

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográficas

**Análise Multi-Temporal da densidade de Clorofila-“a”
assim como da Turbidez da água baseada em Imagens
Landsat 8 OLI**

Caso de Estudo: Albufeira de Chicamba Real, Província de
Manica

Autora: Imelda Natália Arnaldo Cossa

Maputo, 25 de Abril de 2025



FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográficas

**Análise Multi-Temporal da densidade de Clorofila-“a”
assim como da Turbidez da água baseada em Imagens
Landsat 8 OLI**

Caso de Estudo: Albufeira de Chicamba Real, Província de
Manica

Autora: Imelda Natália Arnaldo Cossa

Supervisor : Lic. Mário Azarias Chelengo, UEM

Maputo, 25 de Abril de 2025

Dedicatória

*Dedico este trabalho a minha família,
que sempre acreditou em mim e me apoiou em cada passo dessa jornada.
Agradeço especialmente a minha mãe, que me ensinou o valor do esforço e da perseverança*

Declaração de Honra

Eu, **Imelda Natália Arnaldo Cossa**, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciado em Ciências de Informação Geográfica, na faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, 25 de Abril de 2025

(Imelda Natália Arnaldo Cossa)

Agradecimentos

Primeiro, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, por ter me concedido a força, a sabedoria e a determinação necessária para enfrentar os desafios e superar as adversidades ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença constante foi uma fonte de inspiração e conforto.

Minha mais sincera gratidão vai ao meu orientador, Mário Azarias Chelengo sua orientação perspicaz, paciência e generosidade foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço por compartilhar seu vasto conhecimento e por oferecer críticas construtivas e encorajamento contínuo, que foram essências para o aprimoramento deste estudo.

Agradeço também a Universidade Eduardo Mondlane, por proporcionar um ambiente acadêmico estimulante e recursos valiosos.

Minha profunda gratidão se estende a minha família, em especial a minha mãe Natalina Fazenda Matlombe, ao meu pai Arnaldo Marciano Cossa (em memória), aos meus irmãos Velário, Félix, Marcília, Valdano e Isménia Cossa, cujo amor, paciência e apoio incondicional foram pilares fundamentais ao longo dessa jornada.

Por fim, sou grata ao meu companheiro Armando Zucula, aos meus amigos Alberto Paulino, Jéssica David, Marta Inácio, e colegas Adozinda Mboa, Nailina Houana e Elisa Guirruogo, pela amizade, pelas discussões enriquecedoras e pelo suporte emocional.

A todos, meu mais sincero e profundo agradecimento.

Resumo

A água é um recurso essencial para a vida e o meio ambiente, e sua qualidade deve ser assegurada, garantindo a ausência de contaminantes biológicos, físicos e químicos. O presente estudo tem como objectivo realizar uma Análise Multi-Temporal da concentração de Clorofila-“a” e Turbidez da água, com base em Imagens de satélite Landsat 8 OLI. A área de estudo corresponde à Albufeira de Chicamba Real. Para alcançar esse objectivo, foram aplicados métodos cartográficos com a finalidade de elaborar mapas temáticos que representam a distribuição espacial da qualidade de água no intervalo temporal entre 2014 e 2024, durante as estações Seca em Setembro e Chuvosa em Dezembro. A extracção das variáveis foi realizada por meio de índices espectrais nomeadamente o NDCI para a estimativa da Clorofila-“a” e o NDTI para a análise da Turbidez da água. As bandas espectrais utilizadas foram: Banda 5 (infravermelho próximo) e banda 4 (vermelho) para o NDCI, e as bandas 3 (verde) e banda 4 (vermelho) para o cálculo do NDTI. Os dados utilizados foram processados no Qgis 3.24 Tisler. Na estimativa da clorofila-“a” em 2014, o desvio padrão foi de 0,8124 na estação seca e 0,8163 na estação chuvosa, com maior pico de reflectância na banda do NIR e SWIR1 para a classe elevada, e na banda Verde para as classes moderada e baixa. Em 2024, o desvio padrão foi de 0,8156 na estação seca e 0,8164 na estação chuvosa, com maior pico nas bandas NIR e Verde. Quanto à turbidez, em 2014 o desvio padrão foi de 0,8157 na estação seca e 0,8217 na estação chuvosa, com pico na banda Vermelha para a classe elevada e Verde para as classes moderada e baixa, em ambas as estações. Em 2024, os desvios padrão foram de 0,8093 na estação seca e 0,8266 na estação chuvosa, com pico no NIR para a classe elevada na estação seca, no SWIR para a classe elevada na estação chuvosa, e na banda Vermelha para as duas estações. Os resultados indicam uma redução nas concentrações de clorofila-“a” e um aumento nos níveis de turbidez da água. Dessa forma, os dados reforçam a importância de um monitoramento contínuo, especialmente nas áreas diretamente influenciadas por atividades antrópicas.

Palavras-chave: Qualidade da água, Turbidez, Clorofila-“a”, Imagens Landsat 8 OLI.

Abreviaturas

CENACARTA - Centro Nacional de Cartografia e Teledeteccção

MMM - Ministério do Meio Ambiente

NTU – *Nephelometric Turbidity Unit*

COAs – Constituintes Ópticamente Activos

SST - Sólidos Suspensos Totais

USGS – *United States Geological Survey*

NDTI - *Normalized Difference Turbidity Index*

NDCI – *Normalized Difference Chlorophyll Index*

OLI – *Operational Land Imager*

Índice

Dedicatória.....	I
Declaração de Honra	II
Agradecimentos	III
Resumo.....	IV
Lista de figuras.....	vi
Lista de tabelas.....	vii
Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Definição do problema.....	2
1.3. Justificativa.....	3
1.5. Objectivos	4
1.5.1. Objectivo Geral	4
1.5.2. Objectivos específicos.....	4
Área de Estudo	5
2.1 Localização Geográfica da Albufeira de Chicamba Real	5
1.1. Clima.....	6
1.2. Geomorfologia	6
Revisão da literatura	7
3.1. Qualidade da Água	7
3.2. Parâmetros de Qualidade da Água.....	8
3.2.1. Turbidez.....	8
3.2.2. Clorofila	9
3.2.2.1. Tipos de Clorofila	9
3.3. Factores que Influenciam na Qualidade da Água.....	10
3.4. Comportamento Espectral da Água.....	12
3.5. Aplicação da Detecção Remota na Qualidade da Água.....	12
3.6. Modelos para estimativa da Concentração de Clorofila e Turbidez da Água.....	15
3.6.1. Índice de Clorofila por diferença Normalizada	15
3.6.2. Índice de Turbidez por Diferença Normalizada	15
Material e Métodos.....	16
4.1. Material.....	16
4.2. Métodos.....	17
4.2.1. Fluxograma metodológico	18
4.3. Procedimentos metodológicos.....	19
4.3.1. Pré – Processamento.....	19

4.3.1.1.	Cálculo do Índices de Clorofila por Diferença Normalizada.....	20
4.3.1.2.	Cálculo Índices de Turbidez por Diferença Normalizada.....	20
4.3.1.3.	Reclassificação das imagens de Satélite	20
4.3.1.4.	Determinação da Assinatura espectral da Turbidez e Clorofila-“a”.....	20
Resultados e Discussão		21
5.1.	Mapa topográfico da Albufeira de Chicamba Real	21
5.2.	Estimativa da Concentração da Clorofila-”a”	22
5.2.1.	Concentração da Clorofila-”a” em Setembro de 2014	22
5.2.2.	Concentração da Clorofila-“a” em Dezembro de 2024	24
5.2.3.	Comportamento espectral da Clorofila-”a”	27
5.3.	Estimativa dos níveis de Turbidez.....	28
5.3.1.	Concentração dos níveis de Turbidez em Setembro de 2014	28
5.3.2.	Concentração dos níveis de Turbidez em Dezembro de 2024	30
5.3.3.	Comportamento espectral dos níveis de Turbidez.....	33
Conclusões e Recomendações.....		35
Anexos.....		38
Anexos 1 : Precipitação mensal em 2014 e 2024		38
Anexos 2: Dados da reflectância da Turbidez e Clorofila-“a” em 2014 e 2024.....		38

Lista de figuras

Figura 1: Localização geográfica da Albufeira de Chicamba Real.....	6
Figura 2: Comportamento espectral da água em rios turvo e limpo.....	9
Figura 3: Espectro de absorção de luz pelos pigmentos da Clorofila a e Clorofila b, e carotenoides	10
Figura 5: Mineradores durante a lavagem do ouro e Uso do mercúrio por Província.....	11
Figura 6: Comportamento espectral da água.....	12
Figura 7: Fluxograma Metodológico.....	18
Figura 8: Mapa detalhado da área de estudo.....	22
Figura 9: Concentração da Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2014.....	23
Figura 10: Área de abrangência em percentagem em 2014.....	24
Figura 11: Concentração da Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2024.....	25
Figura 12: Área de abrangência em percentagem em 2024.....	26
Figura 13: Comportamento espectral da Concentração de Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2014.....	27
Figura 14: Comportamento espectral da Concentração de Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2024.....	28
Figura 15: Concentração dos níveis de Turbidez na estação seca e chuvosa em 2014.....	29
Figura 16: Área de abrangência em percentagem em 2014.....	30
Figura 17: Concentração dos níveis de Turbidez na estação seca e chuvosa em 2024.....	31
Figura 18: Área de abrangência em percentagem em 2024.....	32
Figura 19: : Comportamento espectral da Turbidez na estação seca e chuvosa em 2014.....	33
Figura 20: Comportamento espectral da Turbidez na estação seca e chuvosa em 2024.....	34
Figura 21: Precipitação mensal em 2014 e 2024.....	38
Figura 22: Dados da reflectância da Turbidez em 2014, estação seca.....	38
Figura 23: Dados da reflectância da Turbidez em 2014, estação chuvosa.....	38
Figura 24: :Dados da reflectância da Turbidez em 2024, estação seca.....	38
Figura 25: :Dados da reflectância da Turbidez em 2024, estação chuvosa.....	38
Figura 26: :Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2014, estação seca.....	39
Figura 27: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2014, estação chuvosa.....	39
Figura 28: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2024, estação seca.....	39
Figura 29: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2024, estação chuvosa.....	39

Lista de tabelas

Tabela 1: Características das imagens do Sensor Landsat 8.....	14
Tabela 2: : Dados utilizados para a elaboração do trabalho.....	16
Tabela 3: Programas computacionais usados no processamento.....	17
Tabela 4: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Clorofila-”a” em 2014.....	23
Tabela 5: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Clorofila-”a” em 2024.....	25
Tabela 6: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Turbidez em 2014	29
Tabela 7: Valores estatísticos da Turbidez em 2014.....	30
Tabela 8: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Turbidez em 2024	31

Introdução

No presente capítulo procura-se descrever a ideia principal do tema. Este capítulo abrange a contextualização, a definição do problema, a relevância assim como os objectivos com vista a resolução do problema.

1.1. Contextualização

A água é elemento vital para todos os seres vivos e para ser considerada própria para o consumo humano não pode apresentar riscos à saúde, devendo obedecer a parâmetros de potabilidade (físicos, químicos e biológicos). Isso significa que deve ser isenta de contaminação, tanto do tipo química quanto biológica (Nascimento *et al.*, 2024).

Ecossistemas de água doce estão particularmente expostos a estressores antropogénicos e climáticos e, por isso, podem ser considerados sentinelas de mudanças globais e locais (Jenny *et al.*, 2020, Lobo *et al.*, 2021). Um reservatório artificial geralmente tem carácter público social, pois os benefícios estendem-se para a sociedade e até para a nação, como é o caso da geração de energia, que alimenta um sistema de transmissão que interliga diversas regiões (Mees, 2018).

A monitorização da qualidade da água actualmente é essencial para a sustentabilidade e para a melhor gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, considerando que os sistemas aquáticos estão constantemente sujeitos à degradação devido aos efeitos causados principalmente pela acção antrópica, há uma necessidade cada vez maior de se discutir e executar ferramentas auxiliares ao controle da qualidade da água nestes ambientes (Guimarães, 2019).

A qualidade da água ao redor de nosso planeta tem-se deteriorado de forma crescente, especialmente nos últimos 50 anos. Problemas relacionados com a poluição da água se intensificaram principalmente após a Segunda Guerra Mundial, quando foram observados aumentos significativos nos processos de urbanização e industrialização. A poluição das águas é principalmente fruto de um conjunto de actividades humanas. E os poluentes alcançam águas superficiais e subterrâneas de formas bastante diversas (Grassi (2001, citado por Vilanculos, 2022).

A poluição da água ocorre quando materiais letais se movem para fontes de água como lagoas, rios, lagos, mares e oceanos, são dissolvidos e suspensos na água ou são depositados no leito. A poluição degradará a qualidade e a pureza da água. Garantir água pura e segura é realmente desafiador devido a fontes indevidas de produtos químicos e contaminantes (Lakshmikantha *et al.*, 2021).

De acordo com o Censo dos Mineradores Artesanais Moçambicanos (2021), a província de Manica ocupa a segunda posição em termos de taxa de contaminação das águas, com 37,3%. Este índice reflecte o impacto significativo da mineração na qualidade dos recursos hídricos locais, afectando os ecossistemas aquáticos. O mercúrio metálico disponível no solo, resultante da actividade do garimpo, pode também sofrer um processo de metilação em sedimentos dos rios, contaminando os peixes e causando um perigo potencial de exposição ao metil-mercúrio para toda a população circunvizinha (Camera 1996; Raso *et al.*, 2021).

A avaliação da qualidade da água dos reservatórios é feita, geralmente, a partir de medidas realizadas em amostras colectadas, o que permite quantificar suas propriedades físicas, químicas ou biológicas num determinado local e instante de tempo. Apesar das medidas realizadas *in situ* serem mais precisas e difundidas que as adquiridas de maneira indirecta, como por Detecção remota, essas abordagens demandam alto investimento de tempo e dinheiro, além de possuírem uma representatividade espacial limitada, o que acaba sendo um factor limitante para avaliação da qualidade dos recursos hídricos. As abordagens de Detecção remota possibilitam o melhor entendimento das mudanças físico-químicas dos corpos de água, facilitando a compreensão das possíveis perturbações ocorridas nos corpos de água (Novo,2019; Gaida *et al.*, 2020, Buma e Lee 2020; Sent *et al.*,2021; Rodrigues *et al.*,2022).

A partir de melhorias na tecnologia e na disponibilidade de dados de Detecção remota, modelos mais precisos e generalizados têm sido desenvolvidos para monitorar a qualidade da água (Kong *et al.*, 2018; Peterson *et al.*, 2018).

1.2. Definição do problema

A Albufeira de Chicamba Real, um dos maiores lagos artificiais do País, que constitui o principal centro pesqueiro da província de Manica, apresenta sinais evidentes de poluição por meio de mercúrio nas suas águas, na sequência da intensa actividade de mineração ilegal de ouro que está a ser desencadeada a montante, pelos garimpeiros espalhados no distrito de Manica. ¹

A monitorização das variáveis em lagos artificiais implica em enfrentar desafios decorrentes da complexidade intrínseca desses sistemas. No entanto, quando ocorrem modificações nas propriedades ópticas da água, a utilização de imagens de satélite adquiridas por meio de sensores orbitais surge como uma alternativa efectiva para o estudo e controle da qualidade desses parâmetros. Além disso, essa abordagem permite realizar o mapeamento dessas áreas com eficiência e precisão (Sausen e Bitencourt-Pereira, 1986; Barbosa *et al.*, 2010 citado por Becaro *et al.*, 2023).

¹ <https://amp.expresso.pt/africa/garimpeiros-ameacam-recursos-pesqueiros=f398221>

Hipótese:

H1: As imagens Landsat 8 OLI permitem identificar variações significativas na concentração de Clorofila-“a” e Turbidez da água na Albufeira de Chicamba Real, associadas aos impactos do garimpo ilegal, ao longo do tempo.

H0: As imagens Landsat 8 OLI não permitem identificar variações significativas na concentração de Clorofila-“a” e Turbidez da água na Albufeira de Chicamba Real, associadas aos impactos do garimpo ilegal, ao longo do tempo.

1.3. Justificativa

A escolha da Albufeira de Chicamba Real como área de estudo justifica-se pela sua importância estratégica, ambiental e social, na província de Manica, sendo uma das principais fontes de abastecimento de água e subsistência no local. No entanto, ao longo dos anos, a qualidade da água da Albufeira tem sido comprometida por actividades humanas, em especial o garimpo artesanal com uso de mercúrio.

Segundo o Jornal Moçambique para Todos(2008), os primeiros casos de contaminação das águas por mercúrio foram notificados devido à prática intensiva de garimpo nas margens da Albufeira². A gravidade do problema foi reforçada pela matéria publicada pelo Jornal Notícias, em 26 de julho de 2012, sob o título “ Os efeitos da contaminação por mercúrio” onde se denunciava o impacto ambiental causado pelo garimpo ilegal.

Recentemente , o primeiro Censo dos Mineradores Artesanais Moçambicanos, realizado em 2021, posicionou a província de Manica como a segunda mais afectada em termos de contaminação das águas por mercúrio, com uma taxa de 37,3% reflectindo um cenário de risco contínuo e crescente.

Diante desse contexto, o presente estudo torna-se importante, buscando analisar a qualidade da água na Albufeira de Chicamba Real , com foco na estimativa de Clorofila -“a” e Turbidez da água, que podem ser indicadores indirectos de contaminação e degradação ambiental. Para tal, foram escolhidos os anos de 2014 e 2024 como marcos comparativos permitindo observar a evolução temporal das condições ambientais. A escolha dessas datas baseia-se na disponibilidade de imagens de satélite do sensor OLI do Landsat 8, que entrou em operação em 2013.

² https://macua.blogs.com/mocambique_para_todos/2008/08/chicamba-contam.html

1.4. Relevância

Este trabalho tem relevância técnica, pois contribuirá para realização de trabalhos práticos utilizando imagem de satélite, ajudando na interpretação e análise dos dados sobre a qualidade da água. Tem relevância social, pois a apresentação de dados da qualidade da água de forma visual, como mapas e gráficos, pode facilitar a compreensão das comunidades sobre a situação real e os riscos ligados à extracção de ouro pelos garimpeiros. Quanto a relevância económica, pode resultar na redução de custos relacionados á colecta de amostras directamente no campo, permitindo a monitorização em grande escala, além disso os dados gerados podem auxiliar os Orgãos responsáveis pela monitorização da água na identificação de áreas críticas.

1.5. Objectivos

1.5.1. Objectivo Geral

Analisar as tendências espaço- temporais da concentração de Clorofila – “a” assim como a alteração das propriedades de Turbidez da água ao longo da Albufeira de Chicamba Real.

1.5.2. Objectivos específicos

- ✓ Descrever os factores antrópicos que influenciam na qualidade da água;
- ✓ Determinar a concentração de Clorofila - “a” e Turbidez durante nas estações chuvosas e de seca na Albufeira de Chicamba Real;
- ✓ Aplicar os índices NDCI e NDTI nas imagens adquiridas pelo Landsat 8 OLI para a estimativa dos parâmetros da qualidade de água;
- ✓ Mapear a distribuição de Clorofila-”a” e turbidez na Albufeira de Chicamba Real;
- ✓ Representar graficamente a assinatura espectral da Clorofila - “a” e Turbidez da água.

Área de Estudo

Neste capítulo será apresentado de forma detalhada a Localização Geográfica, a Geomorfologia, a hidrografia e os aspectos climáticos da área de estudo.

2.1 Localização Geográfica da Albufeira de Chicamba Real

A Albufeira de Chicamba Real está localizada na província de Manica, nos Postos administrativos de Messica, Muoha e Rotanda, entre as coordenadas: latitudes $19^{\circ}08'48''$ e $19^{\circ}09'21''$ Sul e longitudes $33^{\circ}10'41''$ e $33^{\circ}08'42''$ Este. Chicamba Real é um lago artificial que resultou da construção da Barragem de Chicamba a meio do curso do rio Révuè que nasce perto da fronteira com o Zimbábue, 17,5 km a noroeste da cidade de Manica.

Na sua capacidade máxima o lago cobre uma superfície de $114,496 \text{ km}^2$ e tem uma profundidade máxima e média de 161 m e 16 m, respectivamente. O fitoplâncton é escasso e pobre em diversidade. Tanto a Albufeira como os seus afluentes não têm macrófitas aquáticas flutuantes nem enraizadas, exceptuando o rio Révuè rio que tem menos de 5% da área coberta por nenúfares nativos.

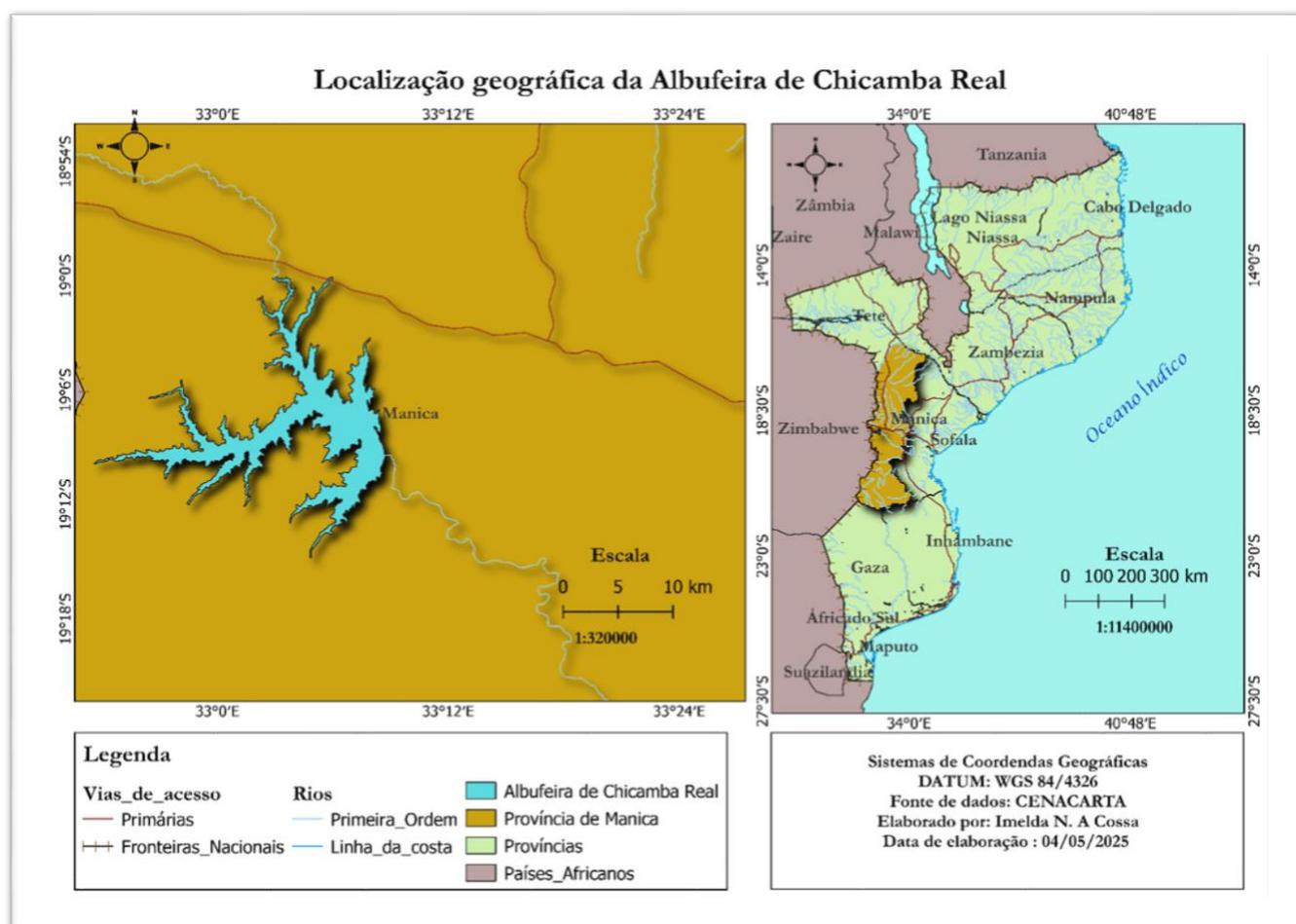


Figura 1: Localização geográfica da Albufeira de Chicamba Real

2.2. Clima

A Província de Manica é caracterizada por um clima tropical alterado, com tendência para quente e húmido, com duas estações distintas: uma chuvosa, a qual é quente e húmida, estende-se de Novembro a Março, sendo seguida por uma estação seca e reactivamente fria entre Abril e Outubro (Bazima *et al.*, 2011). As temperaturas médias no verão são de 20°C e ocorrem em metade da província. Contudo, as temperaturas mais quentes (25°C) ocorrem nos vales do Save e do Zambeze. As temperaturas mais amenas (15 a 20°C) ocorrem nos distritos de Gondola, Manica, Mossurize, Barué e nas zonas montanhosas junto à fronteira com o Zimbabwe (PEDPM, 2015).

2.3. Geomorfologia

Em relação aos aspectos de relevo, a província é constituída por três zonas altimétricas, designadamente áreas de montanhas, planaltos e planícies. As montanhas situam-se essencialmente no extremo Oeste, com mais de 1000m de altitude, junto a fronteira com o Zimbabwe. É nesta zona que se localizam os pontos mais altos da província, nomeadamente: O Monte Binga, localizado na cordilheira de Chimanimani com 2436m, por sinal o pico mais alto do País; O Monte Gorongue, localizado na Serra de Espungabera com 1.887m e; A Serra Choa, localizada no Posto Administrativo do mesmo nome, com 1.844m (Bazima, *et al.*, 2011). Os planaltos com altitudes que variam entre 200 e 1000m localizam-se na região Central e Este, e ocupam cerca de 70% da área da província. As planícies, com altitudes que variam de 100 a 200m estão localizadas no extremo Sudeste da província (Bazima, *et al.*, 2011).

2.4. Hidrografia

A Província de Manica é rica em recursos hídricos. Os principais rios correm no sentido Oeste-Este, obedecendo à disposição do relevo. As principais bacias hidrográficas são o Zambeze, no extremo Norte, Pungué e Búzi, na região Central e Save, no extremo Sul. A rede hidrográfica dos distritos localizados na região sul tais como Sussundenga e Mossurize, é relativamente numerosa que os distritos do centro (Gondola) e norte (Tambara e Macossa) da província (Bazima *et al.*, 2011). O distrito de Gondola é atravessado por dois principais rios tais como, o Púngue e Revué, para além de 4 rios secundários como os rios Mussagandze, Mudzingadzi, Thôa e Mudi (MAE, 2014). A rede hidrográfica do distrito de Sussundenga compreende 4 rios principais, nomeadamente: Revué, Munhinga, Mussapa e Lucite. Uma grande parte da Albufeira de Chicamba pertence ao território do distrito (MAE, 2014). O Distrito de Mossurize possui dois importantes rios de regime permanente, o Búzi e o Mossurize, para além de outros rios de importância secundária tais como, Dacata, Muchenedzi, Zona, Chinhica, Rupice, Mucurumadzi, Lucite, Mavuaze e Mussessa (MAE, 2014).

Revisão da literatura

Esta secção apresenta os fundamentos que fornecem suporte teórico e conceitual das principais técnicas e processos compreendidos para a realização desta pesquisa

3.1. Qualidade da Água

O termo qualidade da água não se restringe a determinação de certo grau de pureza da água, mas de suas características desejáveis para os diferentes usos. Essas características (físicas, químicas e biológicas) podem ser alteradas por poluentes de diversas origens sendo que a sobrecarga pode comprometer a disponibilidade e a qualidade da água para a população humana (Ramos *et al.*, 2019).

Segundo Martins *et al.*, (2017), deve-se conhecer a qualidade das águas em todos os corpos hídricos, pois essas informações são capazes de ajudar a estabelecer mecanismos estratégicos que proporcionem a conservação, a recuperação e o uso racional dos recursos hídricos, diminuindo os conflitos e orientando as actividades económicas. Portanto, avaliar a qualidade da água e os factores que interferem na sua deterioração é necessário para se obter uma gestão e planeamento adequados de uma determinada região. A análise da qualidade de água exige a medição dos parâmetros de água necessários, seguindo métodos-padrão, e comparação com os valores-padrão para a água com o uso designado (Roy, 2018).

Frequentemente, a qualidade é medida por uma série de parâmetros extraídos a partir de colectas em campo. Entretanto, as colectas de dados *in situ*³ são capazes de representar apenas estimativas pontuais da qualidade da água no tempo e no espaço. Tal condição torna a obtenção de variações espaciais e temporais dos índices de qualidade em grandes corpos hídricos praticamente inexecutável, além de representar um processo extremamente oneroso (Gholizadeh; Melesse; Reddi, 2016; De Brito *et al.*, 2022).

Os objectivos da monitorização da qualidade da água geralmente incluem (Li e Migliaccio, 2011):

- ✓ Identificar problemas ed qualidade da água que afectam geralmente a saúde dos seres humanos e ecossistemas;
- ✓ Determinar tendências de longo prazo na qualidade da água;
- ✓ Documentar os efeitos de prevenção da poluição ou remediação; e
- ✓ Fornecer evidências para a conformidade com os regulamentos e disputas legais.

³ *In Situ* significa lugar

3.2. Parâmetros de Qualidade da Água

Os parâmetros biológicos da água são indicadores usados para avaliar a qualidade da água com base na presença e abundância de organismos vivos, como bactérias, algas, invertebrados aquáticos e outros microrganismos. Monitorar os parâmetros microbiológicos da água para consumo humano é essencial para garantir a segurança e a saúde da população. A presença de microrganismos patogênicos na água pode causar uma série de doenças de veiculação hídrica (Lima *et al.*, 2024).

Parâmetros físico-químicos referem-se às propriedades mensuráveis da matéria que descrevem suas características físicas e químicas. Essas propriedades são essenciais para avaliar a qualidade de substâncias como água, solo e ar, fornecendo informações cruciais sobre sua composição e adequação para diversos usos. Os parâmetros físico-químicos incluem: PH, Temperatura, Condutividade elétrica, Oxigênio dissolvido e Turbidez, Nitrogênio total, Carbono orgânico dissolvido, Carbono total. (Da Silva *et al.*, 2017).

3.2.1. Turbidez

A Turbidez indica o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água, dado em unidades nefelométricas da turbidez (UNT). Esta atenuação ocorre pela absorção e espalhamento da luz causada pelos sólidos em suspensão como silte, areia, argila, algas, detritos, etc (Cardoso, 2022).

A turbidez é uma propriedade óptica importante da água, onde sedimentos suspensos espalham a luz em vez de transmiti-la ao longo da coluna de água (Frasquet *et al.*, 2019). A turbidez aumenta com o aumento da concentração de sólidos suspensos ou sedimentos na água (Ritchie *et al.*, 1976; Garg *et al.*, 2017). A turbidez aumenta a opacidade da água, o que prejudica a vida aquática (Güttler *et al.*, 2013; Quang *et al.*, 2017 ; Frasset *et al.*, 2019).

Está associada à erosão dos solos das margens, actividades de mineração, lançamento de esgotos, lançamento de efluentes industriais, dentre muitas outras actividades antrópicas responsáveis por trazer quantidades significativas de sólidos em suspensão (silte, argila, sílica, coloides), matéria orgânica e inorgânica, organismos microscópicos e algas, Pereira (1992, citado por Haddad, 2018).

Segundo (Galvan *et al.*, 2020), a turbidez reduz a fotossíntese dos organismos do fitoplâncton, algas e vegetação submersa. A matéria orgânica acumulada na coluna de água vai ser degradada pelos organismos decompositores e, conseqüentemente, haverá uma redução de oxigênio dissolvido nas camadas mais profundas prejudicando os organismos aeróbios, podendo causar mortandade de peixes e novo aumento de matéria orgânica, Andrade *et al.*, (2007 Antônio *et al.*, 2019). Para turbidez, geralmente utiliza-se os comprimentos de ondas referentes a banda do vermelho (aproximadamente 650 nm) e do infravermelho próximo, independentemente ou combinadas entre si (Miranda R. *et al.*, 2023).

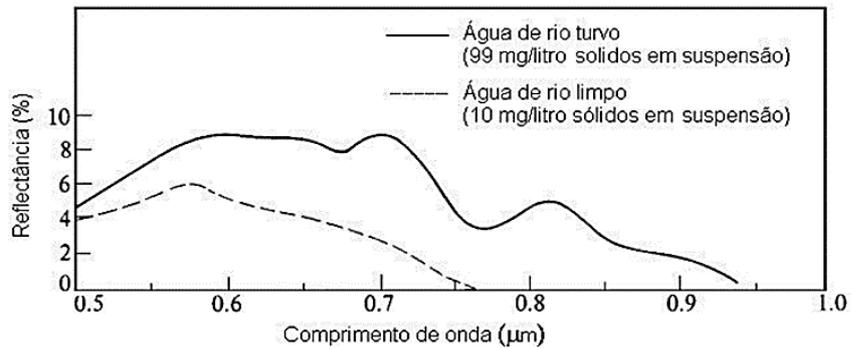


Figura 2: Comportamento espectral da água em rios turvo e limpo, fonte: Lillesand e Kiefer (1987)

3.2.2. Clorofila

A Clorofila é um pigmento fotossintético encontrado em plantas e algas, que desempenha um papel fundamental na captação da energia luminosa. Esse composto apresenta uma forte afinidade com a luz visível, especialmente com a luz azul e vermelha, sendo capaz de transformá-la em energia química por meio da fotossíntese. A clorofila é um nutriente essencial para as plantas aquáticas, e sua concentração nos corpos de água está intimamente relacionada com a quantidade de fitoplâncton presente (Becaro *et al.*, 2023).

3.2.2.1. Tipos de Clorofila

A **Clorofila-“a”** é um indicador chave de biomassa fitoplanctônica e apresenta como característica espectral os picos de reflectância no verde (aproximadamente 550 nm) e no infravermelho próximo (aproximadamente 850 nm), o que fazem dessas bandas, as variáveis descritoras deste parâmetro (Rodrigues Miranda *et al.*, 2023). Entre os diferentes parâmetros de qualidade da água, a clorofila-“a” é um dos parâmetros mais amplamente examinados usando Detecção Remota (Chawla; Karthikeyan; Mirsha, 2020). A interação entre a luz e a Clorofila-“a” permite a detecção da proliferação de algas a partir de imagens espaciais.

Segundo Anderson et al., (2018), a **Clorofila- “b”** auxilia na fotossíntese ao expandir a gama de luz que a planta pode usar e esta presente principalmente em plantas e algas verdes. Absorve luz azul e vermelha e reflete a luz verde, ajudando a captar mais luz para a fotossíntese.

A **Clorofila -“c”** esta presente em algumas algas, como as algas douradas e algas marinhas, como feofitas e diatomáceas. Absorve luz em comprimentos de onda semelhantes à clorofila a e b, mas com diferentes pigmentos auxiliares (Lüning, K., e Dring, M. J, 2018). A **Clorofila- “d”** é encontrada principalmente em algumas algas vermelhas. Absorve luz em comprimentos de onda mais longos (próximos do infravermelho), o que é vantajoso em ambientes aquáticos mais profundos, onde a luz vermelha é filtrada.

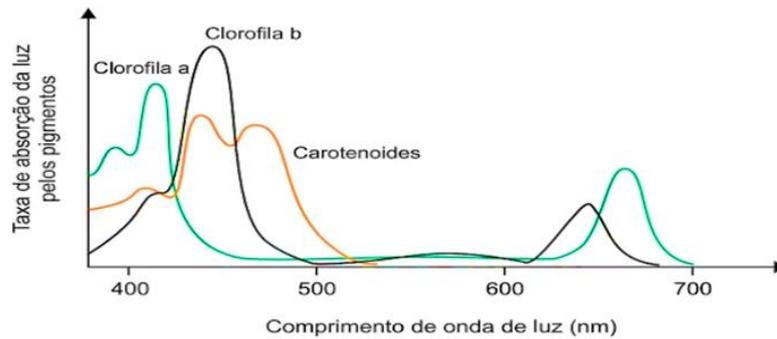


Figura 3: Espectro de absorção de luz pelos pigmentos da Clorofila a e Clorofila b, e carotenoides, fonte:Gholizadeh, Melesse e Reddi (2016).

3.3. Factores que Influenciam na Qualidade da Água

A poluição da água tem como causa notável a acção humana, que, por meio do desenvolvimento de diferentes actividades productivas, gera diversas alterações nas características físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos. Actividades antrópicas que causam a poluição da água: actividades agropecuárias que utilizam agrotóxicos; actividades mineradoras que exploram recursos hídricos; actividades industriais que emitem poluentes líquidos e sólidos; actividades domésticas que produzem poluentes líquidos e sólidos; a ausência de estruturas de saneamento básico.⁴

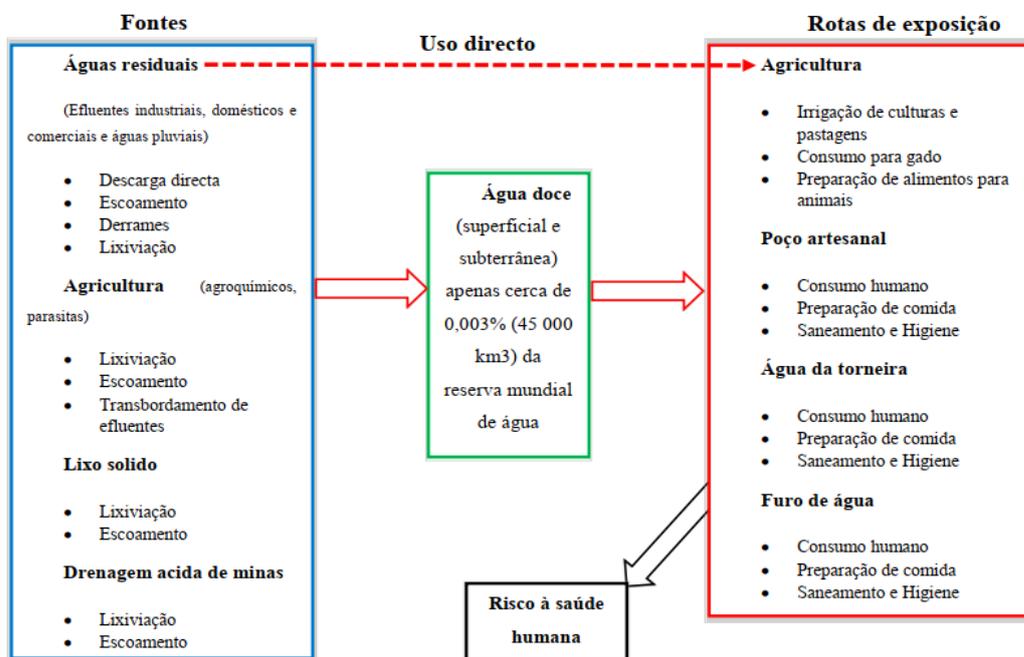


Figura 4: Principais Fontes de Poluição da Água e as Principais Rotas de Exposição aos Seres Humanos, adaptado de Tongesayi e Tongesayi (2017).

⁴ <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/aterro-sanitario.htm>

- a) **Águas residuais** : a principal fonte natural de poluição da água são os efluentes gerados pelas actividades industriais, comerciais e domésticas. Aproximadamente 80% de toda a água residual é despejada em hidrovias do mundo, ocasionando riscos à saúde, ao meio ambiente e ao clima, tornando-se um problema pontual de poluição e um aumento de contaminantes microbianos e poluentes químicos para fontes de água, causando a diminuição do oxigênio dissolvido, aumento da Turbidez da água e odores (Ilyas *et al.*, 2019).⁵
- b) **Agricultura**: na agricultura, os fertilizantes, os pesticidas, herbicidas e inseticidas usados no combate as pragas, quando usados de forma indevida, acabam sendo arrastados para os rios com as chuvas. Os contactos desses poluentes com o solo ou com a água podem contaminar os lençóis freáticos (Lopes *et al.*,2017).
- c) **Drenagem ácida de minas** : Segundo o MMA (2021), a actividade de mineração em geral tem o potencial de causar impactos ambientais significativos, como a degradação de solos, poluição de rios, além da contaminação de ar e água. De acordo com o Censo dos Mineradores Artesanais de Moçambique (2021), o processo de lavagem, mesmo quando é feito em bacia de decantação, locais específicos, afecta o lençol freático através do processo de infiltração, reduzindo ainda mais a disponibilidade de água para o consumo. A poluição dos rios acontece em todas as áreas de extracção do ouro em Manica, uma vez que a actividade é realizada nas margens dos rios ou próximos destes.

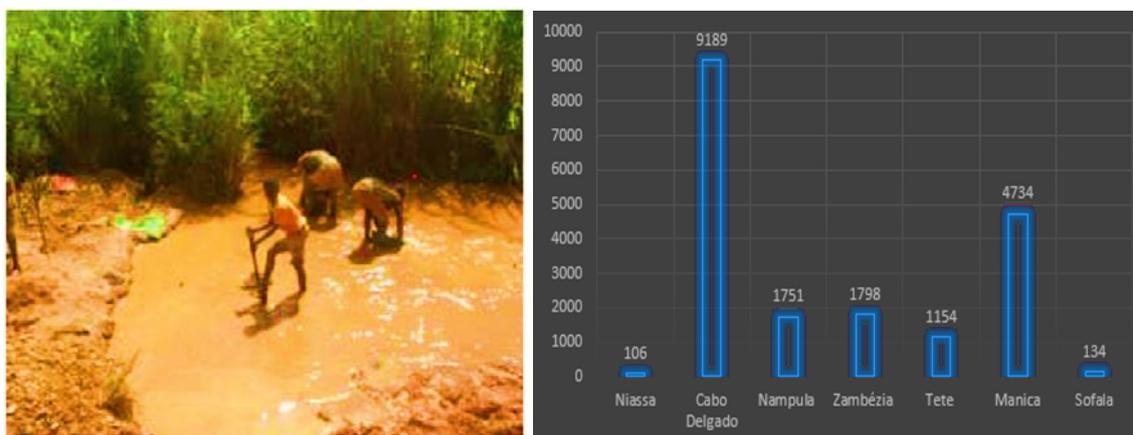


Figura 4:Mineradores durante a lavagem do ouro e Uso do mercúrio por Província, (fonte:João Carlos,2012 e Censo dos Mineradores Artesanais de Moçambique,2021)

⁵ <https://doi.org/10.7476/9786589524946.0015>

3.4. Comportamento Espectral da Água

A água líquida em seu estado puro, sem constituintes suspensos ou dissolvidos, apresenta uma baixa reflectância, especialmente entre 380 e 700 nm, absorvendo toda a radiação incidente acima de 700 nm (Novo, 2007). De acordo com Barbosa, Novo e Martins (2019), a Detecção Remota aquático é frequentemente denominada como detecção da cor da água, devido às propriedades de interação da água com a luz, ou seja, radiação eletromagnética.

A luz solar, ao atingir a superfície aquática, tem uma parte reflectida por componentes atmosféricos (Barbosa, 2019). Outra parte é absorvida, e após essa absorção, ocorre uma interação com a coluna de água (Barbosa, 2019). Em seguida, parte da luz retorna à superfície, podendo propagar na direcção do sensor orbital e fornecer informações sobre os constituintes da água, enquanto outra parte penetra na coluna de água (Barbosa, 2019).

Nesse trajecto, a luz interage com os fótons da atmosfera, ocasionando interferências externas ao ser registrada pelo sensor (Barbosa, 2019). Por esse motivo, é necessário realizar a correção atmosférica das imagens e a remoção da reflexão especular na superfície da água (Barbosa; Novo; Martins, 2019). Castro, Pereira e Barros (1997) destacaram que a resposta espectral das águas está relacionada às substâncias presentes na coluna dos corpos de água, permitindo a extracção de informações sobre as águas a partir desses dados espectrais

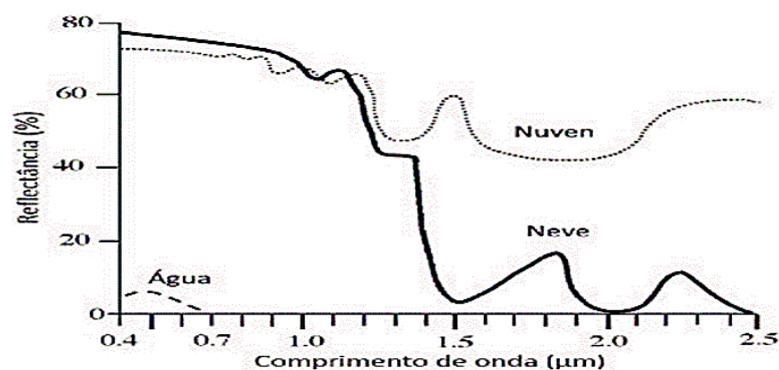


Figura 5: Comportamento espectral da água, fonte: Browker et al. Novo (1992)

3.5. Aplicação da Detecção Remota na Qualidade da Água

No contexto histórico, a Detecção Remota teve grande marco na década de 1960, sendo uma das tecnologias mais sucedidas de colecta automática de dados para o levantamento e monitorização dos recursos terrestres em escala global (Meneses, 2012). Também na década de 60 o termo Detecção Remota foi utilizado pela primeira vez na literatura científica como referência para a aquisição de informações sem contacto físico com os objectos alvos, sendo esse o primeiro conceito de Detecção Remota. Desde então, esse termo tem abrigado tecnologias e conhecimentos derivados de diferentes campos da ciência, como a física, botânica, engenharia, eletrônica e cartografia (Novo, 2010)

O uso da Detecção Remota para estudos de monitoramento de ecossistemas aquáticos continentais pode ser conduzido de forma qualitativa ou quantitativa (Barbosa *et al.*, 2019; Pompêo e Moschini-Carlos, 2022).

A Detecção Remota aplicada ao estudo de ambientes aquáticos baseia-se nos processos de absorção e espalhamento selectivo da radiação solar pela água e seus constituintes (Mobley, 1994; Novo *et al.*, 2019). Estes processos são quantificados através de coeficientes específicos que, por sua vez, são conhecidos como propriedades ópticas inerentes do corpo de água. Estas propriedades dependem somente do meio em questão, sendo os valores dos coeficientes de absorção e espalhamento directamente relacionados à presença (ou não), tipo e concentração de substâncias chamadas COAs, que caracterizam-se por afectar o espectro de absorção e espalhamento da água pura, podendo ser formados por partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas), organismos vivos (fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton) e substâncias orgânicas dissolvidas (Londe, 2008; Novo, 2010).

Sensores orbitais, componentes essenciais do sistema de Detecção Remota, capturam e registram os efeitos da interação da radiação solar com os elementos físicos e químicos presentes na água.

Programa Landsat

O Landsat 8 possui dois instrumentos imageadores, sendo um deles um sensor óptico (OLI) com duas novas bandas, uma para observar nuvens de alta altitude (cirrus clouds) e outra para observar a atmosfera e a qualidade da água em lagos e águas costeiras rasas (costeira /aerossol). O outro sistema imageador é o Thermal Infrared Sensor (TIRS) com duas bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em 30 metros, para coincidir com a maioria das bandas multiespectrais do sistema imageador OLI (USGS, 2013).

Principais características do Landsat 8

- ✓ **Tipo de órbita:** O Landsat 8 possui uma órbita heliosincrônica (uma órbita polar que segue o movimento do Sol);
- ✓ **Resolução Temporal:** 16 dias.
- ✓ **Resolução Radiométrica:** 16 bits (65536 tons de cinza), diferentemente dos 8 bits do Landsat 5 e 7 (256 tons de cinza).
- ✓ **Resolução espectral:** 11 bandas espectrais, cada banda tem suas características;
- ✓ **Projectão das Imagens:** UTM, Datum WGS 1984;
- ✓ **Reprojectão:** as imagens Landsat 8 devem ser sempre reprojectadas para a projectão do local onde será realizado o estudo.
- ✓ **Formato de entrega das imagens:** GeoTiff;
- ✓ **Tamanho aproximado da cena:** de 170 km (Norte-Sul) por 183 km (Este-Oeste);

Tabela 1: Características das Imagens Landsat 8

Subsistemas	Número de Bandas	Resolução espectral (μm)	Resolução espacial (m)	Resolução temporal (dias)	Resolução espectral (<i>bits</i>)	Área Imageada (km)	
OLI	1 Azul costeiro	0.43 – 0.45	30	16	12	185	
	2 Azul	0.45 – 0.51					
	3 Verde	0.53 – 0.59					
	4 Vermelho	0.64 – 0.69					
	5 Infravermelho Próximo	0.85 – 0.88					
	6 Infravermelho Médio	1.57 – 1.65					
	7 Infravermelho Médio	2.11 – 2.29					
	8 Pancromática	0.50 – 0.68					15
	9 Cirrus	1.36 – 1.38					30
TIRS	10 Infravermelho Termal	10.60 – 11.19	100				
	11 Infravermelho Termal	11.50 – 12.51					

(Fonte : USGS,2015)

Correcção atmosférica: a interferência atmosférica é um dos principais factores de degradação nas imagens, muitas vezes comprometendo a análise e interpretação das mesmas. A intensidade deste efeito depende do comprimento de onda, portanto, ele afecta de modo diferente a cada uma das bandas espectrais (Figueiredo, 2005).

A **Reclassificação** é uma operação de reclassificação consiste em obter um campo temático a partir de outro campo temático, que pode ou não, ser de categorias temáticas distintas. Cada local de uma área de estudo é associado a um valor de um conjunto de classes temáticas, segundo uma tabela que modela o mapeamento entre os conjuntos de entradas e saída (Câmara *et al.*, 2007). A reclassificação *raster* (matricial) é um processo usado para reclassificar ou alterar valores das células para valores alternativos

usando uma variedade de métodos. A reclassificação pode ser feita por um valor de cada vez com base em critérios tais como intervalos específicos (Ramirez, 1994).

3.6. Modelos para estimativa da Concentração de Clorofila e Turbidez da Água

3.6.1. Índice de Clorofila por diferença Normalizada

Seguindo o conceito do NDVI aplicado no monitoramento do estado da vegetação; o NDCI foi desenvolvido considerando a diferença de bandas espectrais em 708 nm que é o pico de reflectância máximo sensível às variações na concentração de Clorofila-“a” na água e 665 nm, geralmente atribuído à absorção pelos pigmentos chl-a, e normalizando pela soma de sua reflectância para eliminar quaisquer incertezas na estimativa de Reflectância de Detecção Remoto, diferenças sazonais de azimute solar e contribuições atmosféricas nesses comprimentos de onda.

Para a construção do NDCI, Mistha e Mishra (2012) selecionaram duas características espectrais centradas em 665 nm e 708 nm para desenvolver NDCI e para evitar a influência da CDOM e TSS (sólidos em suspensão total) nos espectros de reflectância da água a comprimentos de onda mais curtos. Além disso, como ambas as bandas possuem proximidade, foi assumido que a absorção de CDOM e SST é semelhante em magnitude e a diferença entre eles foi considerada insignificante (Mistha e Mishra, 2012).

3.6.2. Índice de Turbidez por Diferença Normalizada

O NDTI, que é estimado usando os valores de reflectância espectral dos pixels de água, é usado para estimar a turbidez em corpos de água. Ele usa o fenômeno de que a reflectância electromagnética é maior no espectro verde do que no espectro vermelho para água limpa. Portanto, com o aumento da turbidez, a reflectância do espectro vermelho também aumenta.

O NDTI varia entre -1 e +1, e é calculado a partir da equação da diferença entre a banda do visível do vermelho e do verde. No caso deste índice, valores positivos indicam uma maior concentração de sedimentos, enquanto que valores negativos ou próximos de zero retratam uma menor turbidez. É utilizado para estimar a turbidez presente em um corpo hídrico (Lacaux *et al.*, 2006).

Somvamshi (2011) utilizou o índice NDTI para analisar a qualidade das águas e sua relação com a turbidez, e avalia que o NDTI é um indicador capaz de relacionar com a qualidade da água comparando com dados obtidos *in situ*.

Material e Métodos

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e as técnicas utilizadas para a elaboração deste estudo.

4.1. Material

Para o alcance dos objectivos traçados neste estudo, foram utilizados dados de diferentes fontes.

Os dados referentes a divisão administrativa foram obtidos no CENACARTA disponibilizados no site (<http://www.cenacarta.com/>). Os dados referentes as imagens Landsat 8 foram adquiridas no site da USGS *Explorer* através do site (<https://earthexplorer.usgs.gov>), e as imagens do Google satélite no *Qgis* 3.24 Tisler foram usados para o processo de digitalização da área de estudo. Para a monitorização da qualidade da água, foram obtidas imagens de 2014 e 2024 com resolução espacial de 30 metros nas estações seca para o mês de setembro 2014 e 2024. Para a estação chuvosa, as imagens foram colectadas no mês de dezembro em 2014 e 2024. E por fim, os dados referentes ao MDE-STRMGL1 foram adquiridas no site (<http://portal.opentopography.org>) no mês de abril de 2025, conforme estão apresentados na tabela.

Tabela 2: : Dados utilizados para a elaboração do trabalho

Dados	Formato	Modelo de dados	Resolução espacial/Escala	Fonte	Variáveis
Divisão administrativa	Shapefile	Vectorial	CENACATA
MDE	GeoTiff	Matricial	30 metros	<i>Open Topography</i>
Imagens do Google Satélite			1/250000	<i>Qgis 3.24 Tisler</i>
Imagens Landsat 8 OLI			30 metros	USGS	Clorofila-“a” Turbidez

4.1.1. Equipamentos Computacionais usados

Para a realização deste trabalho, foram utilizados diversos equipamentos que contribuíram significativamente para a análise e apresentação das informações. Esses equipamentos estão listados e descritos na tabela a seguir:

Tabela 3: Programas computacionais usados no processamento

Programas	Finalidade
Microsoft word	Elaboração do relatório.
Microsoft Excel	Ferramenta empregada para análise de dados, além de ser fundamental na criação de gráficos e tabelas.
Draw i.o	Software utilizado para a criação de fluxogramas e diagramas.
Zotero	Usado para criação de citação e referências bibliográficas .
Qgis 3.24.1 Tisler	Usado para processamento das Imagens de Satélite e elaboração de mapas

4.2. Métodos

Para a realização do presente estudo, adoptou-se o método cartográfico, tendo em vista sua eficácia na visualização e análise espacial de parâmetros relacionados à qualidade da água. Através da elaboração de mapas temáticos, torna-se possível identificar padrões de poluição e monitorar a evolução dos níveis de Clorofila-”a” e Turbidez ao longo do tempo na Albufeira de Chicamba Real.

Esse método, aliado à digitalização de imagens do Google Satélite, possibilitará a identificação de possíveis agentes responsáveis pelo aumento da concentração desses parâmetros na área de estudo.

Com o intuito de sustentar teoricamente as análises propostas, foi realizada uma revisão de literatura baseada em consultas a bibliotecas virtuais. Essa etapa revelou-se essencial para a construção de uma base conceptual robusta e confiável, imprescindível à compreensão dos processos que afectam a qualidade da água na Albufeira de Chicamba Real, situada na província de Manica. A análise foi complementada por meio da aplicação de índices espectrais, tais como o NDCI e o NDTI, calculados a partir de imagens do satélite Landsat 8 OLI. Para a estimativa da concentração de Clorofila, utilizaram-se as bandas espectrais correspondentes às faixas do vermelho (b4) e do infravermelho próximo (b5). E para a estimativa da Turbidez, foram utilizadas as bandas do verde (b3) e do vermelho (b4).

As imagens analisadas referem-se a duas estações sazonais distintas – seca e chuvosa, correspondentes aos meses de Setembro e Dezembro respectivamente, nos anos de 2014 e 2024.

4.2.1. Fluxograma metodológico

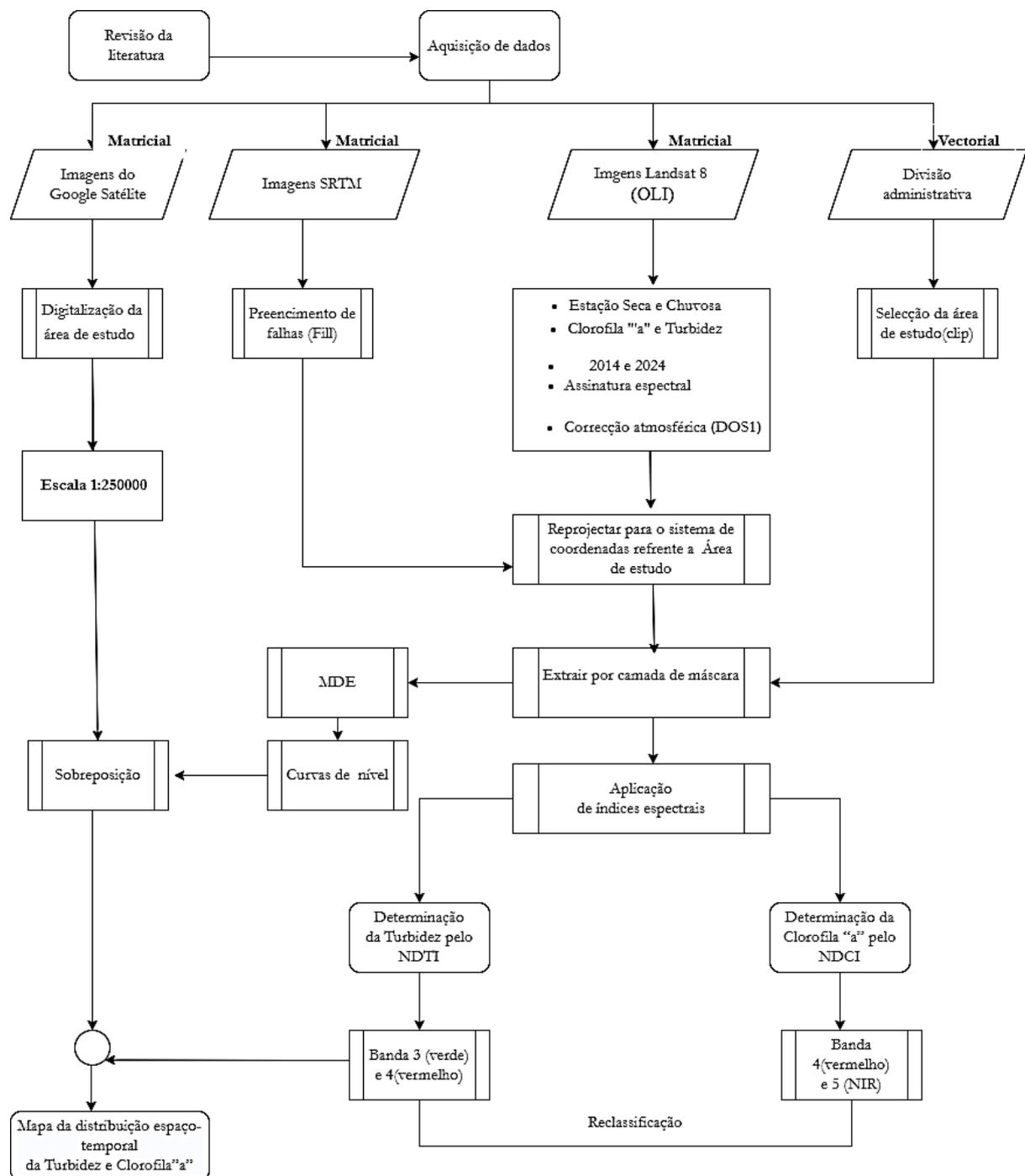


Figura 6: Fluxograma Metodológico

4.3. Procedimentos metodológicos

Correspondem a procedimentos que foram seguidos no presente estudo, para obter, analisar e interpretar dados obtidos a partir de imagens de satélite. Esses procedimentos incluem:

4.3.1. Pré – Processamento

O pré-processamento é uma etapa fundamental em estudos que utilizam imagens de satélite ou grandes conjuntos de dados. Consiste na preparação dessas informações brutas, que podem inicialmente conter erros, distorções ou dados irrelevantes, para que estejam adequadas à etapa de análise.

O tratamento dos dados adquiridos foi realizado nesta fase, por meio de um conjunto de procedimentos metodológicos, descritos a seguir.

✓ Reprojecção das imagens

A Reprojecção das imagens de satélite é uma etapa do pré-processamento que consiste em alterar o sistema de coordenadas geográficas da imagem para que ela fique alinhada correctamente com outras imagens, mapas ou dados espaciais.

Para este estudo, as imagens do Landsat 8 OLI disponibilizadas pela *USGS* na projecção *WGS 1984 UTM* zona 36N, foram reprojectadas para *WGS 84/UTM Zona 36S*.

✓ Correccção atmosférica

A correção atmosférica das imagens foi realizada no Software *Qgis 3.24.2 Tisler*, por meio da ferramenta *SCP (Semi-Automatic Classification Plugin)*, utilizando o algoritmo *DOS 1 (Dark Object Subjectraction)*. Esse método baseia-se na subtração da reflectância mínima, assumida a partir de objectos escuros presentes na cena, visando eliminar a influência da dispersão atmosférica e melhorar a acurácia dos valores espectrais obtidos.

✓ Modelo Digital de Elevação

Um modelo digital de elevação são malhas de pontos que descrevem a altimetria de uma determinada área geográfica.

No presente estudo, o MDE utilizado foi obtido pelo sensor *STRM*, que possui uma resolução espacial de 30 metros. A equidistância entre as curvas de nível é de 50 metros

Processamento das Imagens

4.3.1.1. Cálculo do Índices de Clorofila por Diferença Normalizada

O NDCI é um algoritmo proposto por Mirsha e Mirsha (2012) que utiliza a relação entre as bandas vermelha e NIR, de modo a evitar a influência de CDOM e TSS nos espectros de reflectância da água em comprimentos de onda mais curtos

$$NDCI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Onde: R - corresponde a banda (4) do Vermelho e o NIR – corresponde banda (5) do Infravermelho Próximo

4.3.1.2. Cálculo Índices de Turbidez por Diferença Normalizada

O NDTI varia entre -1 e 1, e é calculado a partir da equação da diferença entre a banda do visível do vermelho e do verde. É utilizado para estimar a turbidez presente em um corpo hídrico (Lacaux *et al.*, 2006). Somvamshi (2011) utilizou o índice NDTI para analisar a qualidade das águas e sua relação com a turbidez, e avalia que o NDTI é um indicador capaz de relacionar com a qualidade da água comparando com dados obtidos in situ

$$NDTI = \frac{R - G}{R + G} \quad (2)$$

Onde: R – Banda do Vermelho (4) e G – Banda Verde (3) do Landsat 8.

4.3.1.3. Reclassificação das imagens de Satélite

A reclassificação das imagens foi executada por meio do módulo *r. recorde* do *GRASS GIS*, apropriado para *raster* com valores contínuos e negativos. Os valores do *raster* foram recodificados em três classes temáticas: Baixa, Moderada e Elevada, representando os níveis de Turbidez e a concentração de Clorofila-“a”.

4.3.1.4. Determinação da Assinatura espectral da Turbidez e Clorofila-“a”

A assinatura espectral da Turbidez e da Clorofila foi determinada com o auxílio da ferramenta *Temporal/Spectral Tool*, disponível no ambiente do Qgis. Esta ferramenta permite a extração de perfis espectrais a partir das imagens de satélite.

No presente estudo, foram utilizados os dados das bandas 1 a 7 do sensor OLI a bordo dos satélites Landsat 8 e 9, que abrangem as faixas espectrais do visível ao infravermelho de ondas curtas. A análise foi realizada sobre as áreas previamente classificadas como baixa, moderada e elevada concentração da Turbidez e Clorofila-“a”.

Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentados os resultados sob a forma de tabelas, mapas e gráficos, com o intuito de compreender a distribuição espacial da Clorofila-“a” e da Turbidez da água nos anos de 2014 e 2024. As classes de concentrações serão representadas por cores específicas : a cor azul em diferentes tonalidades.

5.1. Mapa topográfico da Albufeira de Chicamba Real

O mapa da figura 8, representa a topografia e os elementos físicos da região da Albufeira de Chicamba Real. Estes elementos correspondem às zonas de cursos de água, áreas de garimpo ilegal, aldeias, rio révuè, cobertura vegetal e elevações. Esses elementos são fundamentais para compreender a dinâmica da qualidade de água.

A Albufeira apresenta riscos de poluição por sedimentos, especialmente pelo mercúrio, devido a intensa actividade de garimpo praticada ao longo do rio révuè, considerado o principal afluente da Albufeira. Observa-se que, em função da altitude, os pontos de garimpo estão localizados em áreas mais elevadas, com altitudes que podem atingir até 1000 metros. Em contrapartida, a área da Albufeira encontra-se em uma cota altimétrica entre 650 e 750 metros, representando zonas de menor altitude. As área de garimpo devido à sua localização em cotas mais altas, favorece o escoamento de sedimentos em suspensão para a Albufeira. Isso intensifica a poluição e compromete a qualidade de água.

As aldeias que circundam a área de estudo revelam-se particularmente vulneráveis a esta actividade, uma vez que a Albufeira constitui uma fonte estratégica de abastecimento hídrico e de pesca. Para além de se configurarem como receptores directos desses impactos, estas comunidades evidenciam potencial de pressão antrópica na região, contribuindo para o incremento das cargas orgânicas no ecossistema hídrico. As vias de acesso, facilitam o acesso às zonas de garimpo e as aldeias podendo indicar zonas de maior impacto.

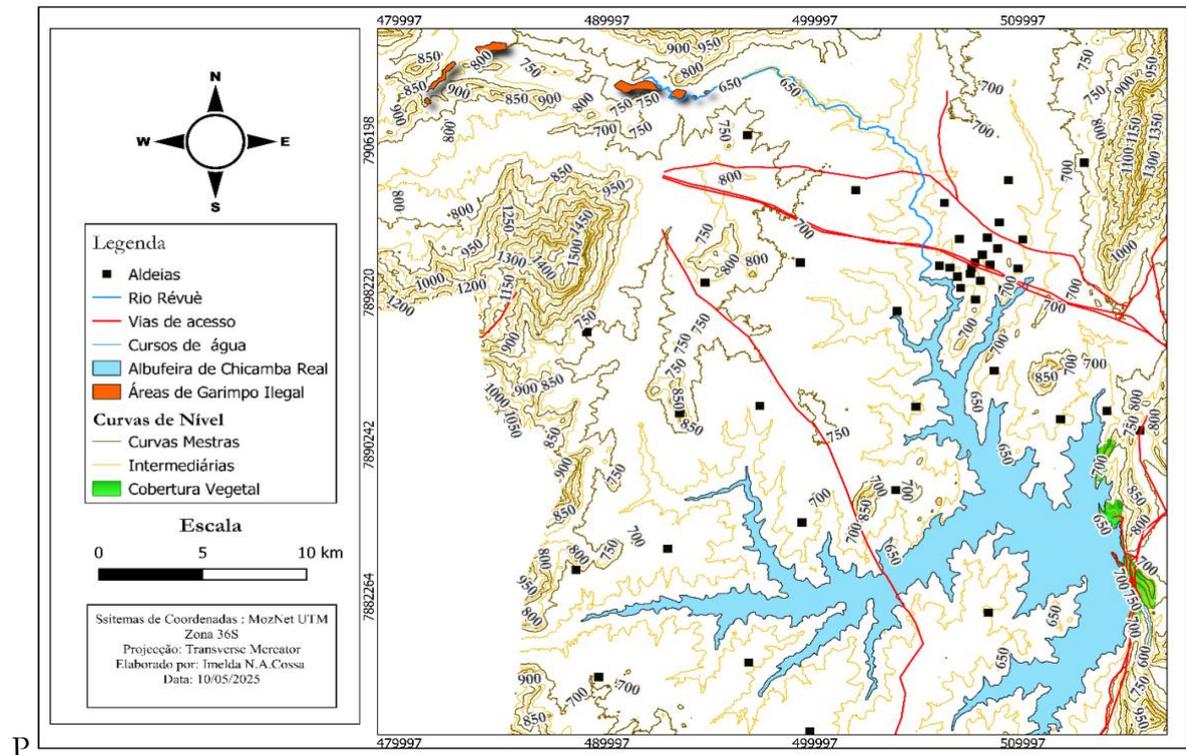


Figura 7: Mapa detalhado da área de estudo

5.2. Estimativa da Concentração da Clorofila-“a”

5.2.1. Concentração da Clorofila-“a” em Setembro de 2014

Durante a estação seca, as regiões que apresentam uma concentração **baixa** de Clorofila-“a” estão localizadas maioritariamente no centro da Albufeira, ocupando uma área de aproximadamente 38,0565 km², com altitudes entre 650 m - 750 m.

A classe **moderada**, distribui-se principalmente a nordeste da Albufeira, com altitudes até 850 m, abrangendo uma área equivalente a 38,9189 km², superior a da classe baixa.

A classe **elevada**, por sua vez, encontra-se nas margens da Albufeira e a norte do rio Révuè, atingindo um pico máximo de 850 m. Esta classe ocupa uma área de 37,521 km².

Na estação chuvosa, a concentração **baixa** da Clorofila-“a” é predominante nas zonas a norte até ao sudeste da Albufeira, ocupando uma área de 38,0834 km², com altitudes que variam entre os 650m - 700m. A classe **moderada** encontra-se maioritariamente a oeste da área de estudo, com altitudes entre 650 m - 800 m, abrangendo uma área de 38,9195 km².

A classe **elevada** localiza-se junto às margens da área, principalmente a norte com altitudes mais baixas entre 600 e 750 m, ocupando uma área de 37,818 km².

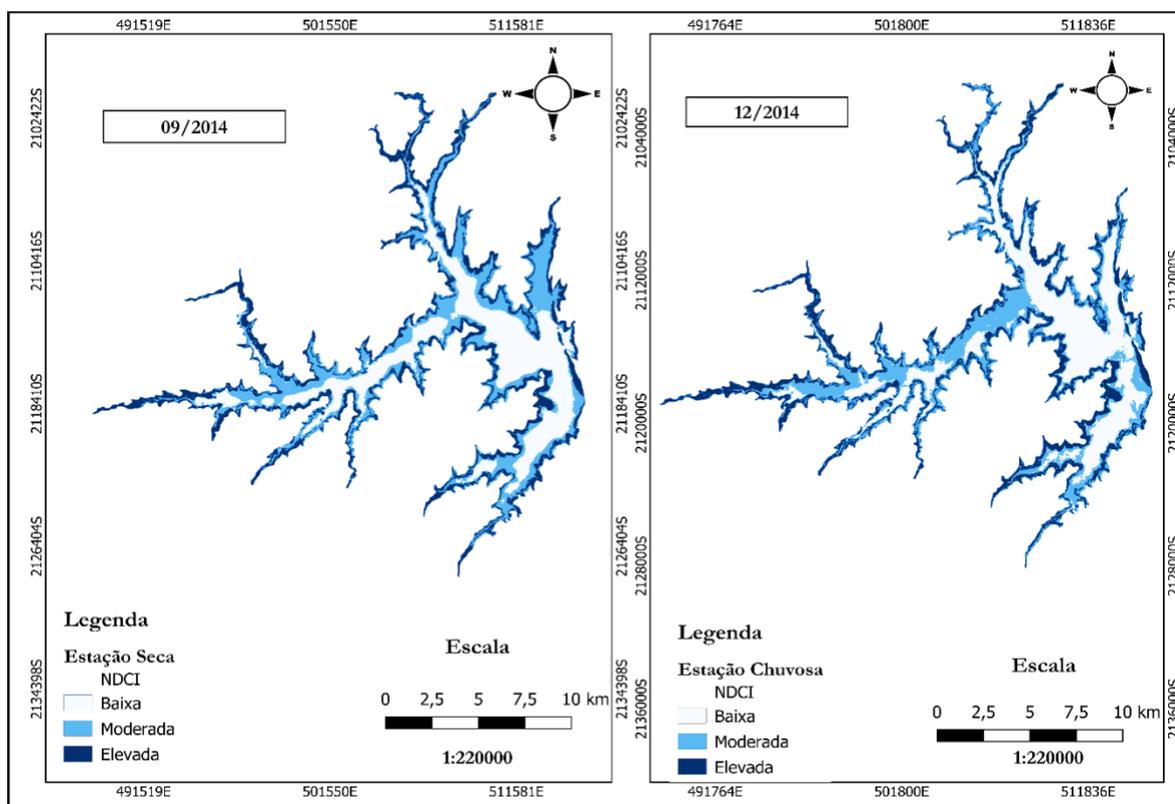


Figura 8:Concentração da Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2014

Tabela 4: Áreas ocupada por cada classe de Concentração de Clorofila-“a” em 2014

Estação Seca – Setembro de 2014		
Classes	Área em (km²)	Área de abrangência (ha)
Baixa	38.0565	3805.650
Moderada	38.9196	3891.960
Elevada	37.5201	3752.010
Total	114.4962	11,449.620
Estação Chuvosa – Dezembro de 2014		
Baixa	38.4831	3848.310
Moderada	38.1951	3819.510
Elevada	37.818	3781.800
Total	114.4962	11,449.620

Na distribuição percentual da área de abrangência em 2014, observa-se que, a classe baixa representou 33,24% da área total durante a estação seca e 33,61% na estação chuvosa, indica uma ligeira elevação na ocorrência de menores concentrações de Clorofila-“a” no período húmido. A classe moderada apresentou maior representatividade na estação seca , com 34%, e decréscimo na estação chuvosa , atingindo 33,35%, o que pode estar relacionado à diluição de nutrientes durante a estação chuvosa. Na

classe elevada, registou 32,76% na estação seca e 33,04% na chuvosa, sugerindo um aumento na produtividade biológica durante a época de chuvas.

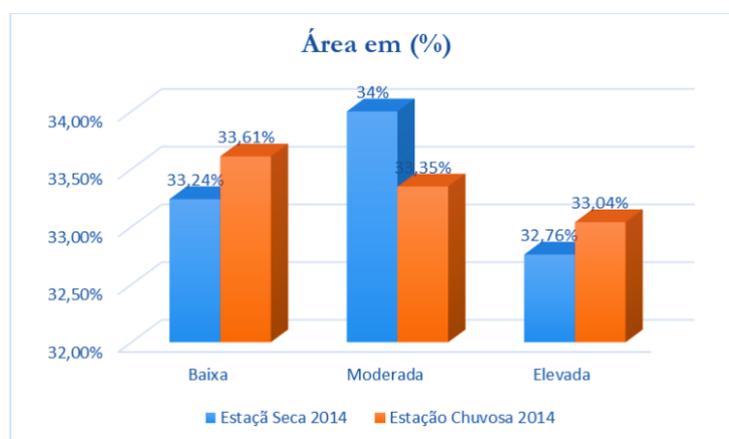


Figura 9: Área de abrangência em percentagem em 2014

Tabela 5: : Valores estatísticos de Clorofila-“a” Clorofila em 2014

Valores	Estação Chuvosa 2014	Estação Seca 2014
Mínimo	1	1
Máximo	3	3
Médio	1.9941	1.9953
Desvio padrão	0.8163	0.8124

5.2.2. Concentração da Clorofila-“a” em Dezembro de 2024

A **classe baixa**, na **estação seca**, corresponde a menores concentrações de Clorofila-“a”, ocupando uma área equivalente a 38,0292 km², localizada predominantemente na zona intermédia da Albufeira e a norte do reservatório, com altitudes entre 650 e 750 m. Em contrapartida, na **estação chuvosa**, a classe baixa é dominante nas zonas intermédias, estendendo-se até ao sul da albufeira, com altitudes que variam entre 650 e 800 m, abrangendo uma área inferior, de aproximadamente 38,2311 km².

A **classe moderada**, durante a **estação seca**, ocupou uma área de 38,3202 km², distribuindo-se maioritariamente nas zonas das margens a oeste da Albufeira, com cotas que atingem 700 m. Portanto, na **estação chuvosa**, esta classe predominou nas zonas fluviais com altitudes até 700 m, situando-se na parte oeste da Albufeira, ocupando uma área relativamente menor, de cerca de 38,0916 km²

Por sua vez, a **classe elevada**, na **estação seca**, abrangeu uma área de 32,9468 km², concentrando-se nas zonas a norte, com altitudes até 800 m. Na **estação chuvosa**, esta classe ocupou uma área de 38,0835 km², localizando-se nas margens e zona norte da Albufeira, com altitudes entre 800 e 650 m.

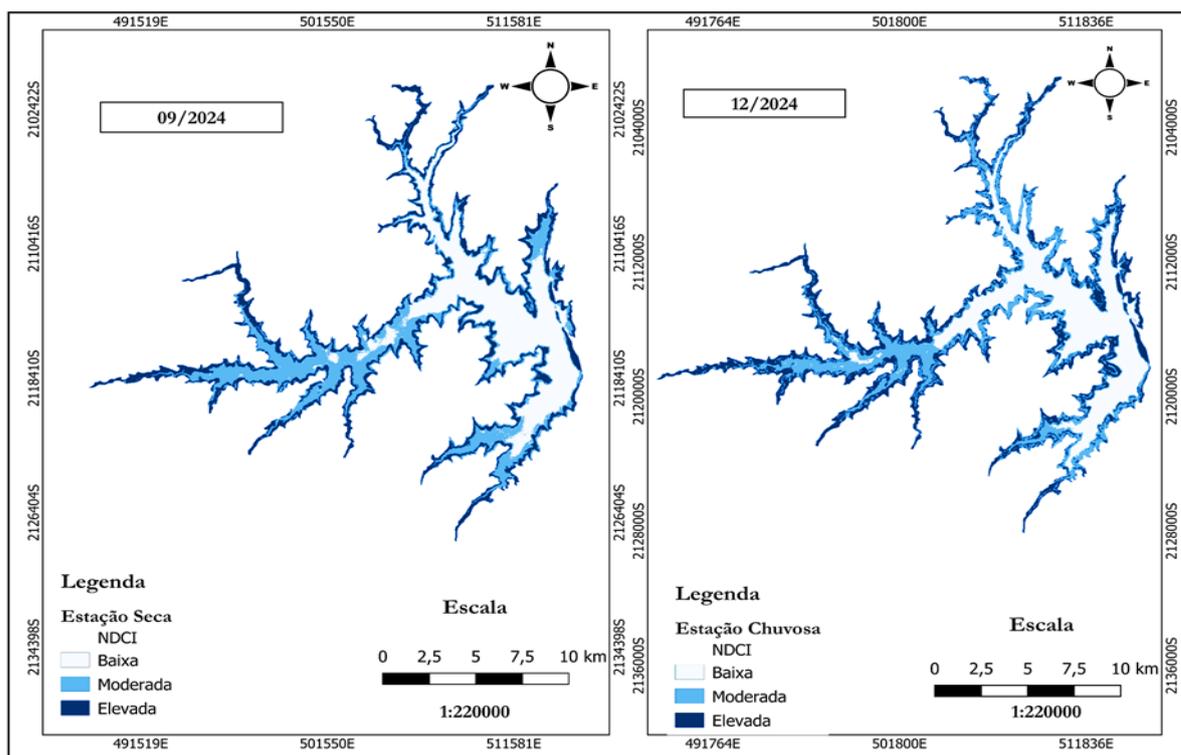


Figura 10: Concentração da Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2024

Tabela 6: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Clorofila-”a” em 2024

Estação Seca – Setembro de 2024		
Classes	Área em (km²)	Área de abrangência (ha)
Baixa	38.3292	3832.920
Moderada	38.3202	3832.020
Elevada	37.8468	3784.680
Total	114.4962	11,449.620
Estação Chuvosa – Dezembro de 2024		
Baixa	38.2311	3823.110
Moderada	38.1816	3818.160
Elevada	38.0835	3808.350
Total	114.4962	11,449.620

O gráfico apresenta a distribuição percentual da Clorofila-“a” em três classes (baixa, moderada e elevada), para as estações seca e chuvosa de 2024: Para a **Classe baixa**, na **estação seca**: apresenta 33,47% da área total e na **estação chuvosa**: 33,39%. Houve pequena redução na estação chuvosa, indicando uma ligeira melhoria da qualidade de água, possivelmente devido à diluição por maior volume de água.

Na **Classe moderada**, na **estação seca**: apresenta 33,46%, na **estação chuvosa**: 33,35%, isso indica estabilidade na distribuição dessa classe, sugerindo condições ambientais equilibradas e pouca influência da sazonalidade sobre os níveis médios de Clorofila-“a”.

Durante a classe elevada, na **estação seca**: apresenta 33,07% e, na **estação chuvosa**: 33,27%, verifica-se um crescimento notável na estação chuvosa. Este aumento pode estar associado ao maior aporte de nutrientes por escoamento superficial, resultando em proliferação de fitoplâncton e, por consequência, aumento da Clorofila-“a”

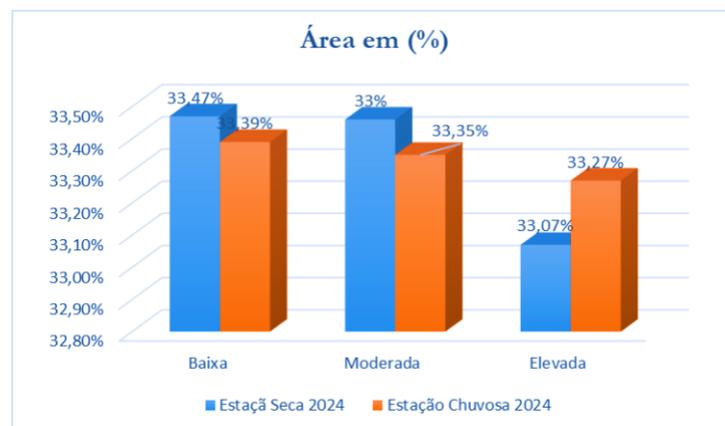


Figura 11: Área de abrangência em percentagem em 2024

Quanto aos valores estatísticos, a média é muito próxima de 2 nas duas estações revela que a classe moderada continua a ser ligeiramente predominante, mesmo com variações percentuais nas classes. O desvio padrão praticamente igual, indica estabilidade na variabilidade dos dados. Isto quer dizer que as distribuições das classes não sofreram grandes dispersões em relação à média.

Tabela 7: Valores estatísticos da Turbidez em 2024

Valores	Estação Chuvosa 2024	Estação Seca 2024
Mínimo	1	1
Máximo	3	3
Médio	1.9987	1.9957
Desvio padrão	0.8164	0.8156

5.2.3. Comportamento espectral da Clorofila-“a”

Classe Elevada: durante a **estação seca de 2014** a reflectância máxima no NIR (~850 nm) com valores superiores a 2600 unidades e na **estação seca de 2024** também com pico no NIR, mas ligeiramente mais baixo 2500 unidades.

Classe Moderada e Baixa: os valores são muito inferiores, reflectindo menor densidade de Clorofila-“a”, verifica-se aumentos visíveis nas faixas do azul ao vermelho (~450–670 nm), mas sem superar a classe elevada.

Em ambas as estações secas, a classe elevada apresenta maior reflectância, com ligeira redução em 2024, possivelmente devido a variações climáticas ou intervenções ambientais que limitaram a proliferação de algas.

Classe Elevada: na estação chuvosa de 2014, o pico de reflectância também no NIR, com valores próximos a 2700 unidades, e na estação chuvosa de 2024, subida expressiva no NIR, ultrapassando os 3000 unidades.

Classes Moderada e Baixa: Mantêm-se estáveis ou ligeiramente mais intensas nas faixas visíveis em 2014 e, em 2024, notável elevação da reflectância na faixa verde (560 nm) para a classe moderada

O aumento significativo da reflectância em 2024, especialmente para a classe elevada durante a estação chuvosa, pode ser atribuído ao maior carregamento de nutrientes por escoamento superficial, eutrofização e presença elevada de fitoplâncton.

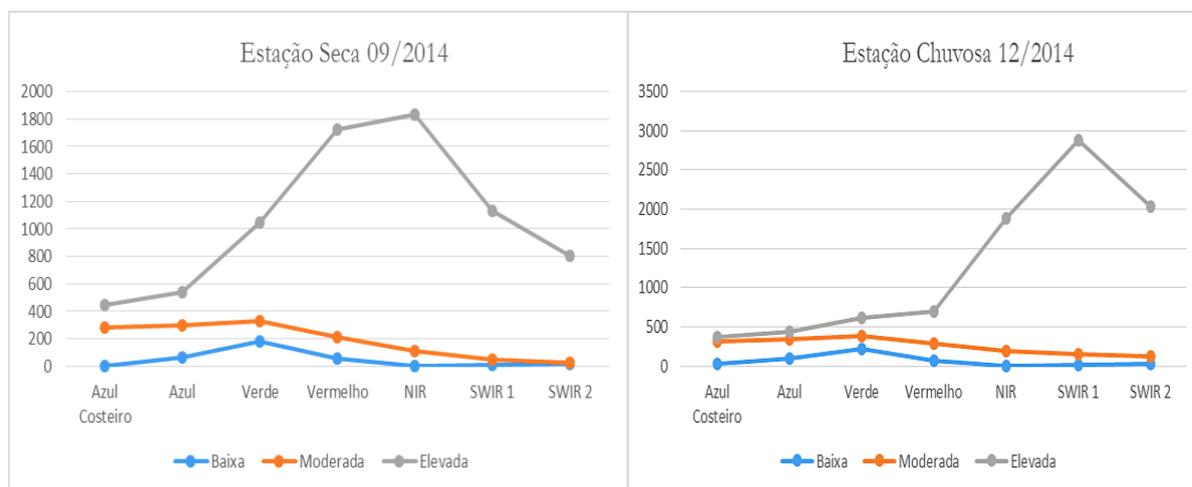


Figura 12: Comportamento espectral da Concentração de Clorofila-“a” na estação seca e chuvosa em 2014

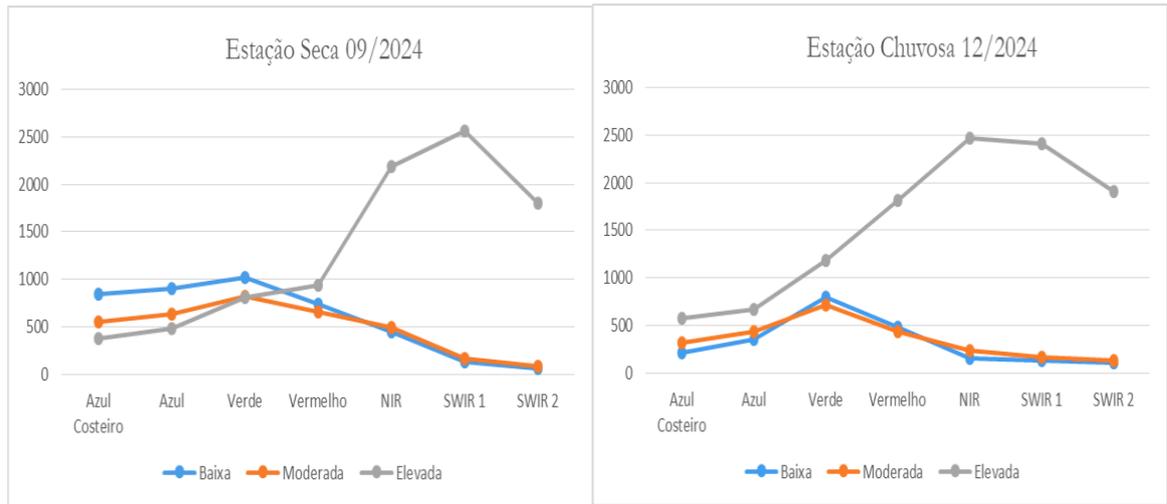


Figura 13: Comportamento espectral da Concentração de Clorofila-”a” na estação seca e chuvosa em 2024

5.3. Estimativa dos níveis de Turbidez

5.3.1. Concentração dos níveis de Turbidez em Setembro de 2014

Durante a **estação seca**, as regiões que apresentam uma concentração **baixa** de Turbidez estão localizadas maioritariamente no centro da Albufeira, ocupando uma área de aproximadamente 37,6758 km², com altitudes entre 650 m - 750 m.

A classe **moderada**, distribui-se principalmente a nordeste da Albufeira, com altitudes ate 850 m, abrangendo uma área equivalente a 38.3067 km², superior a da classe baixa.

A classe **elevada**, por sua vez, encontra se nas margens da Albufeira e a norte do rio révuè, atingindo um pico máximo de 850 m. Esta classe ocupa uma área de 38.5137km², ocupando uma maior superfície

Na **estação chuvosa**, a concentração **baixa** da Turbidez é predominante nas zonas centro até ao sul da Albufeira, ocupando uma área de 38.6514km², com altitudes que variam entre os 650 m - 700 m. A classe **moderada** encontra-se maioritariamente a oeste e pouco a norte da área de estudo, com altitudes entre 650 m - 800 m, abrangendo uma área de 37,1853 km².

A classe **elevada** localiza-se junto às margens da área, principalmente a norte com altitudes mais baixas entre 600 e 750 m, ocupando uma área de 38,5137km²

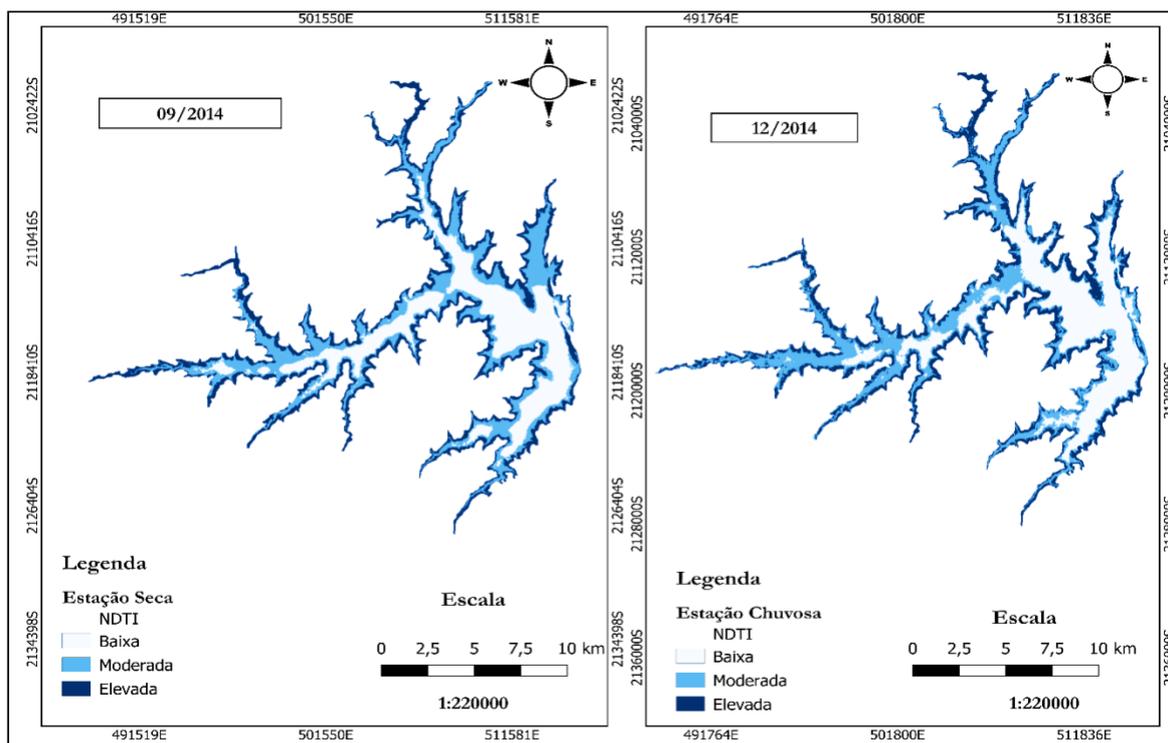


Figura 14: Concentração dos níveis de Turbidez na estação seca e chuvosa em 2014

Tabela 8: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Turbidez em 2014

Estação Seca – Setembro de 2014		
Classes	Área em (km ²)	Área de abrangência (ha)
Baixa	37.6758	3767.580
Moderada	38.3067	3830.670
Elevada	38.5137	3851.370
Total	114.4962	11,449.620
Estação Chuvosa – Dezembro de 2014		
Baixa	38.6514	3865.140
Moderada	37.1853	3718.530
Elevada	38.6595	3865.950
Total	114.4962	11,449.620

A distribuição percentual da Turbidez indica que , a distribuição espacial da Turbidez está equilibrada entre as três classes, com ligeira predominância da classe elevada(33,64%) , o que sugere que, mesmo com precipitação baixa, existem áreas com significativa presença de partículas suspensas.

Na estação chuvosa, observa-se um aumento discreto da classe baixa (33,75%) e da classe elevada (33,77%), enquanto que na classe moderada reduz ligeiramente. O aumento da classe baixa indica que, em algumas regiões, a água foi diluída devido ao maior volume hídrico, reduzindo a concentração de

partículas. O aumento da classe elevada revela que, em outras regiões, houve um aumento da Turbidez, provavelmente provocado pelo escoamento superficial, que carrega sedimentos de mercúrio para a Albufeira.

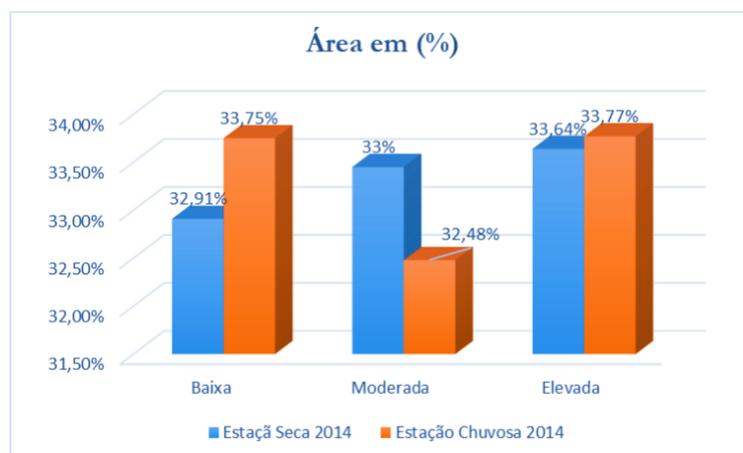


Figura 15: Área de abrangência em percentagem em 2014

Quanto aos valores estatísticos, indicam que, a classe moderada é predominante nas duas estações com a média de Turbidez equivalente a 2,0000 na estação chuvosa e 2,0073 na estação seca, os valores do desvio padrão, mostram que a Turbidez esteve distribuída de forma regular.

Tabela 9: Valores estatísticos da Turbidez em 2014

Valores	Estação Chuvosa 2014	Estação Seca 2014
Mínimo	1	1
Máximo	3	3
Médio	2.0000	2.0073
Desvio padrão	0.8217	0.8157

5.3.2. Concentração dos níveis de Turbidez em Dezembro de 2024

Durante o período da **estação seca**, em 2024, a classe baixa foi predominante nas zonas centrais e oeste da Albufeira, ocupando um área de 36.0288 km², com altitudes entre 650 - 700 m. A classe moderada localizou-se a oeste e norte, em zonas fluviais, abrangendo uma superfície equivalente a 39.4200 km², com altitudes inferiores a 700 m. A classe elevada ocupou uma área de 39.0474 km², estando distribuída a norte e nas margens da Albufeira, com altitudes próximas a 700 m.

Na **estação chuvosa**, a classe baixa abrangeu uma área de 38,2041 km², localizando-se nas zonas oeste e sul da Albufeira, com altitudes compreendidas entre 650 e 800 m. A classe moderada estendeu-se por uma área de 36,2340 km², com altitudes até 700 m, estando localizadas nas zonas intermédias. A classe

elevada apresentou a maior área, equivalente a 40.0581km², distribuídas em altitudes que variaram entre 700 e 600 m, abarcando áreas de menores altitudes principalmente a norte da Albufeira.

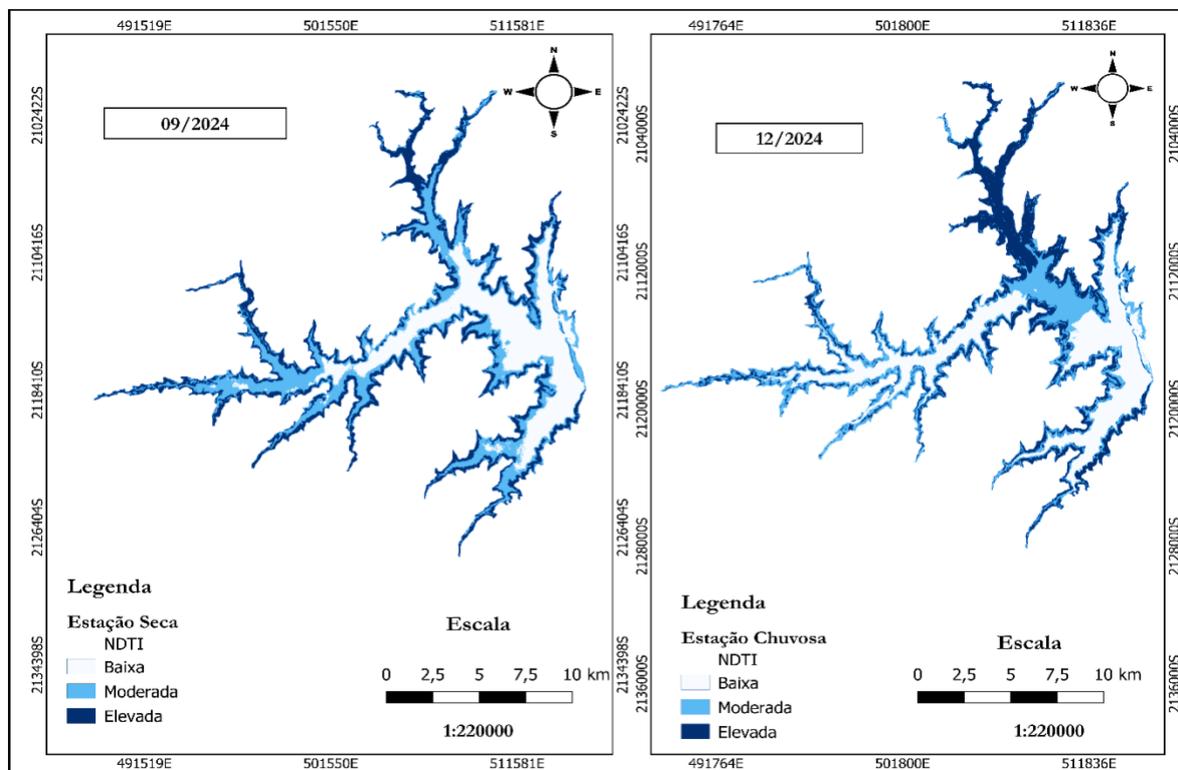


Figura 16: Concentração dos níveis de Turbidez na estação seca e chuvosa em 2024

Tabela 10: Áreas ocupada por cada classe de Concentração da Turbidez em 2024

Estação Seca – Setembro de 2024		
Classes	Área em (km ²)	Área de abrangência (ha)
Baixa	36.0288	3602.880
Moderada	39.4200	3942.000
Elevada	39.0474	3904.740
Total	114.4962	11,449.620
Estação Chuvosa – Dezembro de 2024		
Baixa	38.2041	3820.410
Moderada	36.2340	3623.400
Elevada	40.0581	4005.810
Total	114.4962	11,449.620

O gráfico da figura 18, apresenta a distribuição percentual da área de abrangência das classes seca e chuvosa de 2024.

Na classe baixa, na estação seca, a área ocupada é de 31,46% e na estação chuvosa ocupada uma área de 33,37%. Houve aumento durante a classe chuvosa, o que é coerente, pois com o aumento da precipitação, há maior escoamento superficial, carregando partículas em suspensão para a Albufeira de Chicamba Real. Na classe moderada, para a estação seca a área ocupada corresponde a 34% e na estação chuvosa 31,65%. Houve redução da classe, isso pode indicar que a área anteriormente com Turbidez moderada foi redistribuída para os extremos (baixa ou elevada). Na classe elevada, na estação seca ocupa uma área de 34,10%, e na estação chuvosa 34,98%. Houve ligeiro aumento da área com Turbidez elevada na estação chuvosa.

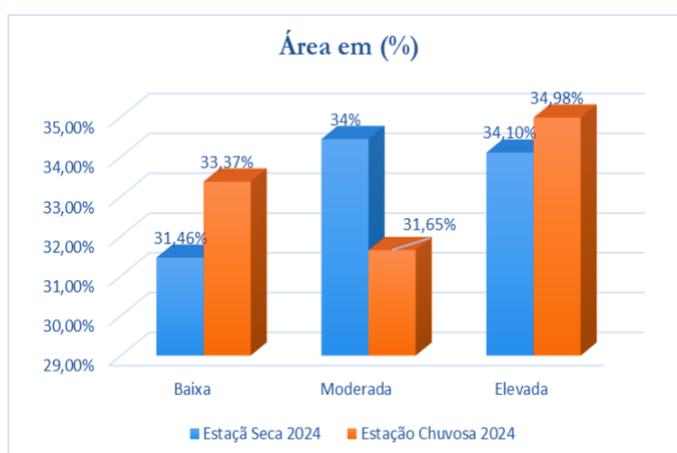


Figura 17: Área de abrangência em percentagem em 2024

O desvio padrão mede a dispersão dos valores em relação a média. De acordo com a tabela 11, na estação seca o desvio padrão é de 0,8093 e na chuvosa 0,8266. Embora próximos, o desvio da estação chuvosa é maior, o que indica que os valores de Turbidez neste período estão mais dispersos. Essa dispersão pode ser justificada pelo aumento da influência de factores externos, como a erosão, entrada de resíduos agrícolas e escorrência urbana

Tabela 11: Valores estatísticos da Turbidez em 2024

Valores	Estação Chuvosa 2024	Estação Seca 2024
Mínimo	1	1
Máximo	3	3
Médio	2.0161	2.0263
Desvio padrão	0.8266	0.8093

5.3.3. Comportamento espectral dos níveis de Turbidez

O gráfico ilustra o comportamento espectral da Turbidez nas estações seca e chuvosa em 2014.

Para a classe elevada, os maiores valores de reflectância encontram-se na faixa do vermelho ($\sim 0,64\mu\text{m}$), atingindo cerca de 1800 na estação seca e 1900 na chuvosa. Isso ocorre devido a dispersão da luz pela elevada concentração de partículas em suspensão, típica de águas turvas.

A classe moderada tem comportamento estável com reflectância média nas bandas verde ($\sim 0,56\mu\text{m}$) e vermelha, com valores por volta de 300 a 400, reflectindo uma quantidade moderada de partículas na água nas duas estações analisadas.

A classe baixa, apresenta valores de reflectância menores, com destaque na banda azul costeira ($\sim 0,44\mu\text{m}$) e azul ($\sim 0,48\mu\text{m}$), indicando maior absorção da luz nessas faixas, o que é característico de águas limpas.

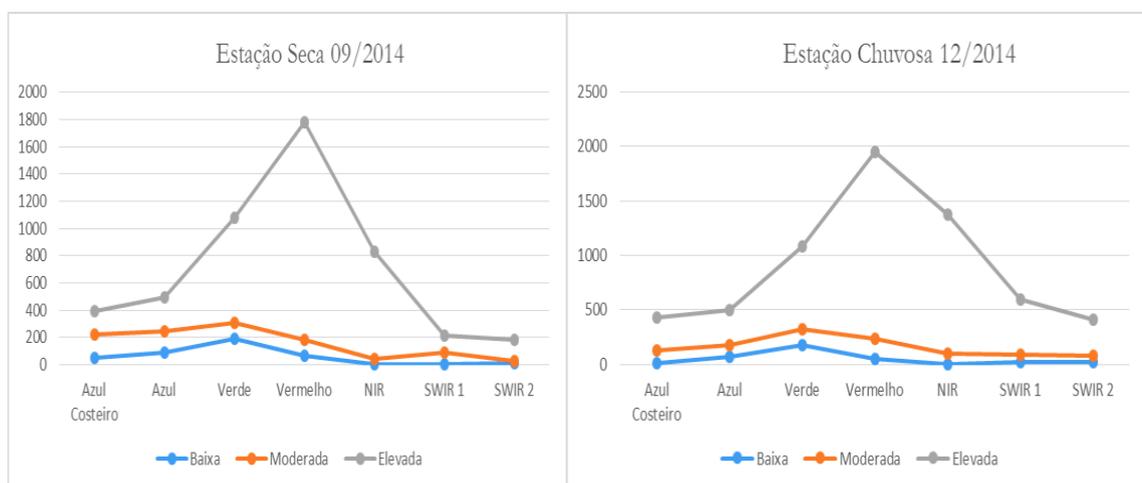


Figura 18: : Comportamento espectral da Turbidez na estação seca e chuvosa em 2014

No período de 2024, classe elevada de Turbidez mostra maior reflectância na banda vermelha ($\sim 0,64\mu\text{m}$), atingindo aproximadamente 1600 unidades, e na banda verde ($\sim 0,56\mu\text{m}$) com cerca de 1200 na estação seca, e os valores de reflectância são os mais altos de todo o ano, com pico acima de 250 unidades na banda vermelha e também no NIR ($\sim 0,86\mu\text{m}$) na estação chuvosa.

Na classe moderada registra valores médios entre 900 a 1000 na banda verde e vermelha, caindo gradualmente para as bandas do NIR e do SWIR na estação seca, e, apresenta reflectância consistente em todas as bandas, com destaque para a queda no NIR o que indica maior absorção de luz, típica de águas limpas na estação chuvosa.

Na classe baixa, a reflectância apresenta valores mais altos nas bandas do azul costeira e azul com valores em torno de 800 a 900, indicando menor absorção de luz nessas faixas durante a estação seca,

e , baixos valores de reflectância em todas as bandas, com destaque para a queda acentuada no NIR durante a estação chuvosa.

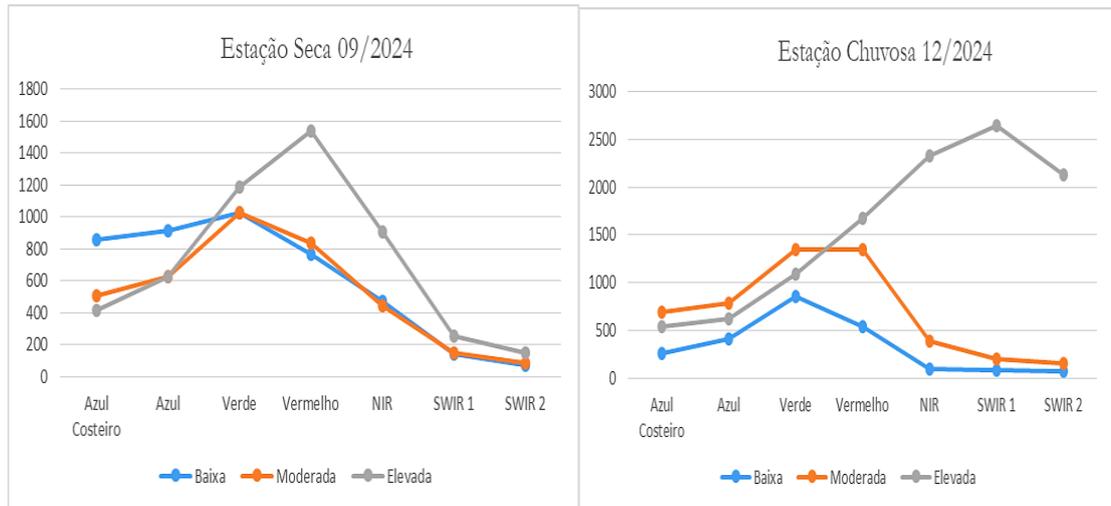


Figura 19: Comportamento espectral da Turbidez na estação seca e chuvosa em 2024

Conclusões e Recomendações

Com base na análise da estimativa das concentrações de Clorofila-“a” e dos níveis de Turbidez da água nos anos de 2014 e 2024, conclui-se que ambos os parâmetros, físico e microbiológico, apresentaram alterações significativas nas estações seca e chuvosa. Verificou-se que as classes elevadas de turbidez e clorofila são predominantes nas zonas marginais da Albufeira de Chicamba Real. O aumento dessas concentrações está associado, principalmente, à actividade de garimpo praticada a montante da albufeira, em regiões de maior altitude, o que favorece o escoamento superficial de sedimentos em suspensão e possivelmente de mercúrio para áreas de menor altitude. A comunidade que vive ao redor da albufeira é directamente impactada por essa actividade, especialmente nas zonas de maior concentração, que são de fácil acesso e cujas águas são utilizadas nas actividades diárias.

Entre 2014 e 2024, observou-se uma diminuição nos níveis de Clorofila-“a”, com predomínio da classe moderada em 2014 (34% na estação seca) e da classe baixa em 2024 (33,47% na seca e 33,39% na chuvosa), o que sugere uma possível melhoria na qualidade da água. Em contrapartida, a Turbidez apresentou aumento: em 2014, a classe elevada predominou nas duas estações (33,64% na seca e 33,77% na chuvosa), enquanto em 2024 houve predomínio da classe moderada na estação seca (34,46%) e novamente da elevada na chuvosa (34,98%). Essa tendência pode estar associada ao escoamento superficial e à atividade de garimpo, indicando a necessidade de monitoramento contínuo da região. Desta feita, conclui-se que, ao longo dos anos de 2014 e 2024, a concentração de Clorofila-“a” apresentou uma redução, sugerindo uma melhoria pontual na qualidade da água. Em contrapartida, os níveis de Turbidez aumentaram, indicando uma maior carga de sedimentos ou contaminantes em suspensão, especialmente em decorrência da actividade de garimpo praticada a montante da Albufeira.

Recomendações

Recomenda-se , que se estabeleça um programa de monitorização contínua para acompanhar as tendências de Turbidez e Clorofila-“a”, permitindo a identificação prévia de alterações significativas; Integração com dados de campo, sempre que possível complementar as análises de Detecção remota com medições *in situ* para calibrar e validar os modelos utilizados; Implementar práticas de manejo que reduzam o aporte de nutrientes nos corpos de água e, Utilização de imagens de satélites com alta resolução espacial, de modo a capturar detalhes mais finos na área de estudo.

Referências Bibliográficas

- Antônio Luís, & Puna, A. (2017). *Análise e avaliação multi-temporal da mudança da cobertura vegetal e uso de solo na bacia hidrográfica de Búzji (1986–2016)*
- Assunção, A. F. (2023). *Trabalho acadêmico, Universidade Federal de Minas Gerais*
- Becaro, P. L., Hideo, E., & Hung, C. (2023). *Monitoramento de clorofila-a em reservatórios da Região Metropolitana de São Paulo: Aplicação de modelos com imagens Sentinel-2.*
- Cardoso, F. E. C. (2022). *Trabalho acadêmico, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA.*
- Da Silva, E. D. J., Coelho, F., & Da Silva, W. P. (2017). *Sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. Cadernos UniFOA, 12, 121–130.*
<https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v12.n33.437>
- De Brito, H. C., Vasconcelos, R. S., Rufino, I. A. A., & De Brito, Y. M. A. (2022). *Uso de Sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. Caminhos de Geografia, 108–119* <https://doi.org/10.14393/RCG239060922>
- De Oliveira, E. N. (2020). *Geografia e Sensoriamento remoto*
- Galvan, K. A., Medeiros, R. C., Martins Neto, R. P., Liberalesso, T., Golombieski, J. I., & Zanella, R. (2020). *Análise ambiental macroscópica e a qualidade da água de nascentes na bacia do Rio São Domingos/SC, Brasil. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 165–176.*
<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0016>
- Guimarães, T. T. (2019). *Utilização de imagens de satélite para predição de clorofila-a e sólidos suspensos em corpos d'água: Estudo de caso da Represa do Lobo/SP. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.*
<https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-03092019-160041>
- Haddad, R. (2018). *Clorofila a e turbidez a partir de imagens MODIS.*
- Irigaray, C. T. J. H., Cunha, C. N. da, & Junk, W. J. (2020). *Pantanal à margem da lei: Panorama das ameaças e perspectivas para a conservação, Mupan.*
- Lakshmikantha, V., Hiriyannagowda, A., Manjunath, A., Patted, A., Basavaiah, J., & Anthony, A. A. (2021). *IoT based smart Water Quality Monitoring System. Global Transitions Proceedings, 181–186.*
<https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.062>

- Lima, E., Soares, M., Maciel, C., Simão, M. A., & Cavalcante, L. (2024, novembro 5). *Avaliação da qualidade da água para o consumo humano do município de Manicoré-AM*. XV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. <https://doi.org/10.55449/congea.15.24.VIII-019>
- Nascimento, F. R. D., Soares, M. D. R., Lima, E. L. F., Noguchi, H. S., Silva, D. A. P. D., Rebouças, R. D. S. D. O., & Souza, Z. M. D. (2024). *Avaliação da qualidade da água para consumo humano de duas fontes subterrâneas de abastecimento no município de Lábrea/AM*. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, e4231. <https://doi.org/10.55905/oelv22n4-133>
- Paranhos, A. C., Mioto, C. L., Pessi, D. D., Gamarra, R. M., Silva, N. M. D., Ribeiro, V. D. O., & Chaves, J. R. (2021). *Geotecnologias para aplicações ambientais* (1ª ed.). Uniedusul Editora. <https://doi.org/10.29327/527680>
- Pompêo, M., & Moschini-Carlos, V. (2022). *Avaliação da degradação da qualidade da água do reservatório Carlos Botelho em Itirapina, São Paulo, Brasil, por meio de imagens do satélite Sentinel 2*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 279–290. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210002>
- Ramos, A. D. S., Oliveira, V. D. P. S. D., & Araújo, T. M. D. R. (2019). *Qualidade da água: Parâmetros e métodos mais utilizados para análise de água de recursos hídricos superficiais*. *Holos Environment*, 205. <https://doi.org/10.14295/holos.v19i2.12315>
- Raso, E. F., Pedro, A. A., Gotine, K. M., Cachepa, M. M., Madacussengua, O., & Jonissene, N. N. (2021). *Impacto da exploração artesanal de ouro na saúde dos garimpos do distrito de Manica – Moçambique*. *Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente*, 820–31. <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2021v8n3p20-31>
- Rodrigues Miranda, L. G., Pereira Rainha, K., Pereira Da Cunha, P. H., Costa Oliveira, H., Fonseca Barroso, G., Filgueiras, P. R., & Ribeiro De Castro, E. V. (2023). *Use of remote sensing and chemometrics as tools to estimate parameters of water quality in intermittent lakes of the Lower Doce River*. *Revista Virtual de Química*, 1070–1080. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20230015>
- Sousa, K. A. D. (2020). *Trabalho acadêmico, Universidade Federal do Piauí*.
- Tundisi, J. G., & Matsumura-Rundisi, T. (2022). *Represas artificiais: Ecologia, limnologia, usos múltiplos, gerenciamento**. *Izabel Aparecida Maschietto*.
- Vilanculos, H. (2022). *Avaliação da qualidade de água da Barragem do Alto Muda para consumo humano no Distrito de Gondola – Província de Manica*. *Revista da UI_IPSantarém*, 10*(3), 11–21. <https://doi.org/10.25746/RUIIPS.V10.I3.29118>

Anexos

Anexos 1 : Precipitação mensal em 2014 e 2024

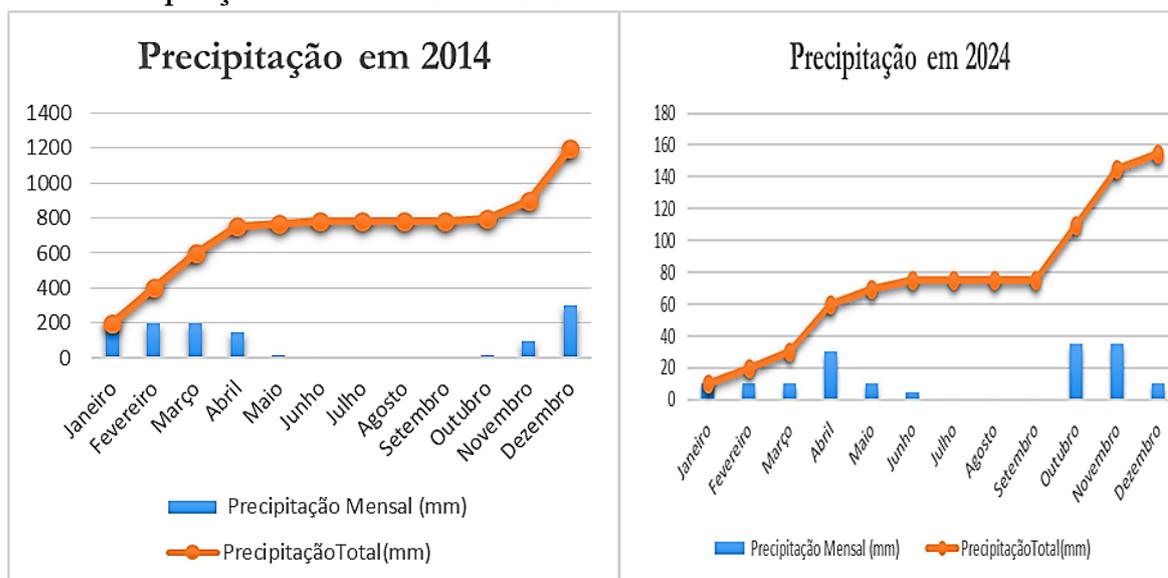


Figura 20: Precipitação mensal em 2014 e 2024

Anexos 2: Dados da reflectância da Turbidez e Clorofila-“a” em 2014 e 2024

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	46	90	189	67	0	6	13
Moderada	220	247	303	185	42	92	25
Elevada	389	490	1075	1780	832	216	180

Figura 21: Dados da reflectância da Turbidez em 2014, estação seca.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	8	73	173	47	0	18	22
Moderada	126	180	319	234	100	88	76
Elevada	430	499	1080	1948	1374	600	413

Figura 22: Dados da reflectância da Turbidez em 2014, estação chuvosa.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	859	910	1025	768	473	141	70
Moderada	505	624	1023	836	441	147	89
Elevada	418	627	1188	1536	906	252	147

Figura 23: :Dados da reflectância da Turbidez em 2024, estação seca.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	260	407	853	540	93	88	76
Moderada	689	785	1350	1343	383	205	158
Elevada	540	621	1092	1674	2325	2641	2127
	389	490	1075	1780	832	216	180

Figura 24: :Dados da reflectância da Turbidez em 2024, estação chuvosa.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	0	62	182	56	0	9	18
Moderada	286	297	332	213	109	48	28
Elevada	447	537	1048	1723	1832	1131	807

Figura 25: :Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2014, estação seca.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	36	99	220	76	0	21	26
Moderada	320	339	390	284	196	147	125
Elevada	367	433	618	701	1878	2874	2029
	389	490	1075	1780	832	216	180

Figura 26: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2014, estação chuvosa

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	215	358	802	486	160	130	105
Moderada	316	437	712	438	232	170	127
Elevada	572	663	1183	1813	2471	2407	1909

Figura 27: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2024, estação seca.

Classes	Azul Costeiro	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR 1	SWIR 2
Baixa	845	900	1014	744	448	129	64
Moderada	549	636	818	656	493	165	85
Elevada	380	482	810	938	2192	2563	1804

Figura 28: Dados da reflectância de Clorofila-“a” em 2024, estação chuvosa.