 e 03-08-2024, quando descargas superiores a 2.000 m³/s coincidiram com áreas acima de 2.000 km². Já em 20-08-2021 e 27-09-2024 ocorreram áreas > 2.000 km² sob descargas moderadas (~2.000 m³/s), evidenciando a atuação de ventos e correntes superficiais. Esses contrastes demonstram que a relação não é linear e que fatores oceanográficos e atmosféricos podem suplantam a influência direta da vazão fluvial.

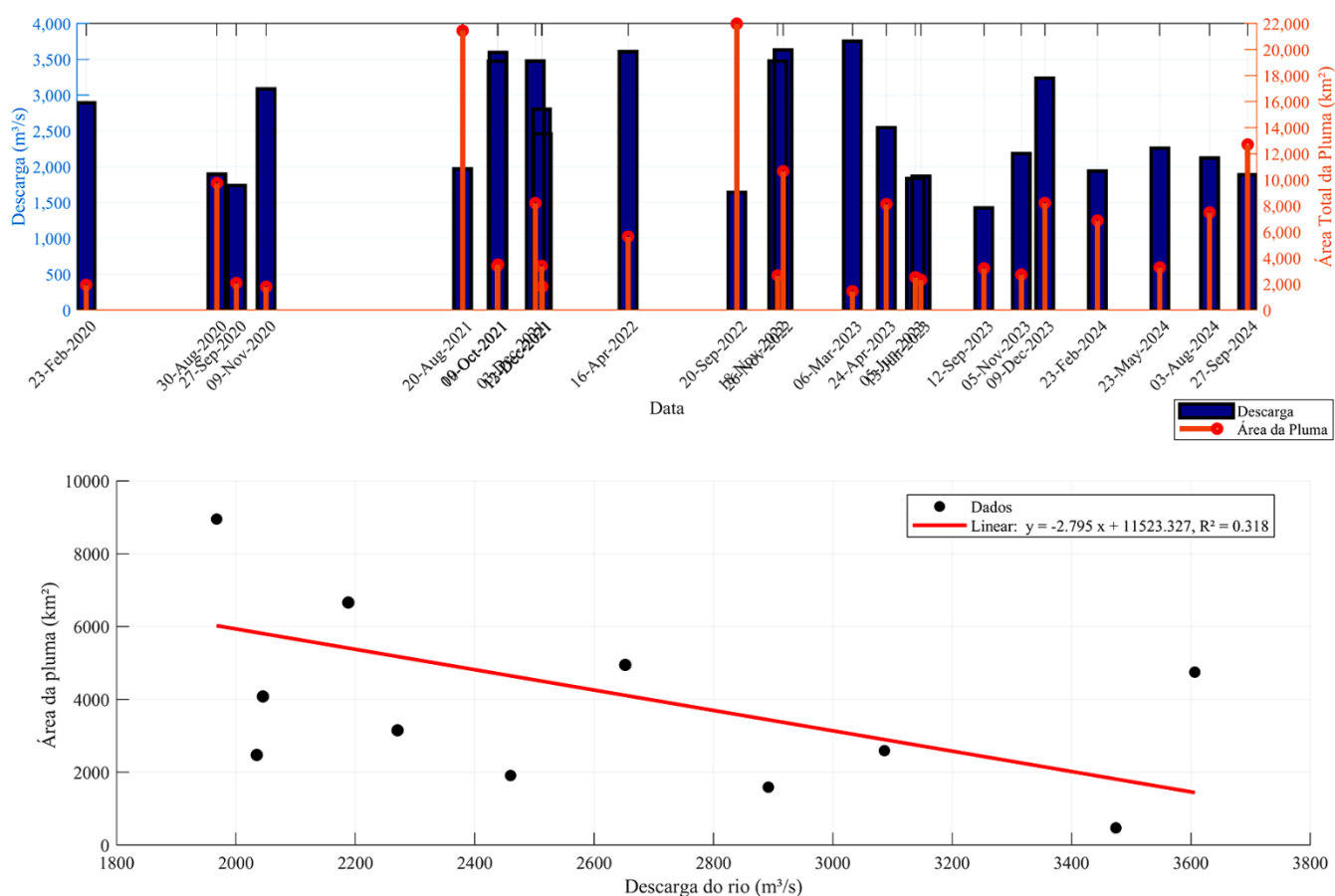


Figura 07: Área da pluma térmica em função da descarga do rio Zambeze. A linha indica a regressão linear ($Y = -2,795X + 11523,327$) e R^2 mostra a proporção da variabilidade explicada (31%)

3.5.Descrição espacial da pluma do rio Zambeze

Com base nas imagens diárias de TB, (Figuras 8, 9 e 10), foi possível identificar distintos padrões espaciais e térmicos associados à pluma do rio Zambeze. As temperaturas nestas imagens variaram entre aproximadamente 20.0°C e 24 °C com suas respectivas percentagens das nuvens encontradas, destacando um contraste térmico evidente entre as águas fluviais costeiras e as águas oceânicas adjacentes.

Os padrões de dispersão oceânica intensa, caracterizados pelo espalhamento da pluma em direção ao mar aberto, foram observados em diversas datas: 30 de agosto de 2020 (pluma arredondada, TB de 22,4 °C), 20 de agosto de 2021 (pluma irregular, TB entre 21,5 °C e 22,0 °C) e 16 de abril de 2022 (pluma pouco definida, com TB de 23,65 °C decrescendo para 22,05 °C), nas figuras 8 e 9. Padrões semelhantes ocorreram em 9 de dezembro de 2023, 23 de fevereiro de 2024 e 3 de agosto de 2024 (Figura 10), onde a pluma apresentou gradiente térmico decrescente da foz para o mar, sugerindo influência de processos oceanográficos como correntes divergentes e vórtices (ver nos anexos) . Em particular, no dia 3 de agosto de 2024, observou-se um pequeno deslocamento da pluma próximo à foz, com formação de bulbo térmico (22,4 °C), ao longo de sua expansão (figura 10).

No dia 27 de setembro de 2024 (figura 10), a pluma exibiu forma alongada, com temperaturas entre 22,3 °C e 22,8 °C, reforçando o padrão de dispersão orientada por correntes costeiras. Em contraste, eventos de confinamento costeiro nos quais a pluma permanece restrita à zona próxima da costa foram evidentes em 27 de setembro de 2020 e nos dias 9 e 10 de outubro de 2021 (Figuras 8 e 9), com plumas lineares e estreitas, variando de 21,6 °C a 22,7 °C, indicando ausência de forçantes de dispersão e dominância de correntes paralelas à linha de costa.

Eventos intermediários com dispersão parcial e alongamento costeiro, sinalizando uma atuação combinada de forçantes físicas e oceânicas, foram identificados em 3 de dezembro de 2021 (pluma alongada ao sudeste, com TB de 23,5 °C), (figura 8), 13 de junho de 2023 (pluma com TB interna de 22,18 °C), (figura 9) e 20 de setembro de 2022 (TB entre 23,65 °C e 22,65 °C), (figura 9). Em 26 de novembro de 2022, (figura 9), registrou-se um bulbo térmico afastado da costa, com temperaturas

entre 22,0 °C e 22,8 °C, sugerindo forte influência de processos mesoescalares (ver Anexos – Figuras 11 e 13).

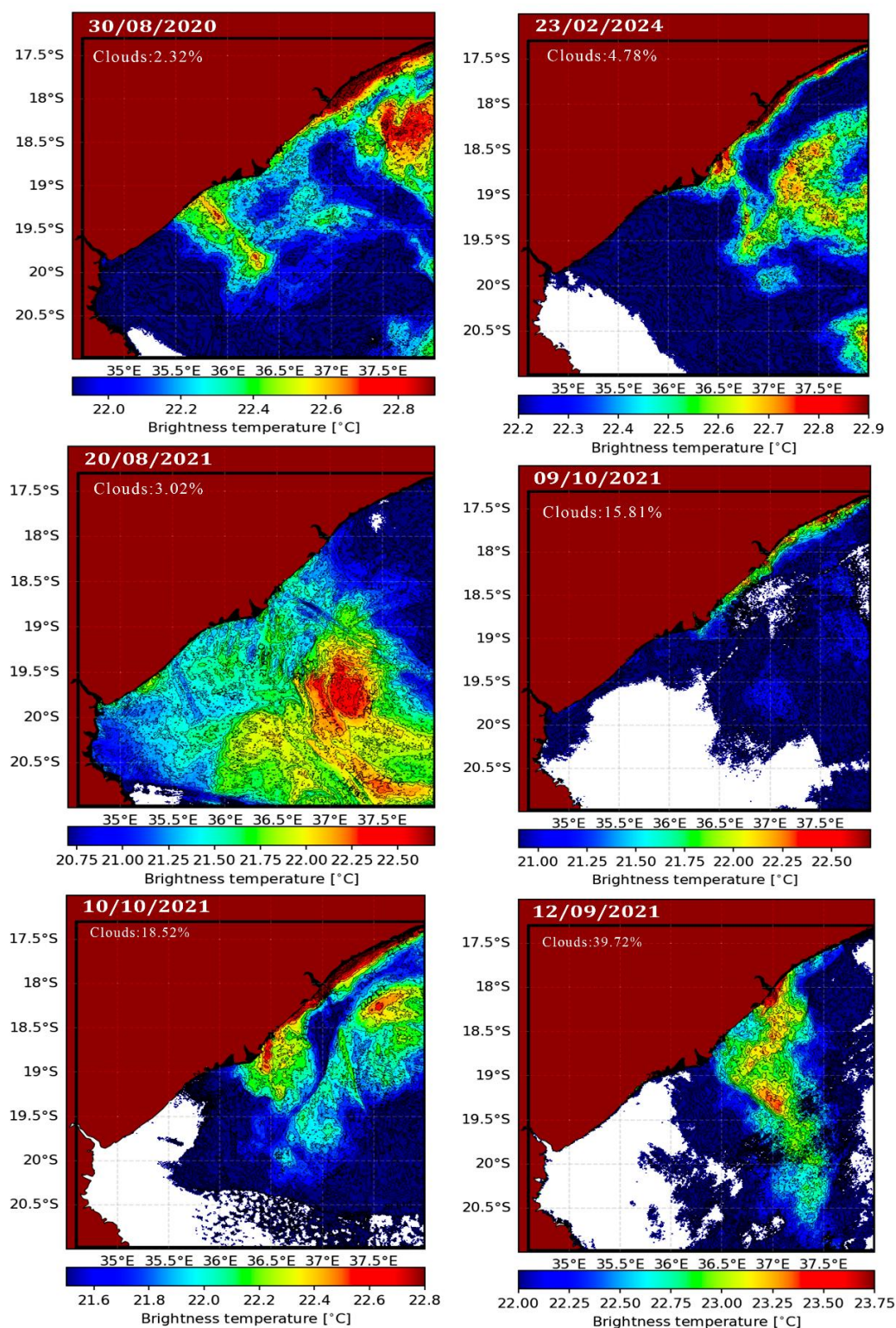


Figura 8: Temperatura do Brilho (°C) diária de 2020 a 2021

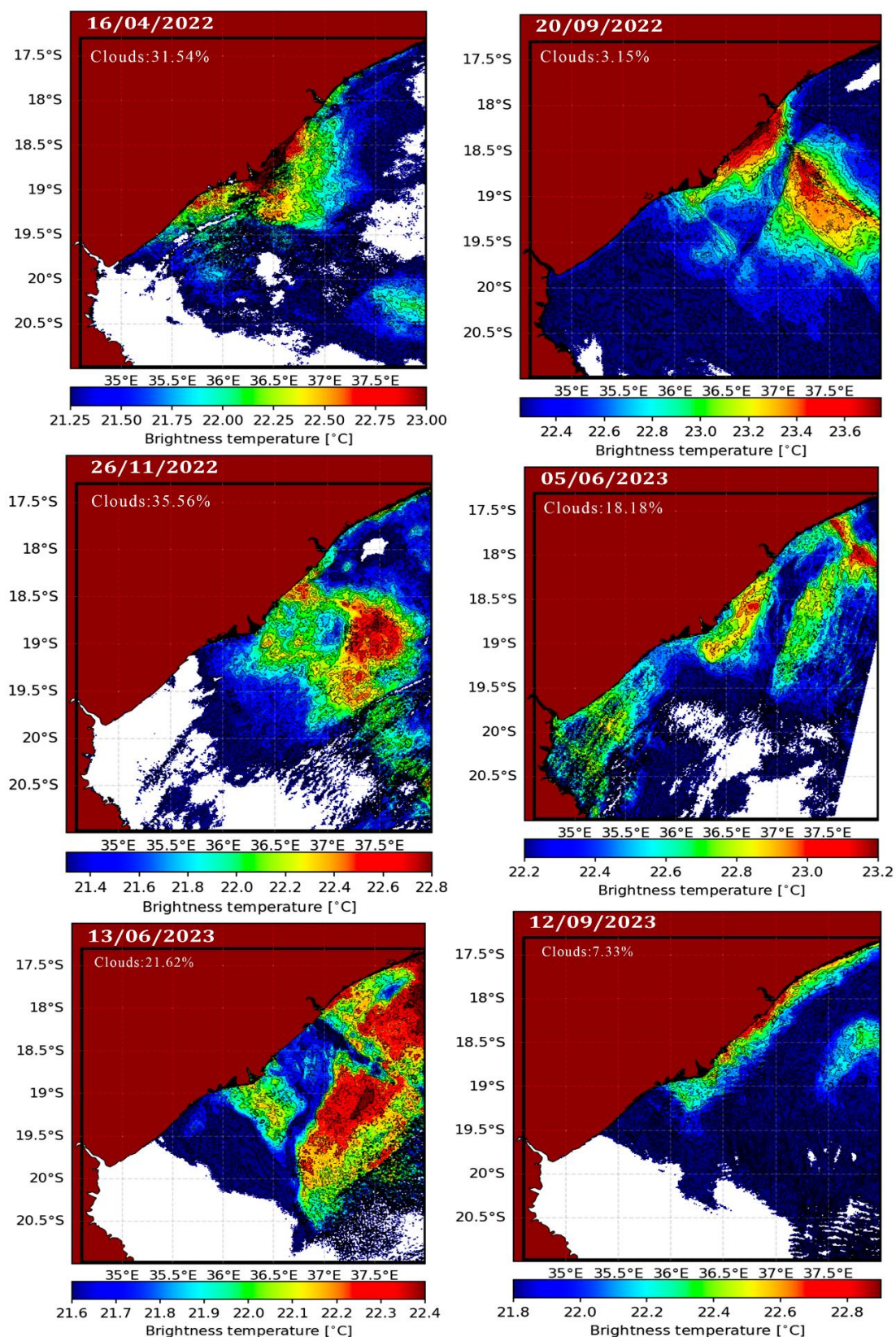


Figura 9: Temperatura do Brilho (°C) diária de 2022 a 2023

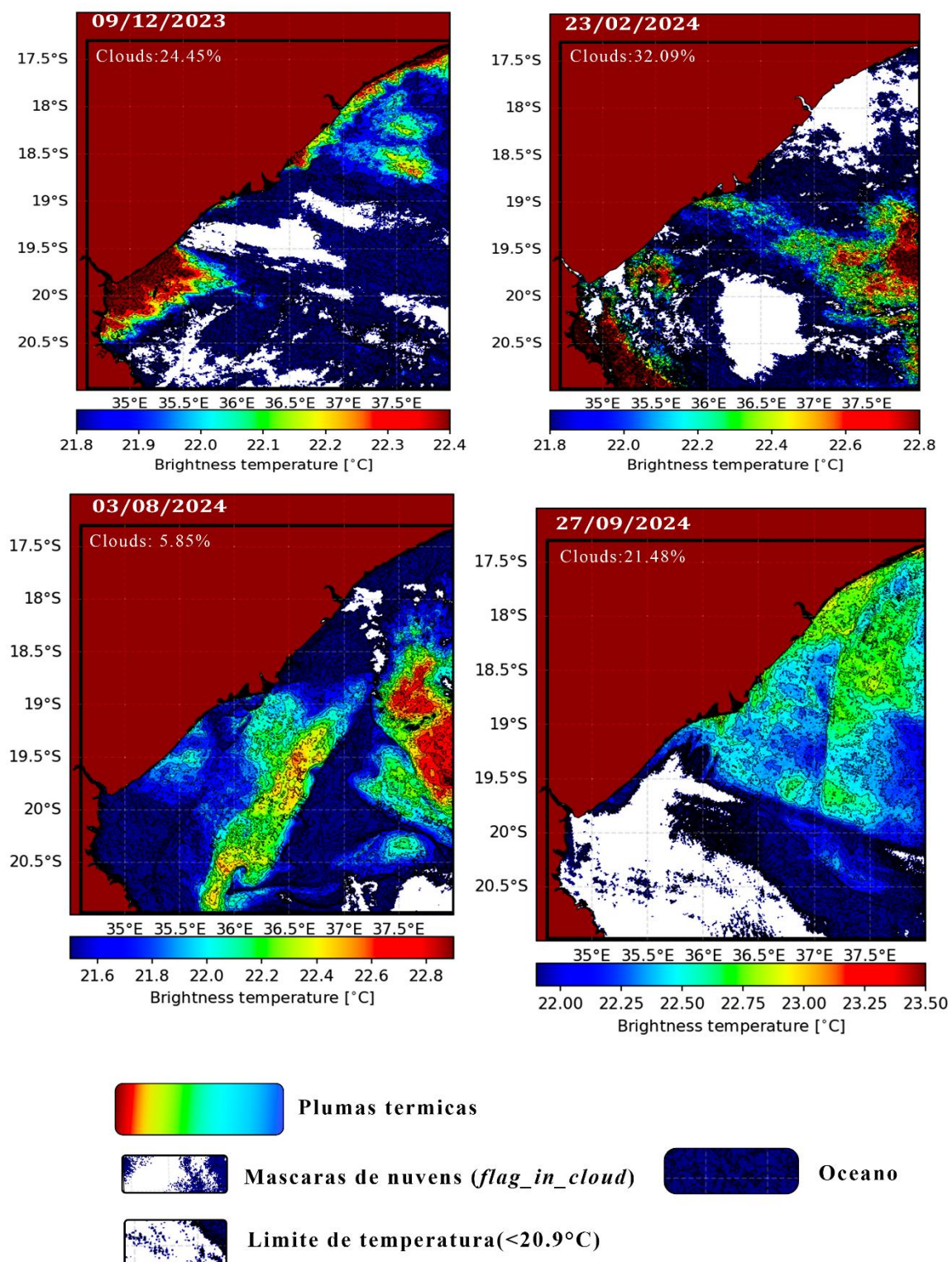


Figura 10: Temperatura do Brilho (°C) diária de 2023 a 2024

4. Discussão

A análise dos dados do sensor SLSTR, entre 2020 e 2024, evidenciou elevada variabilidade espacial e temporal na assinatura térmica da pluma do rio Zambeze, decorrente da interação entre a descarga fluvial e os forçantes físicos regionais. A TB de 21,6 °C apresentou o maior coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,35$), indicando uma correlação moderada entre o limiar adotado e a extensão da pluma. Este valor sugere que 21,6 °C é um indicador útil para distinguir águas sob influência fluvial das águas oceânicas adjacentes, sendo relevante para delimitação da pluma em análises temporais comparáveis, abordagem metodológica de estudos como Moller e outros (2009), que salientam a importância de limiares consistentes para análises temporais comparáveis.

A relação entre a área da pluma térmica e a descarga do rio Zambeze apresentou um coeficiente de determinação moderado ($R^2 = 0,31$), indicando que a vazão explica cerca de 31% da variabilidade na extensão da pluma. Esse valor é inferior ao encontrado por Nehama (2008), que observou uma correlação mais forte, especialmente durante picos de vazão com defasagem temporal entre os dados da vazão e área da pluma nos períodos de 2002 a 2006. Por outro lado, Machaie et al. (2022) utilizaram a regressão linear múltipla entre a reflectância (R_{rs555}) e observaram maior influência dos ventos do que da descarga anuais do Rio Zambeze. Esses achados sugerem que, embora a descarga fluvial forneça o aporte inicial de água doce e calor, fatores oceânicos e atmosféricos, como ventos costeiros, correntes de superfície, desempenham um papel determinante na modulação da área da pluma. No entanto, estes resultados corroboram observações de Walker (1996) e Malauene et al. (2018), que destacam a importância desses forçantes na dinâmica da pluma do Zambeze.

A morfologia da pluma do rio Zambeze apresentou variação significativa ao longo do período estudado, refletindo a interação entre a descarga fluvial e os forçantes oceânicos e atmosféricos. Configurações arredondadas ou bulbos bem definidos estiveram associadas a descargas elevadas, superiores a 2 000 m³/s, combinadas com vórtices anticiclônicos e correntes divergentes, favorecendo a dispersão para o oceano aberto e mantendo contraste térmico acentuado, em concordância com padrões descritos por Hopkins (2013), Morelli et al. (2010); e Malauene et al. (2018). Por outro lado, configurações alongadas e paralelas à costa ocorreram em condições de ventos persistentes e correntes costeiras paralelas, canalizando a pluma ao longo da linha de costa e promovendo a diluição gradual da assinatura térmica, mesmo em períodos de descarga elevada. Plumas amplas, observadas em situações de descarga moderada, resultaram da influência de giros de mesoescala que aumentaram a dispersão lateral, demonstrando que fatores oceânicos podem dominar a forma e a extensão da pluma independentemente da vazão fluvial. Esses padrões evidenciam que, embora a descarga seja necessária para a formação da pluma, a sua magnitude por si só não garante maior extensão, sendo o

comportamento final principalmente modulada por ventos, correntes e estruturas de mesoescala, corroborando estudos de Walker (1996), Molleri et al. (2010); Malauene et al. (2018) e Otero, (2009).

5. Conclusão

O presente estudo permitiu avaliar de forma detalhada a assinatura térmica da pluma do rio Zambeze, utilizando dados diários de TB. A aplicação sistemática de limiares térmicos progressivos possibilitou identificar o intervalo de temperaturas que melhor representa a extensão espacial da pluma, destacando-se o limiar de 21,6 °C como o ponto que apresentou a maior correspondência entre a área detetada e a descarga fluvial, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0.35$ utilizado para selecionar o limiar mais representativo. Esse valor indica que, para o limiar escolhido, aproximadamente 35% da variabilidade na área detetada pode ser explicada pelo ajuste do critério térmico, evidenciando que o limiar de 21,6 °C fornece a melhor delimitação da pluma.

A contagem dos pixels válidos sob diferentes limiares térmicos permitiu mapear a área da pluma e observar a sua variabilidade espaço-temporal, revelando padrões térmicos coerentes com a morfologia esperada da pluma e suas ligações à foz do rio. A delimitação criteriosa do domínio geográfico, aliada ao rigoroso filtro de qualidade das imagens, garantiu que os dados analisados refletissem fielmente a dinâmica da pluma sem interferências atmosféricas ou terrestres.

Contudo, a análise estatística da relação entre a área da pluma e a descarga fluvial demonstrou que, apesar do limiar térmico de 21,6 °C ser o melhor indicador para a delimitação espacial da pluma, a variação da sua área não está diretamente dependente do volume de água doce descarregada pelo rio. A correlação moderada ($R^2 = 0.31$) indica que menos de 31% da variabilidade da área da pluma pode ser explicada exclusivamente pela descarga, revelando a influência significativa de fatores físicos regionais, como ventos costeiros, correntes oceânicas e estruturas de mesoescala. Este resultado corrobora a complexidade multifatorial da dinâmica costeira, onde processos atmosféricos e oceânicos interagem com o aporte fluvial para determinar a forma e a extensão da pluma térmica.

A descrição espacial da pluma, baseada nas imagens diárias analisadas, evidenciou padrões distintos ao longo do tempo, incluindo eventos de dispersão oceânica intensa com formação de bulbos térmicos, alongamentos costeiros orientados por correntes e episódios de confinamento próximo à costa, dependentes das condições meteorológicas e oceanográficas vigentes. Estes comportamentos demonstram que a pluma do Zambeze é uma estrutura altamente dinâmica, sujeita à ação combinada de múltiplos forçantes, o que dificulta a predição simplista baseada apenas na descarga fluvial.

Dessa forma, o estudo evidencia que, embora o sensoriamento remoto com TB permita identificar a pluma térmica, por si só não é uma ferramenta totalmente eficaz para mapear e monitorizar sua extensão. A aplicação de critérios técnicos rigorosos na seleção das imagens e na interpretação dos limiares térmicos pode aumentar significativamente a precisão da detecção. Entretanto, para compreender plenamente a dinâmica da pluma, é fundamental integrar os dados de temperatura com

informações sobre ventos, correntes e fenômenos mesoescalares, permitindo distinguir entre variações associadas à descarga do rio e aquelas resultantes de processos oceanográficos locais.

Por fim, embora a metodologia adotada tenha revelado importantes avanços na caracterização térmica da pluma, limitações inerentes ao período e à disponibilidade de imagens válidas, bem como à impossibilidade de quantificar isoladamente a contribuição de cada forçante físico, apontam para a necessidade de estudos complementares.

6. Recomendações

Recomenda-se a inclusão de dados de ventos, correntes superficiais, vórtices anticiclónicos, precipitação, integrados, assim como o desenvolvimento de modelos numéricos acoplados, para aprofundar a compreensão da interação entre rio e oceano neste complexo sistema costeiro do banco de Sofala. A continuidade do monitoramento térmico por satélite, aliada a abordagens multidisciplinares, constituirá uma base sólida para apoiar estratégias de gestão e conservação das zonas costeiras influenciadas pela pluma do rio Zambeze

7. Bibliográficas Referências

- Alberto, M. (2002). *Um modelo conceitual de gestão de aflúências estuarinas de água doce Estuários*.
- Azevedo, I., Duarte, P., & Bordalo, A. (2007). .Compreendendo a dinâmica espacial e temporal das principais características ambientais num estuário mesotidal da Atlântica (Douro, NW, Portugal).
- Ahn, J., Stanley, B., Grant, Paul, M., Digiacomo, Nikolay, P. N., . . . Cristiane, S. Q. (2005). *Coastal Water Quality Impact of Stormwater Runoff from an Urban Watershed in Southern California*. pp. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 5940-5953.
- Albuquerque, A. S., & Belem, A. L. (Março de 2016). *Dinâmica da dispersão de plumas na plataforma continental de Cabo Frio-RJ: uma análise nas escalas diária, sazonal e interanual*.
- Ana Luiza, S. A., & Andre, L. B. (Março de 2016). *Dinâmica da dispersão de plumas na plataforma continental de Cabo Frio-RJ: uma análise nas escalas diária, sazonal e interanual*.
- Anderson, L. O., Júnior, O. A., & Arai, E. (2003). *Sensor MODIS: Uma abordagem geral*.
- Arai, E. (28 de Agosto de 2014). *Sensor MODIS: descricao e produto*.
- Arraut, E. M., Rudorf, C. M., Barbosa, C. C., Carvalho, J. C., Filho, W. P., & Novo, E. M. (21 de Abril de 2005). *Estudo do Comportamento Espectral da Clorofila e dos Sólidos em Suspensão nas Águas do Lago Grande de Curuai (Pará), na Época da Seca, Através de Técnicas de Espectroscopia de Campo*.
- Azevedo, H. M. (2020). *AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ESTIMADA PELO SENSOR ABI/GOES-16, NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL E SUDOESTE*.
- Barale, V., & Doerffer, R. (1993). *Ocean Colour and CZCS Applications in and around Europe*.
- Barile, P. J. (1 de September de 2004). *Evidence of Anthropogenic Nitrogen Enrichment of the Littoral Waters of East Central Florida*. pp. <https://doi.org/10.2112/04-0212.1>.
- Barton, I. J. (1995). *Satellite-derived sea surface temperatures: Current status*.
- Barton, I. J. (15 de Maio de 1995). *Temperaturas da superfície do mar derivadas de satélite: Situação atual*.

- Beilfuss, R., & Dos Santos, D. (2001). Patterns of hydrological change in the Zambezi Delta, Mozambique. *Working Paper No. 2, Program for the Sustainable Management of Cahora Bassa Dam*.
- Beilfuss, R., & Brown, C. (2010). *Assessment of environmental flow requirements for the Zambezi River Basin*. International Union for Conservation of Nature (IUCN).
- Binding, C. E., & Bowers, D. G. (July de 2003). *Measuring the salinity of the Clyde Sea from remotely sensed ocean colour*. pp. DOI:10.1016/S0272-7714(02)00399-2.
- Bowers, D., & Brett, H. (2007). *A relação entre CDOM e salinidade em estuários Uma solução analítica e gráfica*. p. *Journal of Marine Systems*.
- Brown, O., Minnett, P., Evans, R., Kearns, E., Kilpatrick, K., Kumar, A., . . . Závody, A. (1999). *Algoritmo de temperatura da superfície do mar infravermelho MODIS Algoritmo Documento de base teórica*.
- Capão, L. (2007). *Análise de imagens MERIS para cartografia de ocupação de solo de Portugal*.
- Chen, J., Yin, S., Xiao, G., Xu, Q., & Lin, C. (25 de Janeiro de 2014). *Derivação da reflectância de sensoriamento remoto de águas turvas do Caso II usando um modelo baseado em bandas infravermelhas de ondas curtas verdes*.
- Choung, Y.-J., & Kim, J.-M. (28 de August de 2019). *Relationship between the In-situ-measured Sea Surface Temperatures and the Landsat-derived Brightness Temperatures: A Case Study in the West Coast of South Korea*. pp. *J. of Coastal Research*, 91(sp1):336-340 (2019). <https://doi.org/10.2112/SI91-068.1>.
- Constantin, S. D. (2016). *Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data*.
- Davies, B. R., Beilfuss, R. D., & Thoms, M. C. (2000). *Cahora Bassa retrospective, 1974–1997: effects of flow regulation on the lower Zambezi River*. *International Journal of Water Resources Development*, 16(3), 355–374.
- D'Alimonte, D., & Zibordi, G. (2003). *Phytoplankton determination in an optically complex coastal region using a multilayer perceptron neural network*.
- Dzwonkowski, B. (26 de Agosto de 2005). *Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data*. p. www.elsevier.com/locate/csr.

- Esteves, F. D. (1998). *Fundamentos de Limnologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência,.
- Evans, M. A., Fahnenstiel, G., & Scavia, D. (2011). *Incidental oligotrophication of North American Great Lakes*. . pp. *Environ. Sci. Technol.* 45 (8), 3297–3303.
- Fernández-Nóvoa, D., Costoya, X., deCastro, M., & Gómez-Gesteira, M. (2019). *Dynamic characterization of the main Cantabrian river plumes by means of MODIS*. Physics Department, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193, Portugal. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.06.005>.
- Fong, D., & Stacey, M. (2003). *Dispersão horizontal de uma pluma costeira próxima ao leito*. pp. *Diário da Mecânica dos Fluidos*, 489: 239-267.
- Frey, D. I., Morozov, E., & Smirnova, D. (2023). *Sea level anomalies affect the ocean circulation at abyssal depths*. pp. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48074-9>.
- Froidefond, J. J. (1998). *Variabilidade da pluma turva Gironde por sensoriamento remoto. Efeitos de fatores climáticos (Vol. 21)*. *Oceanologica Acta*.
- Fu, L. L., & Cazenave, A. (09 de Novembro de 2000). *Altimetria de Satélite e Ciências da Terra*.
- Gammelsrod, T. (1996). *Efeito da gestão do rio Zambeze na pesca de camarão da sofala*.
- Gammelsrød, T. (1 de July de 1992). *Variation in shrimp abundance on the Sofala Bank, Mozambique, and its relation to the Zambezi River runoff*. pp. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 35, Pages 91-103. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(05\)80058-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(05)80058-7).
- Gancheva, I., Peneva, E., & Slabakova, V. (October de 2021). *Detecting the Surface Signature of Riverine and Effluent Plumes along the Bulgarian Black Sea Coast Using Satellite Data*. p. <https://doi.org/10.3390/rs13204094>.
- Gangwar, R. K., Chakraborty, A., Chakraborty, P., & Thapliyal, P. K. (February de 2023). *Uncertainty Analysis of SCATSAT-1 Brightness Temperatures: A Preliminary Study over Indian Ocean*. pp. *J Indian Soc Remote Sens* 51, 299–305. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01594-9>.
- García-Isarch, E., Juárez, A., Ruiz, J., Romero, Z., Jiménez, P., & Baldó, F. (2006). *Spawning and nursery habitat of the wedge sole *Dicologlossa cuneata* (Moreau, 1881) in the Gulf of Cádiz (SW Spain)*. p. DOI: <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2123>.

- Gaspar, R., Marques, L., Pinto, L., Baeta, A., Pereira, L., Martins, I., . . . Neto, J. M. (13 de Setembro de 2016). *Origin here, impact there—The need of integrated management for river basins and coastal areas*. p. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.013>.
- Geernaert, G. L., & Plant, W. J. (1990). *Ondas e fluxos de superfície*.
- Geyer, W. e. (2004). *O transporte de água doce e a dinâmica da costa oeste do Maine atual*. pp. *Pesquisa da Plataforma Continental*, 24: 1339-1357.
- Goodyear, C. D. (1982). *Atlas of the Spawning and Nursery Areas of Great Lake Fishes*.
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., & Baker, K. S. (1988). *O modelo semianalítico de radiancia de cor do Oceano*.
- Grimes, C. B., & Finucane, J. H. (1991). *Spatial distribution and abundance of larval and juvenile fish, chlorophyll and macrozooplankton around the Mississippi River discharge plume, and the role of the plume in fish recruitment*. pp. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, Vol. 75: 109-119.
- Grimes, C. B., & Kingsford, M. J. (1996). *How do riverine plumes of different sizes influence fish larvae: do they enhance recruitment?*. pp. *Journal of Marine and Freshwater Research* 47, 191–208.
- Harries, J. E., Llewellyn-Jones, D. T., Minnett, P. J., Saunders, R. W., Zavody, A. M., Wadhams, P., . . . Houghton, J. T. (1998). *Observações da temperatura da superfície do mar para pesquisa climática*. Google Scholar.
- Hickey, B. M., & Banas, N. S. (2003). *Oceanography of the Pacific Northwest coastal ocean and estuaries with application to coastal ecosystems*. pp. *Estuaries* 26 (48), 1010–1031.
- Hickey, B., Geie, S., Kachel, N., & MacFadyen, A. (July de 2005). *A bi-directional river plume: The Columbia in summer*. pp. *Continental Shelf Research* 25 (2005) 1631–1656.
- Hoguane, A. M. (2007). *Perfil diagnóstico da zona costeira de moçambique*.
- Hopkins, J., Lucas, M., Dufau, C., Sutton, M., Stum, J., Lauret, O., & Channelliere, C. (14 de setembro de 2013). *Deteção e variabilidade da pluma do Rio Congo a partir de satélites temperatura da superfície do mar, salinidade, cor do oceano e nível do mar*. p. www.elsevier.com/locate/rse.

- Horner-Devine , A. R., Hetland , R. D., & MacDonald, D. G. (Janeiro de 2015). *Mistura e transporte em plumas de rios costeiros*. pp. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.
- INPE, I. (2001). *Introdução ao sensoriamento remoto – apostila de sensoriamento remoto*.
- Jensen, J. (2000). *Deteção remota do Meio Ambiente*.
- Jerlov, N. (1968). *Optical oceanography*.
- Justice, C. O., Townshend, J. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., . . . Moristte, J. T. (2002). *An overview of MODIS Land data Processing and product status. Remote Sensing of Environment*.
- KarisAllen, J., & Kurylyk, B. (2021). *Caracterização baseada em drones da dinâmica da pluma de água fria da primavera intermareal*.
- Khanal, S. K. (22 de 12 de 2020). *Sensoriamento remoto na agricultura – realizações, limitações e oportunidades*.
- Kilpatrick, K., Podesta, G., & Evans, R. (2001). *Visão geral do algoritmo Pathfinder do radiômetro avançado de altíssima resolução NOAA/NASA para temperatura da superfície do mar e banco de dados de correspondência associado*.
- Kim, S., Terrill, E., Bruce , D., & Cornuelle. (21 de August de 2009). *Assessing coastal plumes in a region of multiple discharges: the U.S.-Mexico border*.
- Kingsford , M. J., & Suthers, I. M. (May de 1994). *Dynamic estuarine plumes and fronts: importance to small fish and plankton in coastal waters of NSW, Australia*. pp. *Continental Shelf Research*. Pages 655-672.
- Kirk , J. O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge.
- Koblinsky, C. J. (30 de Janeiro de 2018). *Observando os Oceanos em Tempo Real*.
- Konda, M., Imasato, N., Nishi, K., & Toda, T. (1994). *Medição da emissividade da superfície do mar*.
- Laguna-Zarate, L., Barrios-Piña , H., Ramírez-León, H., García-Díaz, R., & Becerril-Piña, R. (15 de December de 2021). *Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling*. pp. *J.Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1437. <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>.

- Lahet, F., & Stramski, D. (Setembro de 2009). *Imagens MODIS de plumas turvas nas águas costeiras de San Diego durante tempestades.*
- Lins, R. C. (2017). *Avaliação espaço-temporal da clorofila-a em um sistema estuarino-lagunar utilizando sensoriamento remoto e técnicas estatísticas multivariadas.*
- Liu, Y., Chin, T. M., & Minnett, P. J. (2017). *Erros de amostragem em temperaturas da superfície do mar infravermelha derivadas de satélite. Parte II: Sensibilidade e parametrização.* Google Scholar.
- Lourenço, G. F. (2018). *Estudo da origem da matéria orgânica em sedimentos do fundo com base na razão C/N no estuário de Bons Sinais–Quelimane.*
- Luo, B., & Minnett, P. J. (9 de October de 2020). *Comparison of SLSTR Thermal Emissive Bands Clear-Sky Measurements with Those of Geostationary Imagers.* pp. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, 4600 Rickenbacker Causeway. *Remote Sens.* 2020, 12, 3279; doi:10.3390/rs12203279.
- Lutjeharms, J. (2006). *Os Oceanos Costeiros da África do Sudeste, no Mar.*
- Machaieie, H. (2012). *Massas de água, circulação, estratificação e frentes em banco de sofala. Moçambique (Quelimane).*
- Machaieie, H. A., Nehama, F. P., Silva, G. C., & de Oliveira, E. N. (2022). *Avaliação por satélite da variabilidade da pluma costeira e sua relação com variáveis ambientais no Banco de Sofala.*
- Malauene, B. S., Moloney, C. L., Lett, C., Roberts, M. J., Marsac, F., & Penven, P. (Setembro de 2018). *Impact of offshore eddies on shelf circulation and river plumes of the Sofala Bank, Mozambique Channel.* pp. Pages 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.05.001>.
- Malauene, B. S., Lett, C., Marsac, F., Roberts, M. J., Brito, A., Abdula, S., & Moloney, C. L. (31 de May de 2021). *Spawning areas of two shallow-water penaeid shrimps (Penaeus indicus and Metapenaeus monoceros) on the Sofala Bank, Mozambique.* pp. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* Volume 253, 107268. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107268>.
- Masuda, K., Takashima, T., & Takayama, Y. (1988). *Emissividade de águas puras e marinhas para a superfície do mar modelo nas regiões da janela infravermelha.*
- Merchant, C. J. (2013). *Thermal Remote Sensing of Sea Surface Temperature.*

- Mission., C. S.-3. (20 de Setembro de 2019). *Product Data Format Specification - SLSTR Level 1 Products*.
- Mobley, C. D. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press.
- Moller, G. S., Evelyn, M., Novo, M., & Kampel, M. (16 de Dezembro de 2005). *Variabilidade espaço-temporal da pluma do rio Amazonas com base na cor do oceano satélite*. p. www.elsevier.com/locate/csr.
- Moller, G. S., Novo, E. M., & Kampel, M. (12 de Dezembro de 2009). *Variabilidade espaço-temporal da pluma do rio Amazonas com base na cor do oceano Satélite*. p. www.elsevier.com/locate/csr.
- Moreira, A. (2003). *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Métodos de Aplicação*.
- Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*.
- Morel, A. G. (1980). *Relatório do grupo de trabalho sobre aquarela*.
- NASA. (2012). *MODIS Atmosphere Product Descriptions*.
- NASA, .. (2003). *MODIS L1 Products Users Guide*. Nasa Goddard Space Flight Center USA.
- Nehama, F. P., & Razão, C. J. (15 de Junho de 2021). *A resposta do vento da pluma do Rio Zambeze ao longo do Banco de Sofala*.
- Nehama, F. P. (2012). *Modelling the Zambezi river plume using the regional oceanic model system*. pp. (Ph.D Thesis, Cape Town, South Africa: Faculty of Sciences, Cape Town University). <http://www.repositorio.uem.mz/handle258/713>.
- Nehama, F. P., & Reason, C. J. (2014). *Morfologia da Pluma do Rio Zambeze no Sofala Bank, Mozambique*.
- Netzband, M. S. (2007). *Sensoriamento remoto aplicado para planejamento urbano, governança e sustentabilidade*. Springer Science & Business Media.
- Nezlin, N. P., DiGiacomo, P. M., Diehl, D. W., Burton, J. H., Johnson, S. C., Mengel, M. J., . . . Wang, M. (23 de Julho de 2002). *Stormwater plume detection by MODIS imagery in the southern California coastal ocean*.

- Nguyen , D. T., Ayoub, N., Marsaleix, P., Toubanc, F., Mey-Fremaux, P. D., & Duc, T. N. (3 de March de 2021). *Variability of river plume in the Gulf of Tonkin*. pp. Departamento de Espaço e Aeronáutica, Universidade de Ciência e Tecnologia de Hanói (USTH), Vietnã.
- Njoku, E. O. (1990). *Detecção remota por satélite da temperatura da superfície do mar*.
- Novo, E. d. (2001). *Comportamento Espectral da Água* .
- Ogashawara, I. M. (2017). *Remote sensing of inland waters: background and current state-of-the-art*. In *Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters*.
- Oguntoyinbo, O. S. (2023). *Observations of the zambezi river coastal current*. p. URI: <https://udspace.udel.edu/handle/19716/33357>.
- Oliveira, A. L. (24 de Fevereiro de 2006). *Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas*.
- Orlandi , L., Bentivoglio, F., Carlino, P., Calizza, E., Rossi, D., Costantini, M. L., & Rossi, L. (14 de July de 2014). *$\delta^{15}\text{N}$ variation in *Ulva lactuca* as a proxy for anthropogenic nitrogen inputs in coastal areas of Gulf of Gaeta (Mediterranean Sea)*. p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.05.036>.
- Osadchiev, A., & Sedakov, R. (2018). *Dinâmica de propagação de pequenas plumas fluviais na costa nordeste do Mar Negro observadas pelo Landsat 8 e Sentinel-2*. pp. Páginas 522-533. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.043>.
- Paily, P. P., & Sayre, W. W. (1977). *A MODEL FOR SHORE-ATTACHED THERMAL PLUMES IN RIVERS*. pp. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, and Iowa City, EUA.
- Pelta, R., Chudnovsky, A. A., & Schwartz, J. (January de 2016). *The spatial and temporal behavior of brightness temperature in Tel-Aviv and its application to air temperature monitoring*. pp. *Environ Pollut. ; 208(Pt A): 153–160*. doi:10.1016/j.envpol.2015.09.007.
- Petus, C., Marieu, V., Novoa, S., Chust , G., Bruneau , N., & Froidefond , J.-M. (7 de Novembro de 2013). *Monitoring spatio-temporal variability of the Adour River turbid plume (Bay of Biscay, France) with MODIS 250-m imagery*.
- Pietrzak, D. J., de Boer, G. J., & Eleveld, M. A. (13 de January de 2011). *Mechanisms controlling the intra-annual mesoscale variability of SST and SPM in the southern North Sea*. pp. *Continental Shelf Research 31 (2011) 594–610*.

- Pimenta, F. C. (2005). *Estudo numérico da pluma do rio da prata ao longo da plataforma continental sul-americana do sudeste.*
- Preisendorfer, R. W. (1976). *Hydrologic Optics: Foundations.* Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory.
- Qu, L., Liu, M., & Guan, L. (21 de October de 2023). *Simulation of Thermal Infrared Brightness Temperatures from an Ocean Color and Temperature Scanner Onboard a New Generation Chinese Ocean Color Observation Satellite.* pp. *Remote Sens.* 2023, 15, 5059. <https://doi.org/10.3390/rs15205059>.
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., & Schlax, M. G. (15 de Novembro de 2007). *Análises diárias combinadas de alta resolução para temperatura da superfície do mar.*
- Richardson, L. L. (2006). *Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes.*
- Rosa, R. (1992). *Introdução ao sensoriamento remoto.*
- Rudorff, C. D. (2006). *Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor hyperion/eo-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.*
- Rundquist, D. C., Han, L. S., Schalles, J. F., & Peake, J. S. (Fevereiro de 1996). *Remote Measurement of Algal Chlorophyll in Surface Waters: The Case for the First Derivative of Reflectance Near 690 nm.*
- Salgueiro, D. V., de Pablo, H., Neves, R., & Mateus, M. (2015). *Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal)*.* pp. *Revista de Gestão Costeira Integrada Journal of Integrated Coastal Zone Management* pp. 533-544.
- Santos, D. S. (2018). *APRENDIZADO DE MÁQUINA: ESTATÍSTICA BAYESIANA EM MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES COM APLICAÇÃO EM MAGNITUDES DE QUASARES.*
- Scarpace, F. L., & Green, T. (1973). *Dynamic surface temperature structure of thermal plumes.*
- Schott. (1997). *Remote Sensing-the image chain approach.*

- Scodanibbio, L. e. (2005). *A Comissão Mundial de Barragens: Um passo fundamental rumo à gestão integrada dos recursos hídricos e à redução da pobreza? Um caso piloto no baixo Zambeze, Moçambique.*
- Shrestha, A., Angal, A., & Xiong, X. (2019). *Evaluation of MODIS and Sentinel-3 SLSTR Thermal Emissive Bands calibration consistency using Dome C. pp. Science Systems and Applications, Inc., Lanham, MD 20706 USA.*
- Sklar, F. B. (1998). *Impactos ambientais costeiros provocados pelas alterações ao fluxo de água doce no Golfo do México.*
- Smith, B. J., & Simpkins, D. G. (Dezembro de 2018). *Influence of river plumes on the distribution and composition of nearshore Lake Michigan fishes. pp. Journal of Great Lakes Research. Pages 1351-1361. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.08.012>.*
- Soares, R. V., & Batista, A. C. (2004). *Meteorologia e climatologia florestal.*
- Sobrino, J., El Kharraz, J., & Li, Z. (2003). *Temperatura de superfície e recuperação de vapor de água a partir de dados MODIS.*
- Sobrino, J., Li, Z., & Stoll, M. (1993). *Impacto da transmitância atmosférica e do conteúdo total de vapor de água nos algoritmos para estimar a temperatura da superfície do mar por satélite.*
- Souza, R. B. (2003). *Sensoreamento Remoto dos Oceanos.*
- Sperling, V. B. (Dezembro de 2012). *Mapeamento da Temperatura da Superfície do Mar no Litoral de Alagoas Utilizando Imagens MODIS.*
- Sun, H., Wang, D., Han, W., & Yang, Y. (19 de junho de 2024). *Quantifying the Impact of Aerosols on Geostationary Satellite Infrared Radiance Simulations: A Study with Himawari-8 AHI. pp. A Study with Himawari-8 AHI. Sensores Remotos. 2024, 16 (12), 2226; <https://doi.org/10.3390/rs16122226>.*
- Tang, D. L., Kester, D. R., Wang, Z., Liand, J., & Kawamura, H. (setembro de 2002). *Sensoriamento remoto por satélite AVHRR e medições a bordo do Pluma térmica da Baía de Daya, central nuclear, China.*
- Tanni, S. E., Patino, C. M., & Ferreira, J. C. (2020). *Correlação vs. regressão em estudos de associação. METODOLOGIA CIENTÍFICA. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-3713/e20200030>.*

- Tarpanelli, A., Camici, S., Nielsen, K., Brocca, L., Moramarco, T., & Benveniste, J. (7 de August de 2019). *Potentials and limitations of Sentinel-3 for river discharge assessment*. p. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.005>.
- Teodoro, A., Gonçalves, H., & Velos, F. (2 de Outubro de 2008). *Estimativa da dimensão da pluma do Rio Douro com base na segmentação de imagens de cenas MERIS*.
- Tipler, P. A. (2007). *Física para cientistas e engenheiros*.
- Turpie, J., Smith, B., Emerton, L., & Barnes, J. (1999). *Economic value of the Zambezi Basin wetlands*. IUCN Regional Office for Southern Africa.
- Vianello, R. L. (2000). *Meteorologia básica e aplicações*.
- Walker, N. D. (7 de December de 1996). *Satellite Assessment of Mississippi River Plume Variability: Causes and Predictability*. pp. *Causes and predictability, Remote Sensing of Environment, Volume 58, Issue 1, Pages 21-35, ISSN 0034-4257*. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00259-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00259-6).
- Warrick, J. A. (9 de Janeiro de 2004). *Forçamento de dispersão de plumas de rios do sul da Califórnia, com base em observações de campo e de sensoriamento remoto*. pp. DOI 10.1007/s00367-003-0163-9.
- Warrick, J. A., & Farnsworth, K. L. (19 de Novembro de 2016). *Coastal River Plumes: Collisions and Coalescence*. p. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.11.008>.
- Warricku, J. A., DiGiacomo, P. M., Weisbergc, S. B., Nezlin, N. P., Mengel, M., Jones, B. H., . . . Farnsworthu, K. (20 de Julho de 2007). *Padrões e dinâmica das plumas dos rios dentro do Baía do Sul da Califórnia*. p. www.elsevier.com/locate/csr.
- Wittmanova, R., Hrudka, J., Stanko, S., & Skultetyova, I. (2022). *Analysis of the composition and concentration of pollutants in rainwater runoff*. p. DOI:10.5593/sgem2022/3.1/s12.06.
- Xu, B., Yang, D., Burnett, C. W., Ran, X., Yu, Z., Gao, M., . . . Jiang, X. (2016). *Artificial water sediment regulation scheme influences morphology, hydrodynamics and nutrient behavior in the Yellow River estuary*. *Journal of Hydrology* (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.024>.
- Yankovsky, A. E., & Chapman, D. C. (1997). *A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges*. pp. *Journal of Physical oceanography*, v. 27, n. 7, p. 1386–1401.

Zeng, X., Bracco, A., & Tagklis, F. (24 de Abril de 2022). Dynamical Impact of the Mekong River Plume in the South China Sea. p. <https://doi.org/10.1029/2021JC017572>.

8. Anexos

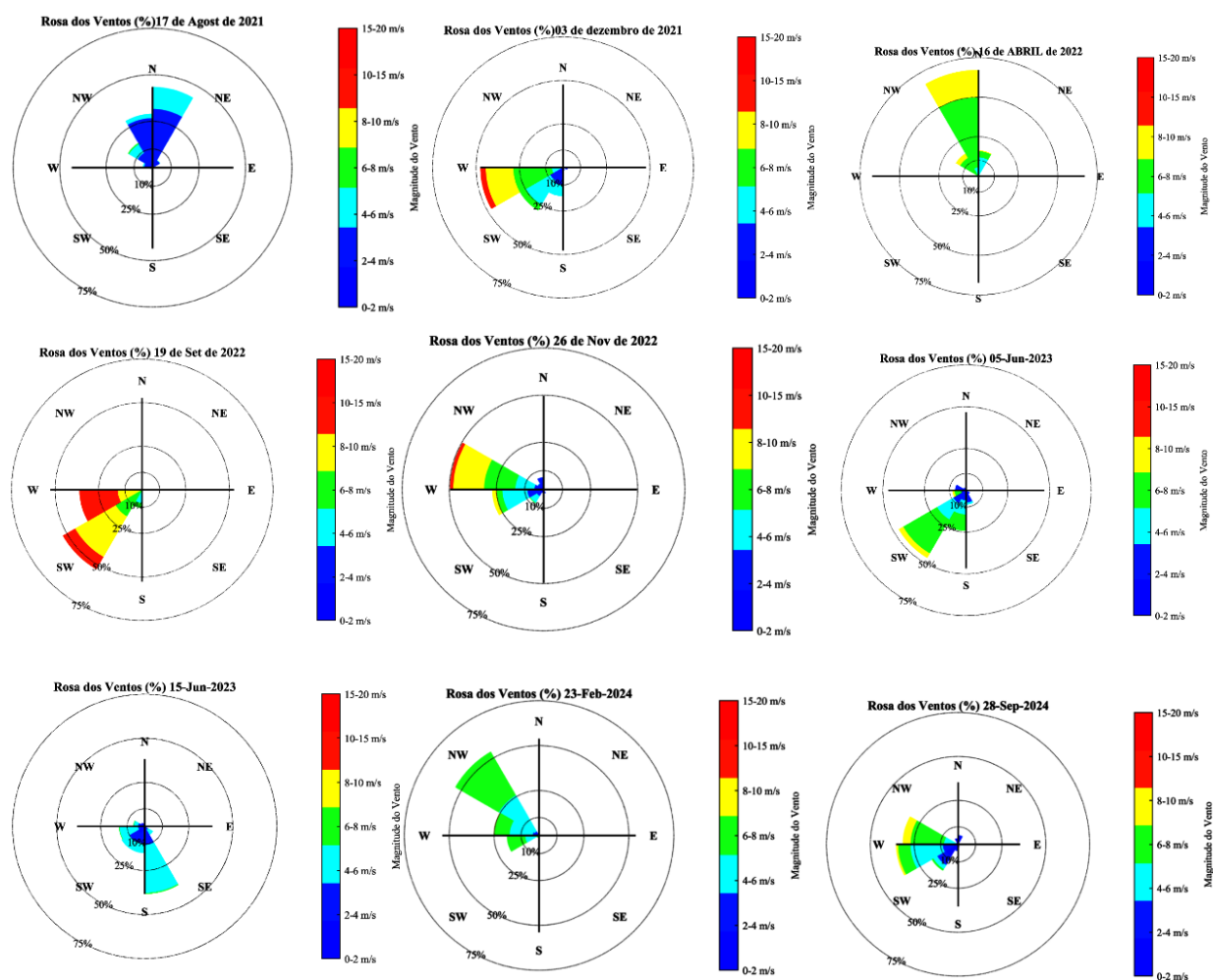


Figura 11: Rosa dos ventos diárias nas componentes U e V , de 2020 a 2024

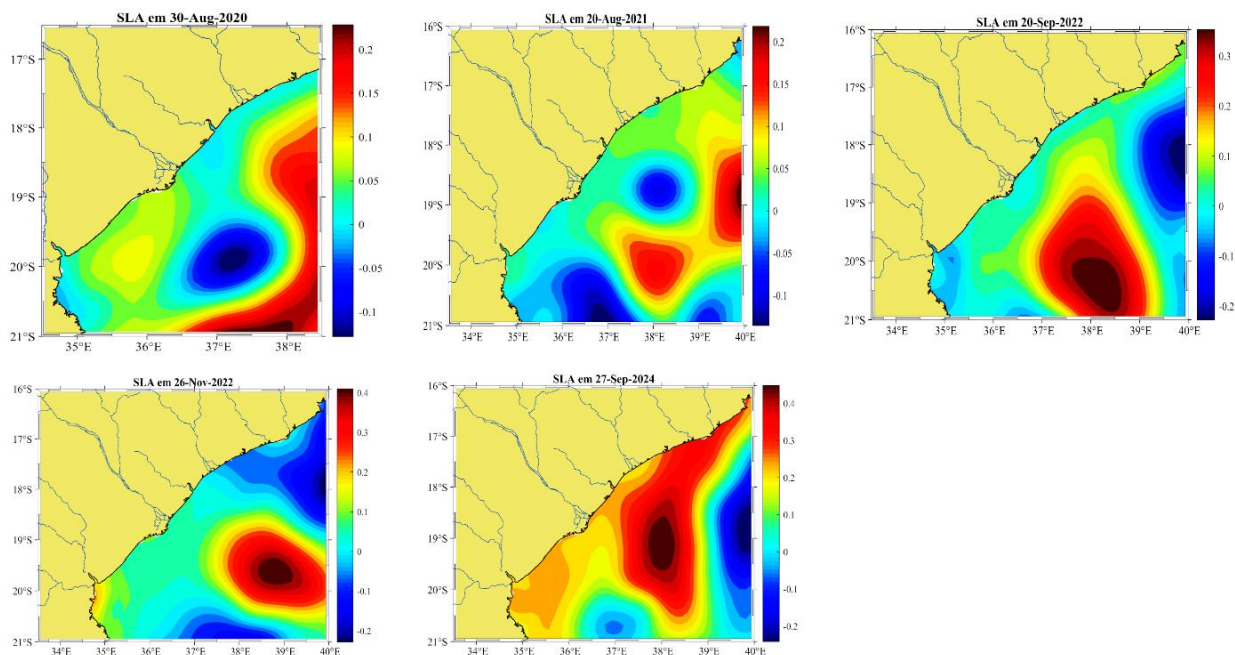


Figura 12: Anomalia positiva da altura do mar (SLA) diária entre 2020 a 2024

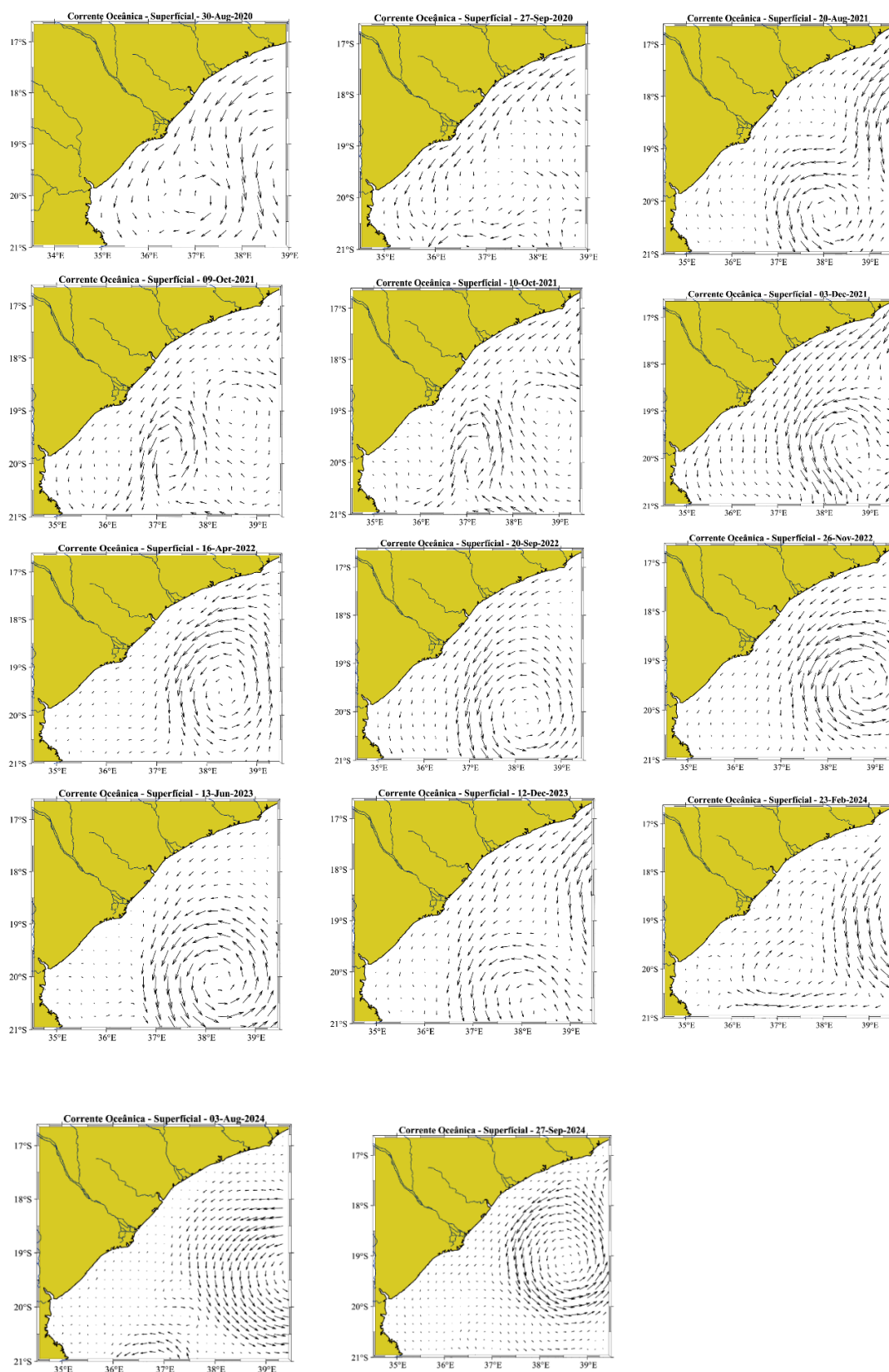


Figura 13: Correntes diárias Zonal e Meridional de 2020 a 2024