



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ**  
**PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA REGIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E**  
**MEIO AMBIENTE (PRODEMA)**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE (MDMA)**  
**SUBPROGRAMA PRODEMA/PRPG/UFPI**

**KEICYANE ALVES DE SOUSA**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CLOROFILA-A EM**  
**RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO PIAUIENSE**

Teresina

2020

KEICYANE ALVES DE SOUSA

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CLOROFILA-A EM RESERVATÓRIOS DO  
SEMIÁRIDO PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (Mestrado) da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA/UFPI), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de Concentração: Desenvolvimento do Trópico Ecotonal do Nordeste.

Linha de Pesquisa: Políticas de Desenvolvimento e Meio Ambiente.

**Orientadora:** Profa. Dra. Giovana Mira de Espindola.

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Carlos Ernando da Silva

Teresina – PI

2020

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco  
Serviço de Processamento Técnico

S725d Sousa, Keicyane Alves de.  
Dinâmica espaço-temporal da Clorofila-a em  
reservatório do semiárido piauiense. – 2020.  
172 f.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio  
Ambiente) – Universidade Federal do Piauí, Teresina,  
2020.

“Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Giovana Mira de Espindola.  
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Ernando da Silva.”

1. Meio Ambiente. 2. Qualidade da Água. 3. Clorofila-  
a. 4. Semiárido Piauiense. I. Título.

CDD 577

KEICYANE ALVES DE SOUSA

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CLOROFILA-A EM RESERVATÓRIOS DO  
SEMIÁRIDO PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA/UFPI/TROPEN), como requisito a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de Concentração: Desenvolvimento do Trópico Ecotonal do Nordeste. Linha de Pesquisa: Políticas de Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 11 / 05/ 2020



---

Profa. Dra. Giovana Mira de Espindola.

Orientadora  
(PRODEMA/UFPI)

---

Prof. Dr. Leonardo Madeira Martins  
Centro Universitário UNINOVAFAPI  
Membro Externo

---

Prof. Dr. João Batista  
Universidade Federal do Piauí – (PRODEMA/UFPI)  
Membro Interno

*Dedico à minha mãe Rosângela Alves da Silva Sousa, meu exemplo de mulher.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir realizar sonhos que nem eu mesma sabia que tinha, me proporcionando saúde e os melhores pais do mundo.

Aos meus pais, Celso Francisco de Sousa e Rosangela Alves da Silva Sousa, por todo o apoio, investimento da minha educação e por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões. Vocês são minha base, meu suporte, minha vida. Por vezes, pensei em desistir, mas vocês são o motivo de eu sempre lutar e continuar lutando. Eu amo vocês, obrigada por me amarem também.

A Eduarda de França Andrade, causa e razão de eu ter entrado no mestrado, pessoa que me incentivou, motivou, lutou e me ajudou em todas as etapas, desde a inscrição até o final dessa jornada.

A minha orientadora professora Dra. Giovana Mira de Espindola, por sempre ter me auxiliado nos momentos de dúvidas, por toda a paciência e por nunca ter desistido de mim. Meus sinceros agradecimentos por tudo, e peço desculpas pelas vezes que fui dispersa e deixei a desejar. Espero no futuro, ser um dia pelo menos 1% da grande profissional que a senhora é.

Ao meu co-orientador Dr. Carlos Ernando, pelas instruções a respeito da qualidade da água e por compartilhar um pouco da sua experiência comigo.

Aos Membros da banca, professor Dr. Leonardo Madeira que prontamente aceitou participar tanto da banca de qualificação como de defesa, apontando em ambos os momentos, boas sugestões para minha pesquisa. Ao professor Dr. João Batista, que além de participar das minhas bancas de qualificação e defesa, me presenteou com um pouco do seu conhecimento no mundo da estatística.

A todos os professores do TROPEN, que estiveram do meu lado ao longo desses últimos 2 anos, em especial ao professor Dr. José Façanha que sempre esteve disponível para conversas e conselhos nos momentos mais complicados dessa trajetória.

Aos pesquisadores e professores, Daniel, Felipe, Lino de Carvalho que mesmo a distância e sem me conhecerem, sempre me ajudaram e contribuíram para o enriquecimento da minha pesquisa.

Aos amigos, que me deram um imenso suporte durante essa trajetória, Andrade Alves Guerra, Barbara Isa Pinto Sales, Kaerto Yslan Alves de Sousa, Vitória Andressa Loiola dos Santos, que me fizeram companhia e me ajudaram durante as coletas, e em especial, ao Amadeu

Moura Fé Leopoldino Dantas e seus pais, por sempre serem solícitos ao me receberem e hospedarem em sua casa em Picos.

A laboratorista Olga, que esteve comigo durante todas as análises laboratoriais, me ensinando e auxiliando. Sua experiência enriqueceu ainda mais o meu trabalho.

Ao engenheiro agrimensor Vitor Brito, que também me auxiliou durante alguns momentos da minha pesquisa.

Aos meus companheiros de TROPEN, em especial Adonys Roney, Francisco Wanderson, Elayne Figueiredo e Vicente de Paula, pelas conversas, desabafos, ajudas, companheirismo e palavras de apoio em todos os momentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES, pela bolsa concedida.

Nada nessa vida não se faz sozinho. A trajetória de cada indivíduo é resultado da união de um grupo de pessoas que jogam em prol de um objetivo. Durante toda a minha vida, tive um grande time ao meu lado, no mestrado não foi diferente, muitas pessoas foram se somando a esse time, então esses são os meus sinceros agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado durante essa jornada, e quero dizer: vencemos mais uma partida, obrigada por estarem comigo, continuem comigo nas próximas batalhas...

## RESUMO

A água é bem essencial para a existência da vida no planeta. A região do semiárido do nordeste brasileiro, área que mais sofre com a escassez de água, tem utilizado a construção de açudes, barragens e reservatórios como forma de conviver com a seca que assola a região. Nesse tipo de estrutura hídrica é comum a afloração de algas, resultado do processo de eutrofização. Ambientes, altamente eutrofizados, têm seu uso inviabilizado. A clorofila-a é o principal componente na identificação do processo de eutrofização. Sua determinação é feita por metodologias tradicionais, que necessitam de coletas *in situ* em vários pontos amostrais. Esse processo é lento, caro e muitas vezes inviável de ser praticado em larga escala. Nessa conjuntura, o sensoriamento remoto pode auxiliar o monitoramento da qualidade da água, por meio do uso de imagens de satélites. O presente trabalho se destina a avaliar a viabilidade do monitoramento da dinâmica espaço-temporal da clorofila-a nos reservatórios de água inseridos no semiárido piauiense por meio da utilização do sensoriamento remoto. Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: 1) Investigar de que modo a produção científica mundial tem retratado a temática. 2) Caracterizar os aspectos naturais e a interação da população local com os reservatórios. 3) Avaliar modelos de algoritmos de sensoriamento remoto já existentes na literatura, aplicando-os na área de estudo. 4) Desenvolver um algoritmo baseado em amostras *in situ* e no sensoriamento remoto para região estudada; 5) Informar os impactos que a eutrofização causa na qualidade d'água. Os resultados possibilitaram o conhecimento de como a temática é, mundialmente discutida. As informações apresentadas, permitiram reconhecer, que a seca, fenômeno recorrente no semiárido piauiense e as condições ambientais locais, diminuem a capacidade volumétrica dos reservatórios, e, conseqüentemente, intensificam o processo de eutrofização. Além disso, foi possível verificar que a dinâmica temporal de atributos limnológicos tem influência direta na qualidade da água. De acordo com as amostragens *in situ*, constatou-se que os reservatórios têm grande quantidade de clorofila-a. Tal percepção foi confirmada por meio dos algoritmos de estimativas de clorofila-a elaborados usando-se imagens de sensoriamento remoto. As imagens do satélite Sentinel-2 foram eficientes na espacialização dos resultados. Constatou-se o caráter sazonal do processo de eutrofização.

**Palavras-chave:** Clorofila-a. Eutrofização. Qualidade da Água. Sensoriamento Remoto. Semiárido.



## ABSTRACT

A água é bem essencial para a existência da vida no planeta. A região do semiárido do nordeste brasileiro, área que mais sofre com a escassez de água, tem utilizado a construção de açudes, barragens e reservatórios como forma de conviver com a seca que assola a região. Nesse tipo de estrutura hídrica é comum a afloração de algas, resultado do processo de eutrofização. Ambientes, altamente eutrofizados, têm seu uso inviabilizado. A clorofila-a é o principal componente na identificação do processo de eutrofização. Sua determinação é feita por metodologias tradicionais, que necessitam de coletas in situ em vários pontos amostrais. Esse processo é lento, caro e muitas vezes inviável de ser praticado em larga escala. Nessa conjuntura, o sensoriamento remoto pode auxiliar o monitoramento da qualidade da água, por meio do uso de imagens de satélites. O presente trabalho se destina a avaliar a viabilidade do monitoramento da dinâmica espaço-temporal da clorofila-a nos reservatórios de água inseridos no semiárido piauiense por meio da utilização do sensoriamento remoto. Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: 1) Investigar de que modo a produção científica mundial tem retratado a temática. 2) Caracterizar os aspectos naturais e a interação da população local com os reservatórios. 3) Avaliar modelos de algoritmos de sensoriamento remoto já existentes na literatura, aplicando-os na área de estudo. 4) Desenvolver um algoritmo baseado em amostras in situ e no sensoriamento remoto para região estudada; 5) Informar os impactos que a eutrofização causa na qualidade d'água. Os resultados possibilitaram o conhecimento de como a temática é, mundialmente discutida. As informações apresentadas, permitiram reconhecer, que a seca, fenômeno recorrente no semiárido piauiense e as condições ambientais locais, diminuem a capacidade volumétrica dos reservatórios, e, conseqüentemente, intensificam o processo de eutrofização. Além disso, foi possível verificar que a dinâmica temporal de atributos limnológicos tem influência direta na qualidade da água. De acordo com as amostragens in situ, constatou-se que os reservatórios têm grande quantidade de clorofila-a. Tal percepção foi confirmada por meio dos algoritmos de estimativas de clorofila-a elaborados usando-se imagens de sensoriamento remoto. As imagens do satélite Sentinel-2 foram eficientes na espacialização dos resultados. Constatou-se o caráter sazonal do processo de eutrofização.

**Keywords:** Water Quality. Chlorophyll-A. Eutrophication. Remote sensing. Semiárido.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro .....	28
Figura 2 – Distribuição dos reservatórios de água no estado do Piauí .....	32
Figura 3 – Linha do Tempo: Base Legal .....	35
Figura 4 – Instrumentos da PNRH priorizados pelos órgãos gestores das CBHs .....	39
Figura 5 – Correlação das variáveis usadas no IQA.....	43
Figura 6 – Pontos de monitoramento de qualidade das águas da Rede Hidrometeorológica Nacional em 2004.....	46
Figura 7 – Quantidade de trabalhos publicados entre 2015 e 2019.....	49
Figura 8 – Etapas metodológicas para determinação da clorofila.....	54
Figura 9 – Coleta de dados da superfície terrestre a partir do sensoriamento remoto.....	57
Figura 10 – Espectro eletromagnético .....	58
Figura 11 – Curvas espectrais dos principais elementos terrestres .....	59
Figura 12 – Delimitação da Área em Estudo.....	66
Figura 13 – Reservatórios d’água estudados .....	67
Figura 14 – Etapas da obtenção da CHL-a pelo sensoriamento remoto.....	69
Figura 15 – Etapas do estudo bibliométrico .....	87
Figura 16 – Distribuição anual da quantidade de trabalhos.....	89
Figura 17 – Quantidade de trabalhos por países que publicaram durante o período pesquisado .....	90
Figura 18 – Idiomas mais utilizados nos trabalhos analisados .....	91
Figura 19 – Áreas de pesquisa na qual os trabalhos foram enquadrados .....	92
Figura 20 – Relação de autores e rede de co-autoria.....	93
Figura 21 – Relação de citações .....	94
Figura 22 – Incidência de repetição das keywords.....	95
Figura 23 – Relação entre as keywords .....	96
Figura 24 – Localização dos reservatórios estudados .....	103
Figura 25 – Afluentes dos reservatórios de água do Piauí .....	104
Figura 26 – Localização dos pontos amostrais .....	105
Figura 27 – Monitoramento da seca nos municípios estudados .....	110
Figura 28 – Valores médios do pH nos reservatórios estudados.....	112
Figura 29 – Valores da condutividade nos reservatórios estudados.....	112
Figura 30 – Valores dos sólidos totais dos reservatórios estudados.....	113

Figura 31 – Valores de turbidez para os reservatórios analisados.....	114
Figura 32 – Valores de clorofila-a para os reservatórios estudados.....	115
Figura 33 – Correlação entre as variáveis estudadas e as condições climáticas locais .....	116
Figura 34 – Localização da área de estudo.....	124
Figura 35 – Temperatura e precipitação média em Padre Marcos .....	125
Figura 36 – Localização dos pontos amostrais.....	126
Figura 37 – Etapas metodológicas do sensoriamento remoto .....	129
Figura 38 – Volume útil da barragem do Estreito durante o ano de 2019.....	130
Figura 39 – Comportamento dos algoritmos na barragem do Estreito.....	131
Figura 40 – Gráfico comparativo entre os valores estimados pelos algoritmos e a concentração de CHL-a amostrada in situ .....	132
Figura 41 – Boxplot da concentração de CHL-a .....	134
Figura 42 – Variação temporal do TSI na barragem do Estreito.....	136
Figura 43 – Etapas metodológicas para a construção da pesquisa .....	145
Figura 44 – Localização da área de estudo.....	146
Figura 45 – Gráfico com as concentrações médias de CHL-a medidas in situ .....	151
Figura 46 – Distribuição da série espaço-temporal da CHL-a .....	152
Figura 47 – Modelos de regressão linear.....	154
Figura 48 – Série espaço-temporal da CHL-a no reservatório Barreiras .....	156
Figura 49 – Série temporal do reservatório Barreiras: sazonalidade, tendência e ruídos.....	157
Figura 50 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no reservatório Bocaina .....	158
Figura 51 – Distribuição temporal da CHL-a no reservatório Bocaina.....	159
Figura 52 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no Reservatório do Estreito.....	161
Figura 53 – Distribuição temporal da CHL-a da barragem do Estreito.....	162
Figura 54 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no reservatório Piaus.....	163
Figura 55 – Série temporal de CHL-a no reservatório Piaus.....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de municípios do semiárido conforme delimitação da SUDENE 2017. .....	29
Tabela 2 – Resoluções que alteram o texto da resolução Conama n° 357 de 2005. ....	39
Tabela 3 – Número de pontos de monitoramento existentes nas Unidades da Federação até 2010 .....	47
Tabela 4 – Resoluções das bandas espectrais do satélite Landsat 8.....	63
Tabela 5 – Resoluções das bandas espectrais do satélite Sentinel-2.....	64
Tabela 6 – Resultados dos termos pesquisados na base de dados Web of Science.....	88
Tabela 7 – Refinamento dos termos pesquisados.....	88
Tabela 8 – Capacidade volumétrica dos reservatórios e população atendida por município .	104
Tabela 9 – Parâmetros analisados e metodologia adotada no estudo .....	106
Tabela 10 – Categorias de classificação de severidade da seca .....	107
Tabela 11 – Levantamento das características climáticas dos municípios estudados .....	109
Tabela 12 – Especificações dos algoritmos analisados .....	128
Tabela 13 – Medidas de acurácia dos modelos de estimativa da concentração de clorofila-a .....	133
Tabela 14 – Histórico das coletas: data, reservatório e quantidade de pontos .....	147
Tabela 15 – Relações entre bandas espectrais utilizadas no estudo .....	149
Tabela 16 – Análise estatística do conjunto de dados. ....	153

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ASAR	Radar Avançado de Abertura Sintética
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CERH	Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHL-A	Clorofila-A
CMMD	Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento das Nações Unidas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de Oxigênio
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESA	Agência Espacial Européia
HCl	Ácido clorídrico
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEPI	Instituto de Desenvolvimento do Piauí
IET	Índice de Estado Trófico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQA	Índice de Qualidade da Água
IQAR	Índice de Qualidade de Água em Reservatórios
MERIS	Imagens Espectrofotométricas de Média Resolução
MSI	<i>Multispectral Imager</i>
N	Nitrogênio
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NSF	<i>National Sanitation Foundation Institution</i>
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
P	Fósforo
PH	Potencial Hidrogeniônico

PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PT	Fósforo Total
REM	Radiação Eletromagnética
SNAP	<i>Sentinel Application Platafform</i>
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNISB	Sistema Nacional de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Segurança de Barragens
SR	Sensoriamento Remoto
TOA	Reflectância Ortorretificada na Atmosfera
UFPI	Universidade Federal do Piauí
USGS	<i>United States of Geological Survey</i>
UTM	<i>Sistema Universal Transverso de Mercator</i>
ZN	Zinco

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	22
2.1	Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável.....	22
2.2	O semiárido e a convivência com a seca .....	27
2.3	Base legal – principais legislações aplicadas aos recursos hídricos .....	34
2.4	Qualidade da água e a eutrofização .....	40
2.5	Clorofila-A.....	50
2.6	Metodologia aplicada a obtenção da Clorofila-A .....	52
2.7	Sensoriamento remoto .....	56
2.7.1	Sensoriamento remoto e qualidade da água.....	60
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	65
4	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	70
5	<b>ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA INTERNACIONAL SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA E O SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	84
5.1	Introdução .....	85
5.2	Metodologia .....	86
5.3	Desenvolvimento .....	87
5.4	Considerações finais .....	96
5.5	Referências .....	97
6	<b>ANÁLISE DE ATRIBUTOS LIMNOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO</b> .....	100
6.1	Introdução .....	101
6.2	Metodologia .....	102
6.2.1	Área de estudo .....	102
6.2.2	Atributos limnológicos .....	105
6.2.3	Ocorrências de secas.....	107
6.3	Resultados e discussão.....	107
6.3.1	Monitoramento da seca na região .....	109
6.3.2	Análise dos atributos limnológicos de qualidade da água dos reservatórios.....	111
6.3.3	Correlação entre os atributos limnológicos .....	115
6.4	Conclusões.....	117
6.5	Referências .....	117
7	<b>VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A EM UM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO</b>	

7.1	Introdução .....	122
7.2	Metodologia .....	124
7.2.1	Área de estudo .....	124
7.2.2	Medição da clorofila-a in situ .....	126
7.2.3	Imagens de satélite.....	127
7.3	Resultados e discussão.....	129
7.4	Conclusões .....	137
7.5	Referências .....	137
8	<b>MONITORING WATER QUALITY IN RESERVOIRS IN THE SEMI-ARID REGION OF PIAUÍ: A REMOTE SENSING APPROACH.....</b>	<b>141</b>
8.1	Introdução .....	142
8.2	Material e métodos .....	144
8.2.1	Área de estudo .....	145
8.2.2	Concentração de clorofila-a in situ .....	146
8.2.3	Aquisição e processo das imagens de satélite.....	148
8.2.4	Modelos de regressão linear para estimativa de CHL-a .....	148
8.2.5	Séries temporais .....	150
8.3	Resultados e discussão.....	150
8.4	Considerações finais .....	165
8.5	Referências .....	166
9	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>170</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A água é elemento essencial à vida e direito fundamental do homem. Ela requer uma atenção especial por se tratar de um recurso limitado (FAYER et al., 2018; MACHADO, 2003). A sua quantidade e qualidade são primordiais para a manutenção da qualidade de vida no planeta (TUNDISI, 2008).

Na região Nordeste do Brasil, a deficiência hídrica de algumas áreas que historicamente sofrem com a falta de água é resultado de condições naturais, inerentes ao semiárido, como, por exemplo a distribuição hidrológica irregular, contudo, também é fruto de uma gestão ineficiente dos recursos hídricos (TUNDISI, 2003; 2008). O panorama dos recursos hídricos tem ampliado medidas governamentais e sociais em todo o mundo. Tais medidas que visam assegurar que as necessidades básicas da população no que tange o uso das águas, sobretudo água doce, tenham continuidade, garantindo para a população a manutenção da qualidade de vida (MACHADO, 2003). Nesse sentido, Palmer, Kutser e Hunter (2015) destacam que, para os estudiosos e formuladores de políticas públicas, é indispensável entender, acompanhar e monitorar os recursos hídricos.

O Nordeste é a região geográfica brasileira que mais sofre com a constante escassez de água. Nesse sentido, a descontinuidade dos cursos d'água produzem problemas sociais e econômicos para a população local, em especial nas cidades localizadas no semiárido (MARENGO et al., 2018). O semiárido tem como principais características a grande variação climática, cursos d'água temporários, distribuição desproporcional de chuvas no tempo e espaço, sendo que a combinação desse conjunto de características tem efeito na escassez hídrica nessa região (BRASIL, 2005a; GARJULLI, 2003).

No estado do Piauí, o semiárido representa 83% do território do estado, possuindo como singularidades uma estação chuvosa de curta duração, com duradouro período seco, elevadas temperaturas, baixa fertilidade dos solos e disponibilidade hídrica caracterizada por cursos d'água intermitentes que fazem parte das sub-bacias hidrográficas do Canindé, Poti e Gurguéia (PIAUI, 2018).

A água para a população dessa região é a principal forma de subsistência, pois permite a prática da agricultura, pecuária, piscicultura, dentre outras atividades econômicas, tornando a água ponto chave para o desenvolvimento da região. Devido às dificuldades econômicas e sociais ocasionadas pela ausência de água nessa região, foram implantadas diversas obras de infraestrutura hídrica, dentre essas obras, a construção de açudes (barragens) com o propósito de levar água em quantidade e com qualidade para a subsistência humana e demais usos

produtivos. Tais obras ganharam destaque como solução alternativa para a convivência da população com os efeitos do semiárido, minimizando os efeitos derivados da escassez de água nessas localidades (BEZERRA et al., 2009; GARJULLI, 2003).

Yang et al. (2008) relataram que os lagos, reservatórios, estuários e rios têm sofrido com a crescente eutrofização de suas águas. Esta constatação é consequência da ampliação da diversificação do uso da água, o que originou impactos sobre a sua qualidade (TUNDISI, 2003). Dessa forma, eutrofização se tornou problema ambiental mundial (YANG et al., 2008), cada vez mais recorrente, podendo se manifestar de forma natural ou artificialmente (ESTEVES, 1998; LAMPARELLI, 2004; LOPES et al., 2016). Neste sentido, a eutrofização passa a ser um entrave ao desenvolvimento das sociedades, que em decorrência do crescimento populacional, urbanização desenfreada e pela falta de saneamento básico transfigura a todo instante os parâmetros limnológicos dos recursos hídricos (FIGUEIRÊDO et al., 2006).

No Brasil, a eutrofização também tem se manifestado em vários corpos hídricos. Por isso, Trindade e Mendonça (2014) alertam para a importância de conhecer esse fenômeno afim de se desenvolver medidas para a prevenção e para o restabelecimento da qualidade da água eutrofizada. A consequente perda de utilidade dos recursos hídricos eutrofizados é um receito mundial (CICERELLI; GALO, 2015). Este motivo, fez com que Vilela (2010) ressaltasse a importância do monitoramento da qualidade d'água para o conhecimento da dinâmica dos meios aquáticos. Somente com o monitoramento, é exequível a identificação de situações-problemas iminentes, possibilitando criar planos de ações prioritários e projetos para o gerenciamento da qualidade d'água (MACHADO; BAPTISTA, 2016).

Diante da efetiva necessidade de monitoramento da qualidade dos recursos hídricos, são usados parâmetros físicos, químicos e biológicos para averiguar se os corpos hídricos estão com qualidade adequada para os seus usos pré-estabelecidos. Por constituir uma das formas mais eficazes de avaliar a eutrofização dentro de ambientes aquáticos, os indicadores biológicos, como a Clorofila-A (CHL-a), têm sido destaque na avaliação, monitoramento da eutrofização nos corpos hídricos, estando em trabalhos recentes, desenvolvidos por diversos autores (BODDULA et al., 2017; CICERELLI; GALO, 2015; GRENDALTE et al., 2018; KUBIAK; KOTLARZ; MAZUR, 2016; LOPES et al., 2016; MACHADO; BAPTISTA, 2016; MINHONI et al., 2018; RODRIGUES et al., 2015; WANG; GONG; PU, 2018; WATANABE et al., 2016; WATANABE et al., 2018).

A metodologia tradicional utilizada para o monitoramento da qualidade da água por meio da CHL-a, é executada por meio de amostragem *in situ*, seguida de análises laboratoriais. Essa forma de avaliar a qualidade da água requer maior tempo para execução, mão de obra

qualificada, equipamentos caros (ZHANG et al., 2016) e é limitada a dados locais (LIMA et al., 2019). Palmer, Kutser e Hunter (2015) acrescentam que o monitoramento realizado de forma convencional, isto é, com coletas *in situ*, é bastante limitado tendo em vista o tamanho e a espacialização dos reservatórios, não tornando possível a realização de um monitoramento adequado com uma cobertura espacial e uma frequência temporal bem definida.

Devido as dificuldades na realização do monitoramento, o sensoriamento remoto passou a ser utilizado como ferramenta auxiliar no monitoramento da qualidade da água (CHEN et al., 2019; FERREIRA et al., 2017; FRASQUET et al., 2019; GONÇALVES; FERNANDES, 2017; GRENDALTE et al., 2018; PAGE et al., 2017; TOMING et al., 2016). A capacidade do sensoriamento remoto em fornecer dados e informações de forma sinóptica e frequente o torna um recurso valioso no mapeamento da distribuição espacial de componentes presentes nos corpos aquáticos (GALO et al., 2002).

Carvalho, Barbosa e Novo (2013) explicam que o uso de imagens de satélites para aferir os parâmetros de qualidade da água possibilita estimar o grau de eutrofização dos ambientes aquáticos alicerçado em variáveis físicas, que podem ser utilizadas como *prox* na obtenção da concentração de CHL-a.

A carência de acompanhamento desses dispositivos hídricos ocorre, principalmente, em função do fator econômico, ou seja, da falta de recursos financeiros para o controle *in loco*. Assim, emergiu a necessidade de identificar por meio do sensoriamento remoto a situação da qualidade da água dos reservatórios localizados no semiárido piauiense.

Dessa maneira, tem-se como hipótese norteadora desse trabalho: algoritmos derivados do sensoriamento remoto são eficazes para a coleta de informações, que permitam estabelecer os padrões de concentração de Clorofila-A nos reservatórios do semiárido piauiense, auxiliando no monitoramento, quantificação e avaliação da qualidade d'água destes reservatórios.

Nessa perspectiva, o estudo tem como questão central a eficácia do sensoriamento remoto para o monitoramento da dinâmica espaço-temporal da concentração de CHL-a dos reservatórios distribuídos espacialmente no semiárido piauiense, visto que, os órgãos públicos responsáveis pelas fiscalizações e manutenções da qualidade da água, não têm equipe técnica suficiente e nem recursos financeiros para aferir a qualidade da água dos reservatórios distribuídos no Piauí.

O sensoriamento remoto é frequentemente utilizado para o monitoramento da água por meio de estimativas de concentração da CHL-a, estando presente em muitos trabalhos recentes de âmbito internacional (CHENG et al., 2019; LI et al., 2018; MISHRA; MISHRA, 2012; PATRA et al., 2016). No cenário nacional, autores como Carvalho, Barbosa e Novo (2013),

Lopes et al. (2016), Machado e Batista (2016), Silva, Coelho e Silva (2017), Minhoni et al. (2018), também utilizaram esse campo da ciência para aferir a quantidade de CHL-a nos mais variados corpos d'água.

Nesta pesquisa, foi avaliada a viabilidade do monitoramento da dinâmica espaço-temporal da CHL-a nos reservatórios de água inseridos no semiárido piauiense por meio da utilização do sensoriamento remoto. Para melhor entendimento da problemática aqui retratada, é necessário o conhecimento de algumas particularidades da região do semiárido piauiense, dos processos intrínsecos na implantação dos reservatórios de água, as diversas formas de utilização d'água e como ela influencia no desenvolvimento da região, além de entender como o processo de eutrofização reflete na dinâmica da CHL-a, influenciando na qualidade da água e na vida da população local.

O interesse em desenvolver essa pesquisa se manifestou em função da importância que a água tem para o desenvolvimento das atividades cotidianas. Ausência de informações e a falta de um sistema de monitoramento da qualidade das águas nos reservatórios do Piauí, também são motivos de preocupação. Esta preocupação já despontou em outros estados brasileiros, com destaque para o estado do Paraná, que desenvolveu o Índice de Qualidade de Água em Reservatórios (IQAR) para analisar a qualidade da água de seus reservatórios (ANA, s.d).

O teste da hipótese desse trabalho partiu de duas grandes vertentes. A primeira é a identificação e verificação de alguns parâmetros de qualidade da água como: potencial hidrogeniônico (PH), turbidez, sólidos totais, condutividade e CHL-a, a partir de coletas amostrais feitas *in situ*, trimestralmente. Já a segunda vertente, se refere a caracterização da dinâmica espaço-temporal da concentração da CHL-a em cada reservatório estudado, por meio da aplicação de algoritmos derivados do sensoriamento remoto orbital.

Assim, o objetivo geral da pesquisa é analisar, a partir de modelos de estimativa obtidos por meio do sensoriamento remoto orbital, os padrões de concentração de CHL-a nos reservatórios de água implantados na região semiárida piauiense, contemplando o horizonte temporal entre os anos de 2017 a 2019.

Para alcançar o objetivo geral da pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: 1) investigar de que modo a produção científica mundial tem retratado a utilização do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água, especialmente, o que tange o processo de eutrofização dos recursos hídricos. 2) caracterizar os aspectos naturais e a interação da população local com os reservatórios estudados para definir assim, o uso preponderante de cada reservatório, visando a análise dos parâmetros coletados *in situ* com base na normatização nº 357/2005 do Conama; 3) avaliar modelos de algoritmos de

sensoriamento remoto já existentes na literatura, verificando sua aplicabilidade para a estimativa da concentração de CHL-a em um reservatório localizado no semiárido piauiense; 4) desenvolver um algoritmo baseado em amostras *in situ* e no sensoriamento remoto que represente as peculiaridades dos reservatórios estudados; 5) informar os impactos que a eutrofização pode causar na qualidade d'água e como isso é capaz de influenciar no dia-a-dia da população.

Por fim, este documento encontra-se estruturado em seis seções I) Introdução; II) Fundamentação Teórica; III) Metodologia; IV) Referências; V) Capítulo I; VI) Capítulo II; VII) Capítulo III; VIII) Capítulo IV e IX) Considerações Finais. Na seção II, referente a fundamentação teórica, apresentam-se temáticas que corroboram para o entendimento do caráter essencial dos recursos hídricos para o desenvolvimento da sociedade, buscando aliá-lo a necessidade do desenvolvimento sustentável, uma vez que, desenvolver sustentavelmente é a base para boa relação da população do semiárido com a seca que assola essa região. Também é de suma importância entender os mecanismos legais que regulamentam os recursos hídricos, fazendo um histórico das leis mais marcantes, para então compreender, como a qualidade da água ganhou papel de destaque na sociedade, a partir dos recorrentes processos de eutrofização dos corpos hídricos, especialmente em reservatórios.

Mediante o exposto, serão apresentadas as principais abordagens utilizadas para coleta, extração e análise desse parâmetro, utilizando-se de metodologias tradicionais, e por fim, será exposto um histórico do sensoriamento remoto do seu surgimento até as primeiras utilizações no Brasil, conceituando-o e destacando as suas principais características quanto ao processo de coleta das informações, resolução dos sensores orbitais, algoritmos usados para estimar a concentração de CHL-a, principais missões espaciais que oferecem uma gama de informações de forma gratuita mostrando como elas podem ser utilizadas no monitoramento da qualidade da água de reservatórios.

Na seção III, da metodologia, são expostos os meios e mecanismos que foram utilizados para a coleta de informações para a referida pesquisa, além de mostrar a área de estudo contemplada. A seção IV, constarão todas as referências que deram suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa. A seção V é referente ao primeiro artigo, que foi intitulado: **Análise bibliométrica da produção científica internacional sobre a qualidade da água e o sensoriamento remoto**, a seção VI trata do segundo artigo: **Análise de atributos limnológicos dos reservatórios do semiárido**, enquanto, a seção VII contempla, o terceiro artigo: **Algoritmos de determinação da concentração de Clorofila-A em reservatórios do semiárido**. Já, a seção VIII, contempla o artigo: **Monitoramento da qualidade da água em**

**reservatórios do semiárido: uma abordagem por sensoriamento remoto.** As considerações finais do trabalho estão evidenciadas na seção IX.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável

A relação entre sociedade e meio ambiente vem se tornando cada vez mais profunda tanto nas abordagens das políticas públicas quanto na disseminação do conhecimento no meio científico. Entender o ser humano como principal agente no processo de modificação do meio ambiente é fundamental para o estabelecimento de uma relação harmônica na interação homem-meio ambiente.

Victorino (2007) relata que de todo o volume total de água disponível no mundo 97,4% sejam de águas salgadas, o restante desse percentual corresponde a água doce ideal para o consumo humano. Essa pequena quantidade de água doce disponível para o uso encontra-se em constante processo de degradação impulsionado principalmente pela expansão populacional, industrial e tecnológica, com reflexos na percepção social e econômica dada a esse recurso natural (MACHADO, 2003).

A associação da água com o desenvolvimento está intrinsecamente relacionada com o valor de uso que esse recurso limitado tem, uma vez que ele é de fundamental importância para a subsistência de todos os organismos vivos no planeta, o que lhe agrega valor econômico cada vez maior (MACHADO; TUNDISI, 2003). Além disso, a escassez desse recurso gera instabilidade nas produções, no abastecimento, saneamento básico e na saúde pública, resultando em reflexos na vulnerabilidade do crescimento sustentável e no desequilíbrio social (TUNDISI et al., 2014).

O termo “desenvolvimento” é repleto de fundamentos, tornando-se muito utilizado na literatura e no senso comum. Sua amplitude gera inúmeras reflexões, ora convergentes, ora divergentes, não existindo uma definição sólida e consistente para o termo desenvolvimento, embora ele seja multidisciplinar, empregado em diversas áreas e contextos (RIBEIRO, 1992).

Favareto (2006) destaca que as definições de desenvolvimento flutuam por correntes distintas, onde cada uma dessas correntes buscam explicar a sua definição com base na sua ótica, dentro do processo de evolução se mancomunando com a área de abrangência. Para Brandão (2007), o desenvolvimento na sua essência, denota um estado de tensão, ou seja, o processo está em constante modificação. Por isso, Ribeiro (1992) descreve o desenvolvimento como um processo muito abrangente tanto do ponto de vista da comunidade em geral como da comunidade científica, sendo de grande importância no processo de organização de uma sociedade por meio das relações sociais, econômicas e políticas.

Algumas vertentes principais ou mais usuais para desenvolvimento são enumeradas por Favareto (2006): a primeira ligada as ciências econômicas (PASTORE, 1967; VEIGA, 2005), a segunda vinculando o termo desenvolvimento a um pensamento ideológico (FURTADO, 1974), a terceira na qual são defendidas que não existe praticidade no entendimento do que possa ser desenvolvimento (DALY, 2004) e por fim um conceito de desenvolvimento sustentável (SACHS, 2009).

Veiga (2005) explana que até a década de 70, o desenvolvimento era apontado como resultado do progresso material, se resumindo a sinônimo de crescimento econômico. Silva, Nelson e Silva (2018) veem esse modelo de desenvolvimento essencialmente pautado no consumismo com a acumulação de bens e grandes percentuais de crescimento econômico. Furtado (1974) foi enfático ao dizer que esse tipo de desenvolvimento econômico universalizado é um mito, ou seja, uma conjuntura de hipóteses, que não pode ser colocada em prática, pois se o desenvolvimento econômico chegasse a ser real e igualitário, os recursos não renováveis e a poluição decorrente desse desenvolvimento chegariam a um patamar elevado que causaria colapso no sistema econômico praticado.

Uma importante reflexão é feita por Daly (2004) ao afirmar que se uma sociedade conseguisse atingir os patamares ideais de crescimento seria impossível de mantê-los constantes, desse modo a população obteve a consciência que o crescimento econômico deveria ser limitado, emergindo o conceito de desenvolvimento sustentável, produto da insustentabilidade do crescimento. Assim, com a transformação dos tempos e os processos construídos pela globalização, a sociedade se volta para uma questão urgente: a do meio ambiente (FERREIRA, 2010).

A crescente consciência ambiental da sociedade sobre a preservação ambiental (DALY, 2004) e como ela afeta na manutenção da qualidade de vida (LACERDA; CANDIDO, 2013) foram fatores que contribuíram para a propagação do desenvolvimento sustentável, caracterizado pelo uso racional e de forma sustentável da natureza, beneficiando a população, porém se preocupando com a conservação da biodiversidade para que fosse possível um desenvolvimento da sociedade aliada ao crescimento econômico.

Conforme a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento das Nações Unidas (CMMD), o desenvolvimento sustentável pode ser definido como aquele que busca subsidiar as necessidades atuais sem que haja o comprometimento dos recursos naturais para as gerações futuras. Nesse sentido, para a sociedade conseguir se desenvolver sustentavelmente deve haver um controle do crescimento populacional e a realização da redistribuição de riquezas, havendo assim um desenvolvimento sem crescimento.



Complementando esse pensamento Sachs (2009), Lacerda e Cândido (2013) são enfáticos ao afirmarem que o desenvolvimento sustentável é um imenso desafio, pois para alcançá-lo, seriam necessárias mudanças no estilo de vida e um melhoramento nos processos tecnológicos.

As sociedades sempre tiveram no seu cerne uma constante preocupação com o desenvolvimento. Sob diferentes perspectivas, o desenvolvimento sempre constituiu anseio das sociedades por representar a prosperidade, configurando forma de alcançar melhores condições de vida (SILVA, 2006). Assim, o debate entre crescimento econômico, desenvolvimento e meio ambiente fez a sociedade começar a refletir sobre a necessidade de definir qual o tipo de desenvolvimento é o ideal (VEIGA, 2005).

A questão ambiental é de extrema relevância no debate sobre os rumos que o desenvolvimento deve tomar. O homem como principal agente modificador dos espaços é o responsável pelas alterações desencadeadas durante os processos de territorialização, sendo o principal ator na degradação do meio ambiente (YOUNG, 2003). O modelo de desenvolvimento pautado no crescimento econômico contribuiu para o aumento das desigualdades sociais e por consequência ampliação da degradação ambiental, ameaçando a subsistência das gerações atuais e futuras (SILVA, 2008).

Nesse panorama, Silva (2008) mostra que o semiárido foi, historicamente, marcado pelas contradições do desenvolvimento, questão complexa na região, definida pelos baixos indicadores sociais e pela inércia e morosidade do crescimento econômico. Por esses aspectos, Araújo (2011) é categórico ao declarar que a convivência no semiárido é uma tarefa árdua e exaustiva, por todas as características limitantes que essa região tem. Galindo (2008) relata que “conviver com o semiárido significa viver, produzir e desenvolver-se, não dentro de uma mentalidade que valoriza e promove a concentração de bens, mas sim enfatiza a partilha, a justiça e a equidade, querendo bem à natureza e cuidando de sua conservação”. Desta forma, a gravidade dos dilemas ambientais, econômicos e sociais do semiárido, incita à adoção de um desenvolvimento apropriado para região, levando em consideração todas as suas particularidades (SILVA, 2008).

Entender o desenvolvimento sustentável como resultado das ações humanas dentro de um território é a chave para compreender a tríplice relação entre o natural, o construído e o homem, para que a partir dessa percepção sejam criadas situações propícias para a harmonização da relação homem, espaço e natureza, de modo a garantir a sustentabilidade (FLORES; MEDEIROS, 2013).

Novos desafios são impostos à sociedade, no sentido de ampliar os mecanismos em prol do desenvolvimento sustentável (SILVA, 2008). A sustentabilidade está intimamente ligada ao

ecodesenvolvimento partindo do princípio que este é visto como sinônimo de desenvolvimento sustentável, abrangendo dois pilares básicos: a herança e o equilíbrio.

A ideia de sustentabilidade passa por uma série de conceitos, dependendo da sua abrangência dentro de um território. O termo sustentabilidade tem sido utilizado conforme interesses de alguns. Assim a delimitação do que é sustentabilidade torna-se frágil, tendo em vista multiplicidade de definições (FLORES; MEDEIROS, 2013). Sartori, Latrônico e Campos (2014) esclarecem que a sustentabilidade é um processo complexo e contínuo, formado ao longo de processos históricos, com diferentes abordagens que envolveram o diálogo entre os sistemas dinâmicos da natureza. A sustentabilidade ambiental aliada a qualidade de vida da população é o objetivo que deve ser alcançado a partir do resgate das relações de convivência entre os seres humanos e a natureza (SILVA, 2008).

Dimensionar a sustentabilidade só será possível se houver uma compreensão das etapas envolvidas do processo que a englobam, dentro de um limite bem definido, ou seja, dentro de um território, levando em consideração as características desse território. Além disso, ela deve ter a capacidade de resistir a mudanças endógenas e exógenas dadas as ações humanas temporais e espaciais. O território deve ser considerado produto de um sistema mutável, formado por arranjos de elementos físicos, econômicos e sociopolíticos que sofrem influência de fatores externos às suas fronteiras (VITTE; KEINERT, 2009). A sustentabilidade hídrica de uma área é diretamente relacionada às condições de qualidade, quantidade de água e a capacidade de suporte que esses recursos podem assegurar a execução das atividades humanas em geral. Tais características proporcionam o surgimento de novas territorialidades através da gênese da reorganização de espaços (FLORES; MEDEIROS, 2013).

O desenvolvimento como sinônimo de crescimento econômico ocasiona grandes consequências para os ecossistemas aquáticos por meio das ações antrópicas. Tundisi (2003) afirma que o desenvolvimento econômico de uma sociedade sempre esteve interligado com a disponibilidade de recursos hídricos. Para Machado (2003), o aumento populacional e o desenvolvimento industrial e tecnológico são fatores que comprometem e colocam em risco as fontes de água doce, que ainda estão disponíveis para uso. Tendo em vista as problemáticas ambientais e sobretudo em face a globalização do Brasil, a legislação nº 357 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente apresenta em seu texto a água como elemento parte do desenvolvimento sustentável, retratando-a como elemento de extrema importância para o equilíbrio ecológico aquático, saúde e bem-estar humano e animal.

Em 2015, representantes e líderes de países se reuniram para estabelecer objetivos em prol do desenvolvimento sustentável mundial. Durante esse encontro ficou estabelecida uma

agenda contendo um plano de ações com 17 objetivos e 169 metas que começaram a vigorar a partir de 2016 e devem ser implementadas até o ano de 2030 em busca do desenvolvimento sustentável.

Nos 17 objetivos estipulados para a agenda 2030, a temática da água não poderia deixar de ser contemplada, o seu caráter imprescindível para a manutenção da vida a torna centro de várias discussões e debates no mundo todo. Por isso, Gomes (2012) mostra a importância da água ao destacá-la como o principal recurso natural responsável pela vida na Terra, em decorrência dela ser um recurso natural indispensável para todos os seres vivos, sendo essencial ao homem como parte bioquímica dos seres vivos, como meio de vida, tanto quanto componente representativo de valores sociais e culturais, além de ser um dos fatores preponderantes na economia durante o processo de produção de bens de consumo.

O objetivo para o desenvolvimento sustentável número seis, trata especificamente, da temática da água. Ele tem como enfoque principal “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” (ONU, s.d). Assim, a análise da dinâmica espaço-temporal da concentração de Clorofila-A nos reservatórios do semiárido piauiense, busca contribuir no aporte de informações sobre a qualidade da água que chegam até comunidades abastecidas por esses dispositivos hídricos, analisando como o aumento na concentração da Clorofila-A influi no uso cotidiano da água.

Tundisi et al. (2014) explicam que a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos têm função primordial para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil. Diante do exposto, analisar a situação das águas e as perspectivas para o futuro é de extrema importância, pois com o suporte dessas análises pode-se estabelecer políticas públicas e condições para alcançar o desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável é um conceito que apesar de ser bastante difundido e discutido pela sociedade em geral ainda é difícil de ser praticado. Pensar em desenvolvimento sustentável nada mais é que, pensar em formas de fundir dois grandes anseios modernos: crescimento econômico e meio ambiente. É importante ressaltar que os conceitos de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade são interligados. Para Acosta (2016) o desenvolvimento sustentável é um produto da sustentabilidade. Já Sartori, Latrônico e Campos (2004) o veem como um caminho para a sustentabilidade, sendo este o seu objetivo final, por outro lado Garjulli (2003) afirma que a sustentabilidade é um novo modelo de desenvolvimento sustentável, entretanto, Sachs (2009) vê a consolidação do termo como um “desafio planetário” (SACHS, 2009, p. 58) e Favareto (2006) o considera utopia, um conceito impraticável.

Assim, pensar o mundo de forma consciente, buscando atingir os objetivos da sustentabilidade sob a perspectiva ambiental, é preponderante para que se consiga atingir os objetivos estabelecido em prol do desenvolvimento sustentável, evitando ou até mesmo diminuindo as consequências que o desenvolvimento (crescimento econômico) atinja patamares insustentáveis. Nesse sentido, a sustentabilidade é um anseio que deve fazer parte do cotidiano de toda a humanidade.

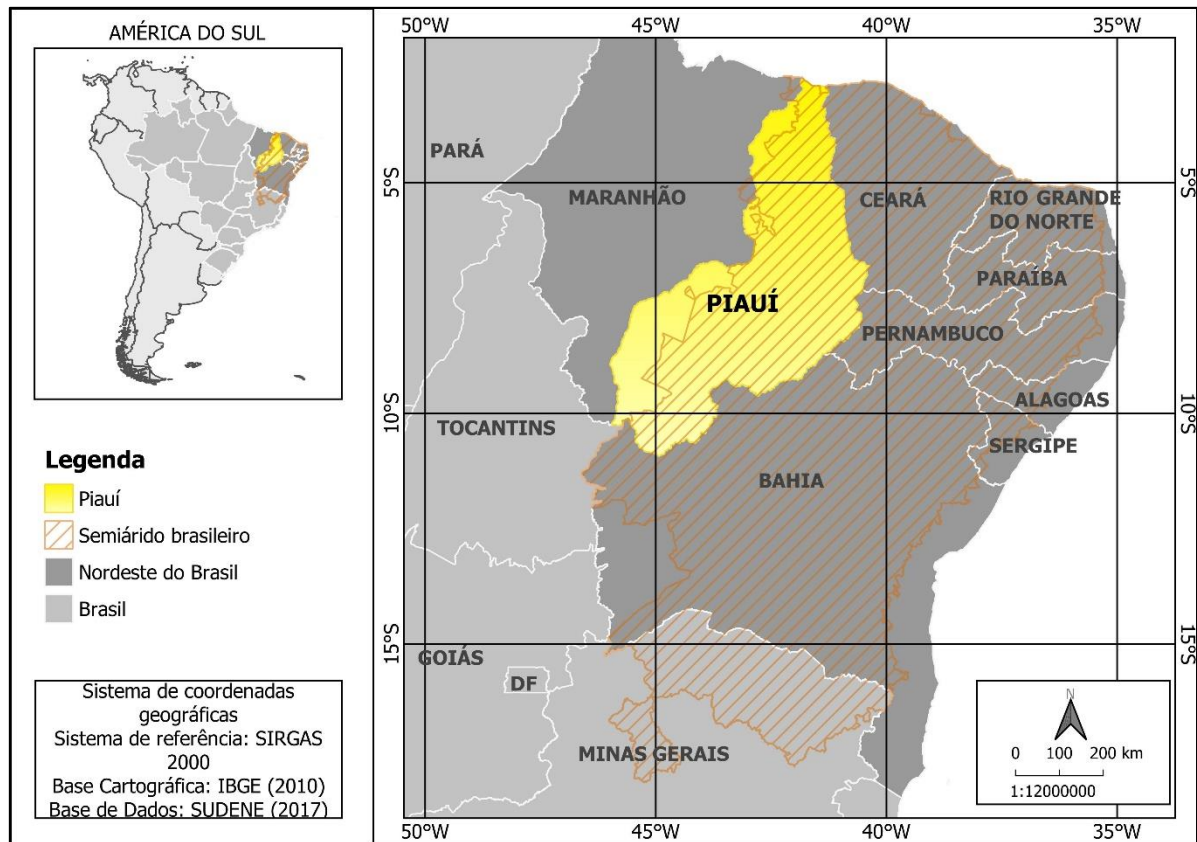
## **2.2 O semiárido e a convivência com a seca**

O território brasileiro tem grande dimensão espacial, aproximadamente 8.511.965 km<sup>2</sup>. Nele está inserido uma das maiores regiões de clima semiárido do mundo (GNADLINGER, 2001), com 982.563,3 km<sup>2</sup> segundo dados do IBGE. Para um município ser integrado ao semiárido são adotados três critérios básicos: precipitação pluviométrica anual média menor ou igual a 800 mm, índice de aridez de no máximo 0,5 e déficit hídrico superior a 60% durante todos os dias do ano (SUDENE, s.d.).

A última atualização dos limites do semiárido no Brasil foi feita pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) em 2017. Com base nessa delimitação, o semiárido passou a abranger, territorialmente, uma área de praticamente um milhão de quilômetros quadrados, correspondendo a 23% do território nacional, 46% da região nordeste. Minas Gerais é o único estado que tem municípios que se compõe o semiárido brasileiro, mas que não fazem parte do nordeste do Brasil.

Os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí, Bahia e Pernambuco têm mais da metade do seu território dentro do semiárido, conforme é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro



Fonte: Elaborado pelos autores

Na Tabela 1, são apresentados o total de municípios de cada estado que compõe o semiárido do nordeste brasileiro, conforme as resoluções n° 107 de julho de 2017 e n° 115 de novembro de 2017 (BRASIL, 2017). Ao todo são 1.262 municípios distribuídos por nove estados da federação. Em números reais, a Bahia (278), Paraíba (194) e o Piauí (185) são os estados com a maior quantidade de municípios inclusos no semiárido.

Tabela 1 – Quantidade de municípios do semiárido conforme delimitação da SUDENE 2017.

<b>Estados</b>	<b>Total de municípios</b>	<b>Quant. de munic. Semiárido</b>	<b>% de Munic. Semiárido</b>
Alagoas	102	38	37%
Bahia	417	278	67%
Ceará	184	175	95%
Espírito Santo	78	-	-
Maranhão	217	2	1%
Minas Gerais	853	91	11%
Paraíba	223	194	87%
Pernambuco	185	123	66%
Piauí	224	185	83%
Rio Grande do Norte	167	147	88%
Sergipe	75	29	39%
<b>Total</b>	<b>2725</b>	<b>1262</b>	<b>46%</b>

Fonte: Adaptado de Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE (2017).

A grande abrangência territorial do semiárido tem reflexos nas suas diferentes características ambientais, ampliando as contradições socioeconômicas e culturais dentro do território brasileiro (FURTADO, 1974). Araújo (2011) cita o clima, como fator determinante na variação dos outros elementos naturais, a ele, estão relacionados outros aspectos: como a vegetação, solos, chuvas e os processos formadores do relevo, revelando um cenário ambiental bastante heterogêneo. Marengo et al. (2018) explicam que essa sazonalidade climática é o motivo pelo qual vários centros climáticos em todo o mundo analisam o clima da região.

Os solos dessa região são considerados quase impermeáveis, pois, devido a sua pouca profundidade, há redução na capacidade de infiltração, tornando-os rasos (ANDRADE et al., 2005). Por exemplo, mesmo após chuvas intensas e concentradas, os solos não conseguem absorver a água superficial (ARAUJO, 2011). As chuvas são escassas, ocorrendo somente no período de quatro meses na maioria dos municípios da região, com distribuição e forma irregular no tempo e espaço, o que proporciona uma média da precipitação anual inferior a 800 mm (IICA, 2006).

A condição árida da região é fruto da quantidade de chuvas e da temperatura. Esta combinação é responsável pela evapotranspiração potencial que tem consequências na perda de

água superficial (SILVA, 2006), elevando o risco de seca a percentual de 60%. Para Vieira (2000), o caráter heterogêneo e complexo da região ampliam ainda mais os problemas hídricos. Por esta razão, o Nordeste é considerado pelo autor uma “região-problema”, que tem ganho constante notoriedade, pela escassez dos recursos naturais e pela variabilidade climática.

Silva (2008) liga à problemática da seca, à problemas sociais, econômicos e ambientais, já Fayer et al. (2018) defendem que é essencial levar em consideração o aspecto geográfico ao abordar a crise hídrica, uma vez que as mudanças climáticas derivadas do aquecimento global, repercutem nos fenômenos naturais, alterando padrões, intensidades e duração da precipitação e das secas (SANTOS; CUNHA; RIBEIRO NETO, 2019). Em um estudo recente, Marengo et al. (2018) destacaram que a partir de 2010, o nordeste do Brasil passou por uma das piores secas já registradas que se prolongou por mais de sete anos consecutivos.

Por efeito das condições críticas que a população do semiárido passa diariamente, houve ampliação nas discussões a respeito da seca, e como a água pode trazer graves consequências para as relações cotidianas (MARENGO, 2008). A intensidade da seca gera problemas em diferentes esferas sociais, regionais e locais, afetando tanto áreas urbanas e rurais em consequência da sua intensidade no Nordeste (MARENGO et al., 2018). A visão do Nordeste como “região-problema” denota o preconceito que a região sofre, principalmente, sob a ótica dos desenvolvimentistas. Nesse sentido, o termo convivência com o semiárido busca justamente criticar este tipo de abordagem, e por meio dele é demonstrado que no Nordeste têm potencialidades, que contribuem para a superação das limitações que o clima impõe a região.

O panorama global dos recursos hídricos congregado com as mudanças climáticas fixa a necessidade dos atores públicos, em conjunto com academia e sociedade, buscarem mecanismos para que a gestão da água torne esse recurso mais igualitário (FAYER et al., 2018). Na opinião de Marengo et al. (2018) a atual seca, promoveu a abertura de novas discussões para o aperfeiçoamento de políticas contra a seca, por se tratar de um problema socioeconômico-ambiental que atinge diferentes níveis de gestão. As áreas rurais do semiárido, são as que mais sofrem com os danos da seca, estando, mais vulneráveis as problemáticas da seca. Conhecer a disposição da água é o ponto de ignição para se alcançar a convivência harmoniosa entre a população e a seca, suscitando medidas que garantam acesso a água para a população executar suas atividades cotidianas.

Em 2018, a população do semiárido era aproximadamente de 24 milhões de habitantes (IBGE, 2018) e dela, mais da metade se concentra na zona rural do Brasil. Em 2010, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), passaram a viver no campo aproximadamente quatro milhões de famílias agricultoras, desse total, dois milhões vivem no

Nordeste, em sua maioria concentradas na região semiárida. A aglutinação da população nesse território é marcada por discrepâncias entre os latifúndios (nas mãos de poucos) e o grande número de minifúndios (SILVA, 2008). Essa discrepância, também é verificada na distribuição da água.

A distribuição da água no mundo é inconstante no tempo e espaço. Em função dessa especificidade, algumas regiões do mundo possuem água em abundância e outras sofrem com escassez desse recurso (CONEJO; COSTA; TEIXEIRA, 2005). O Brasil detém a maior reserva de água doce do Planeta, estimada em 12% do total mundial, talvez em razão desse percentual, Gomes (2012) tenha considerado o Brasil um país único, em relação à sua capacidade hídrica, porém, é sabido que muitas regiões do país, em especial a região do Nordeste, têm dificuldades na disponibilidade de água. Araújo (2011) justifica esse fato, expondo a relação entre evapotranspiração e precipitações. Para o autor, a deficiência hídrica dessa região se deve à relação negativa entre fatores como precipitação e insolação. Além disso, a distribuição não uniforme das chuvas também corrobora para o quadro de deficiência hídrica (GOMES, 2012).

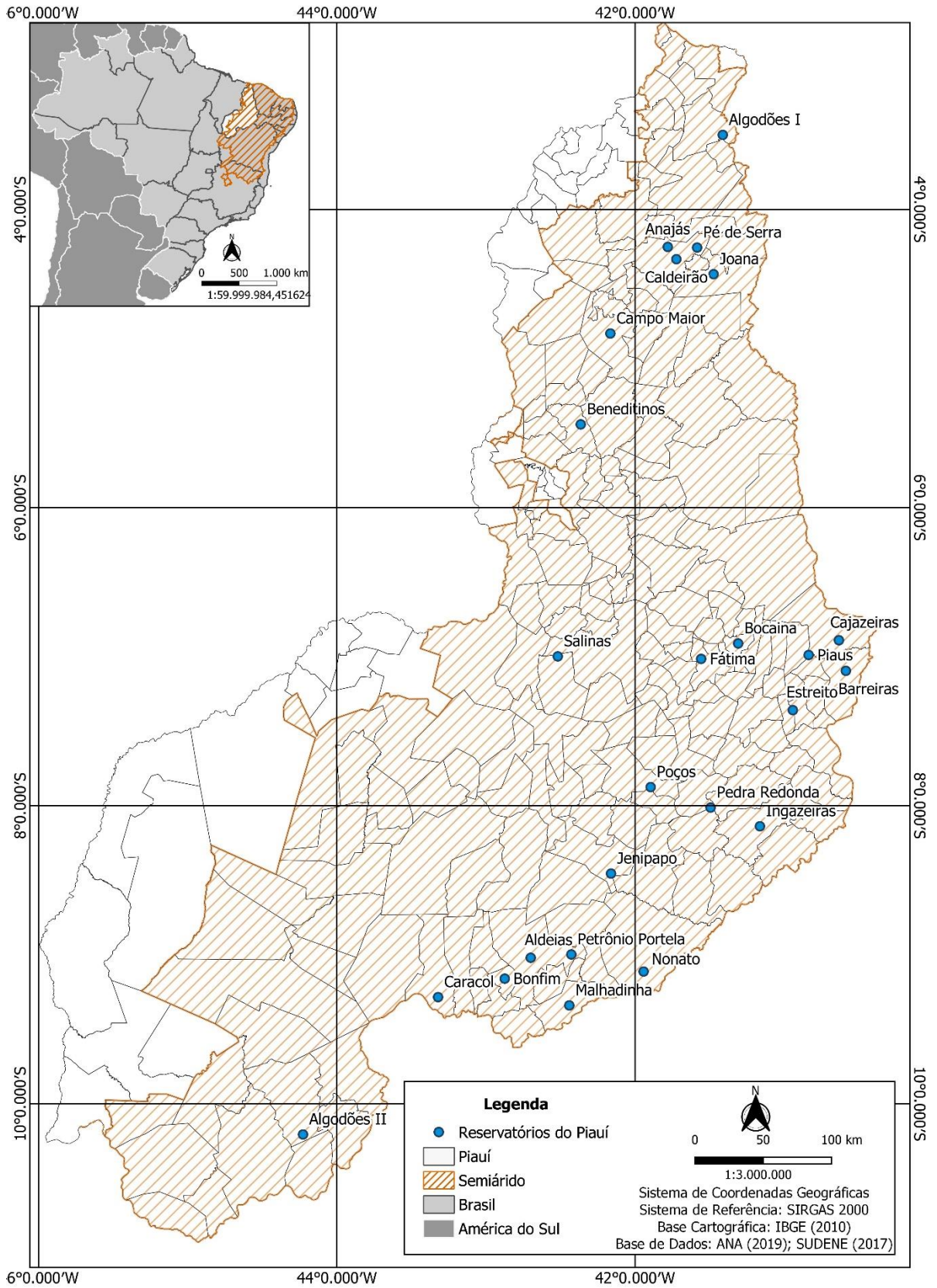
O acesso à água em tempo de escassez, na maioria das vezes depende das infraestruturas alternativas, o que nem sempre são fáceis de conseguir, principalmente para os mais pobres. Esta situação é um dos fatores que mantém uma parte da população rural em situação de maior vulnerabilidade (SALES, 2015).

Como forma de conviver com estas limitações, os governantes dos estados do Nordeste do Brasil, fizeram ao longo das últimas quatro décadas, investimentos significativos em obras hídricas de grande porte, a exemplo da construção de grandes barragens, açudes, reservatórios, transposições, interligação de bacias hidrográficas e a implantação de perímetros de irrigação (FRANÇA, 2001), como meio de assegurar água para o abastecimento humano e demais usos (GARJULLI, 2003). Marengo et al. (2018) explicam que essas alternativas para mitigar o problema da seca foram em diferentes graus, citando a construção de barragens como de maior impacto, e o uso de caminhões-pipa de menor impacto para as populações locais.

A maioria das políticas governamentais das décadas de 1990 e 2000, utilizaram a construção de açudes, como forma de alcançar uma “sustentabilidade hídrica”, mesmo que momentânea (VIEIRA, 2000). Em virtude disso, há um grande número de reservatórios espalhados pelo semiárido nordestino. No Piauí, por exemplo são contabilizados 25 reservatórios de usos múltiplos (Figura 2), que são acompanhados e monitorados pela Agência Nacional das Águas.



Figura 2 – Distribuição dos reservatórios de água no estado do Piauí



Fonte: Elaborado pelos autores

As barragens de terras (reservatórios e açudes) são obras, que historicamente, têm sido utilizadas para armazenar e desviar cursos d'água (ASSIS, 2017). No Brasil, esses tipos de estruturas começaram a ser construídas no século XX com o objetivo principal de combater a seca. Segundo Teixeira e Machado (2016), de 1998 a 2005, uma parceria entre o Banco Mundial e o governo brasileiro, possibilitou a implantação do programa Proágua Semiárido, com a finalidade de ampliar a oferta de água de boa qualidade no semiárido por meio de obras de infraestruturas hídricas, de modo a garantir o uso racional e sustentável desse recurso hídrico.

Quando se trata de barragens, reservatórios e açudes, essas obras são geralmente, contenções transversais a cursos de águas existentes, com a finalidade de regular vazões de um rio, abastecimento doméstico e animal, geração de energia, controle de cheias, irrigação, dentre outras (ASSIS, 2017), que se mostraram imprescindíveis no combate à seca.

A influência da implantação desse tipo de obra tem uma abrangência espacial de 10 km, propiciando a população usufruir de água para o consumo humano e seus demais usos, melhorando as condições de vida nessas regiões, além de elevar as perspectivas de desenvolvimento (VIEIRA, 2000). Embora, as políticas adotadas para o enfrentamento da seca sejam basicamente elaboradas de forma centralizada e unilateral, atendendo somente a situações pontuais (GARJULLI, 2003), essas obras de infraestrutura hídricas, pontuais ou não, serviram como meio de encarar a cruel realidade do semiárido, tornando-se fundamentais no enfrentamento da problemática da água (CABRAL; XAVIER; ROCHA, 2013).

Ações que intervenham na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos devem ser implementadas e implantadas. O Estado deve buscar meios de gerenciar os danos inerentes desse processo, assegurando para a população melhores condições de convivência com a seca, mediante a democratização do seu uso e preservação.

Algumas medidas têm sido utilizadas no esforço de gerenciar a seca no Nordeste, o projeto Monitor das Secas é um exemplo. Teixeira e Machado (2016) mostram que esse projeto coordenado pela ANA em parceria com participação de diversos órgãos estaduais do Nordeste é um esforço para estabelecer de modo participativo uma política nacional de secas, monitorando a situação mensal da seca. Estudos de avaliação de impactos, vulnerabilidade e planejamento, têm se mostrado uma boa e importante iniciativa no processo de gerenciamento da seca no Nordeste.

### **2.3 Base legal – principais legislações aplicadas aos recursos hídricos**

O uso da água de forma desmedida, exacerbada, sem o devido controle, contribuiu para um quadro alarmante de uma iminente crise hídrica (MACHADO, 2003). Essa crise é reflexo da diminuição na qualidade e quantidade da água doce, resultando em prejuízos para toda sociedade (FAYER et al., 2018). Os autores relatam a grandeza dessa problemática, ao noticiar que no Fórum Econômico Mundial de 2017, o risco de uma possível crise hídrica extrapolou o status de risco ambiental, passando a ser classificado como um risco social.

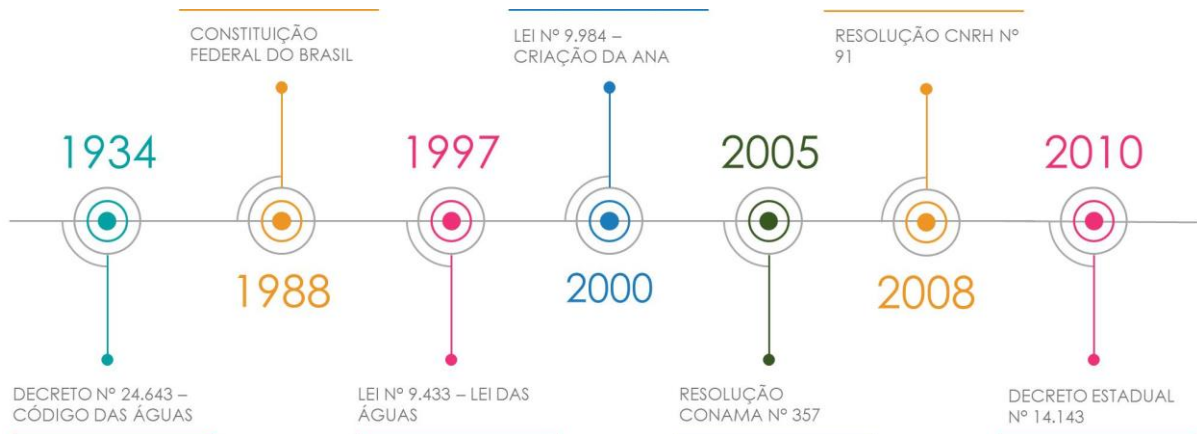
Durante as décadas de 70 e 80, a sociedade começou a discutir importantes aspectos na abordagem do uso da água, em que os principais questionamentos foram sobre as políticas de controle de uso e ainda, sobre o gerenciamento dos recursos hídricos. O modelo de gestão das águas utilizado na França foi o escolhido para ser aplicado como meio de gerenciar os recursos hídricos no Brasil.

No escopo principal desse modelo estão inseridos fundamentos como a descentralização da gestão, o controle da qualidade da água por meio de padrões de aceitabilidade, utilização das bacias hidrográficas como unidades de gestão, realização da cobrança de uso das águas, definição das organizações responsáveis pela execução desse modelo de gestão (CAMPOS; FRACALANZA, 2010).

Devido à importância dada aos recursos naturais, um conjunto de aparatos jurídicos se fizeram necessários para gerir esses recursos de forma a considerar as especificidades de cada região (TUNDISI, 2014). Assim, nesse tópico, é apresentada uma revisão sobre as legislações, que respaldaram os processos de implantação, aperfeiçoamento da gestão e proteção dos recursos hídricos.

Foi percebido, após a construção da trajetória temporal dessas legislações é que algumas leis tiveram maiores impactos, destacando-se com maior representatividade entre os autores, como a constituição de 1988, lei N° 9.433/1997 e resolução Conama n° 357/2005 modificada pela resolução 430/2011. As demais legislações apresentadas tiveram menor expressão quanto à disseminação nas literaturas estudadas, mas nem por isso são consideradas de menor importância. A seguir, é mostrado um panorama com as principais legislações (Figura 3), que conjuntamente contribuíram para a atual conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.

Figura 3 – Linha do Tempo: Base Legal



Fonte: Elaborado pelos autores

Uma das primeiras e mais antigas iniciativas na busca de organizar o gerenciamento e monitoramento dos recursos hídricos no Brasil, foi à criação do decreto Nº 24.643/1934 (FAYER et al., 2018; MORETTI; MARINHO, 2013), nomeado Código das Águas (FAYER et al., 2018). O código das águas tinha objetivos específicos voltados para a gestão das águas, organizando os seus usos múltiplos e definindo o abastecimento humano como uso prioritário (GALVÃO; BERMAN, 2015), e assegurava ainda, a água como propriedade privada (FAYER et al., 2018), embora a base da política pública dos recursos hídricos nesse período se sustentasse nos setores de energia e de saneamento (MORETTI; MARINHO, 2013).

Com o transcorrer do tempo e o crescimento das atividades agrícolas no país, as legislações foram sendo reformuladas e melhoradas, a função substancial da água exigiu que fosse realizado o planejamento do seu uso por meio do gerenciamento sistêmico. Nesse cenário, o desenvolvimento nacional teve grande importância, estimulando a evolução do modelo burocrático de gerenciamento para o modelo econômico-financeiro (SILVA; HERREROS; BORGES, 2017).

A constituição federal de 1988, especificamente no artigo 255 que se reporta ao meio ambiente, manifestou a necessidade de inserir a temática da qualidade da água dentro da questão ambiental, visando assegurar a sociedade atual e futura, o direito a um ambiente ecologicamente equilibrado permitindo assim uma boa qualidade de vida (BRASIL, 1988). Moretti e Marinho (2013) classificam a constituição de 1988 como um “marco histórico um divisor de águas, do ponto de vista da construção político-institucional do sistema de gestão nacional de recursos hídricos”.

De fato, a constituição de 1988 abriu as portas para o gerenciamento dos recursos hídricos no país, que para Fayer et al. (2018) existem dois aspectos que chamam atenção na constituição de 1988, o primeiro é o artigo 20, que modifica a propriedade dos recursos hídricos que limitam com outros países, passando estes a serem a União, o segundo ponto relevante, é o artigo 21 que teve como finalidade instituir a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), se tornando a responsável por colocar os recursos hídricos no rumo do desenvolvimento sustentável (SPÍNOLA; VITORIA; CERQUEIRA, 2016).

Machado (2013) vê o artigo 21 como um meio de reduzir os dilemas derivados da cultura de abundância com a limitação da quantidade de água disponível. Assim, a constituição de 1988 foi essencial para a implantação de meios legais, que legitimaram o domínio público da água, transformando as bacias hidrográficas em unidades para a implantação da PNRH (MORETTI; MARINHO, 2013).

Passados aproximadamente dez anos da promulgação da constituição de 1988, em 1997 foi implementada a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) juntamente com o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH) pela lei federal nº 9.433, mais conhecida, atualmente, como Lei das Águas, marco regulatório da gestão dos recursos hídricos no Brasil (SPÍNOLA; VITORIA; CERQUEIRA, 2016). Nessa legislação, os recursos hídricos são apresentados como bens naturais limitados, de domínio público e de valor econômico, reafirmando alguns aspectos legais, que já estavam presentes no Código das Águas. A partir do código das águas, os usos múltiplos foram assegurados, com a ajuda de uma gestão descentralizada e organizada, que em tempos de crise, a principal obrigação é garantir água para o consumo humano e dessedentação animal de forma prioritária (BRASIL, 1997; TUNDISI, 2014), promovendo o uso da água de forma racional e integrada (SPÍNOLA; VITORIA; CERQUEIRA; 2016).

Desde que lei das águas foi promulgada, o enquadramento dos recursos hídricos passou a ser um instrumento de gestão das águas, em que por meio dele, o corpo d'água é classificado conforme o uso preponderante, e partir dele são estabelecidos limites desejáveis para que essa água tenha qualidade adequada para o uso (BRASIL, 1997).

Machado (2003) expõe o quão foi a promulgação dessa lei. Ela foi a encarregada de equipar o Brasil com aparatos legais e institucionais, necessários para promover a organização da água, tanto do ponto de vista da disponibilidade, quanto do seu uso sustentável. Dada a sua dimensão, Tundisi (2014) a qualificou como uma das leis mais avançadas do mundo no que tange o enquadramento e gerenciamento dos recursos hídricos, já Wolkemar e Pimmel (2013) a descrevem como um marco jurídico pela participação social descentralizada.

Conforme discutido anteriormente, a Lei das Águas segue o modelo francês de gestão dos recursos hídricos. Machado (2003) elencou os principais instrumentos que a compõe: os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos d'água em classes, a outorga de direito de uso e a cobrança pelo uso da água. É notória a aproximação e semelhança que a legislação brasileira tem com a francesa. Nesse aspecto, Campos e Fracalanza (2010) veem a necessidade de fazer ponderações quanto à adoção desse do padrão francês, explicando que a realidade da França é diferente da brasileira. Em suma a Lei das Águas incorporou a realidade brasileira um panorama regulatório e administrativo dos recursos hídricos, por meio da descentralização e com a participação de toda a sociedade (CAMPOS; FRACALANZA, 2010; SPÍNOLA; VITORIA; CERQUEIRA, 2016; TUNDISI, 2014).

Para Tundisi (2014), o gerenciamento integrado e efetivo dos recursos hídricos só é possível a partir de uma visão sistêmica e de investimentos em pessoal capacitado para promover pesquisas, administrar os recursos e assegurar os usos múltiplos da água. Cunha et al. (2013) explicam que tipo de gerenciamento, tem grande relevância, e por isso, suscita o empenho em torná-lo realidade em diferentes países.

A lei nº 9.984 de 2000, criou a Agência Nacional das Águas (ANA), autarquia com autonomia administrativa e financeira, com o objetivo e função, de desenvolver normas nacionais para a regulamentação dos serviços públicos de saneamento básico. Dentro das atribuições destinadas a ANA, estão inclusas a implementação da PNHR (FAYER et al., 2018), acompanhamento das atividades que envolvam a utilização dos recursos hídricos, subsidiar a formação dos comitês de bacias hidrográficas, além de atuar na organização do Sistema Nacional de Barragens (SNISB). Desse modo, todas as ações dessa entidade buscam assegurar o uso múltiplo dos recursos hídricos por meio do cumprimento das legislações pertinentes (BRASIL, 2000).

Fayer et al. (2018) mostram a importância desse órgão ao apontar a obrigação da ANA em administrar 445 unidades de gerenciamento, considerando as características específicas de cada região. Essas unidades de gerenciamento são as denominadas bacias hidrográficas. Nesse sentido, Alvim, Kato e Rosin (2015) explicam que os agentes envolvidos na administração das bacias hidrográficas devem refletir sobre as políticas territoriais, pois a sua delimitação, não considera os limites políticos-administrativos, podendo ocasionar conflitos de interesses. De todo modo, a ANA utiliza as bacias hidrográficas para o planejamento do uso das águas, monitorando a sua disponibilidade e a outorga de uso de cada recurso hídrico (ROSSI; SANTOS, 2018). A ANA é peça chave na governança dos recursos hídricos, consolidando modelos de gestão e viabilizando o progresso das legislações existentes (TUNDISI, 2014).

Na tentativa de gerir os conflitos resultantes dos diversos usos das águas, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em 2005, instituiu a resolução n° 357, em que nela são apresentadas as condições para a classificação e enquadramento dos corpos hídricos, fixando metas para atingir a qualidade necessária para o seu uso das águas. Cunha et al. (2013) têm um entendimento bem conciso sobre essa resolução, eles explicam que:

“O documento deve ser visto como um instrumento jurídico para o estabelecimento de metas progressivas para melhoria dos sistemas aquáticos em seus aspectos qualitativos, por meio dos comitês de bacia, com foco nos usos mais nobres a que a água se destina e com vistas à sustentabilidade em longo prazo” (CUNHA et al., 2013, p. 166).

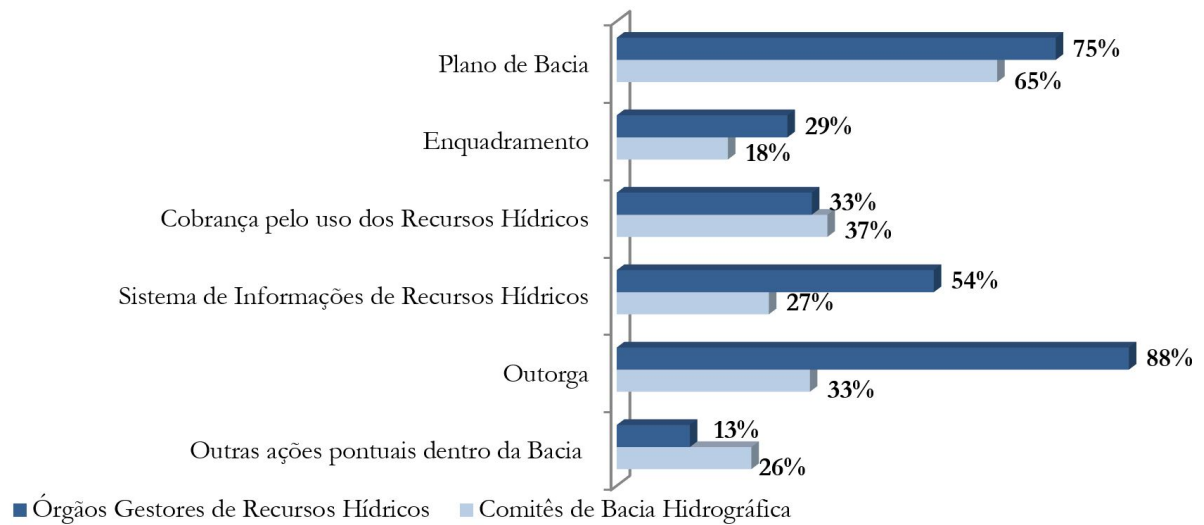
O merecido reconhecimento dessa legislação é observado pela inúmera quantidade de trabalhos que à utilizam para verificar parâmetros dos corpos hídricos com os valores especificados em tal resolução (BARRETO et al., 2013; BUZELLI; SANTINO; LOPES et al., 2013; CICERELLI; GALO, 2015; FARIAS; DANTAS NETO; LIMA, 2011; FIGUEIREDO et al., 2019; FIGUÊIREDO; VIEIRA; MOTA, 2006; FRANZ; CUNHA; GOBBI, 2007; LOPES et al., 2016; LOPES et al., 2019). Esse destaque à resolução Conama n°357/2005, é consequência da sua abrangência e importância para a conservação e preservação dos recursos hídricos nacional (CUNHA et al., 2013).

O enquadramento dessas águas é executado em conformidade com as normatizações e procedimentos estipulados pelo CNRH e Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH), utilizando o poder público como agente responsável pelo monitoramento dos parâmetros limitantes da qualidade da água necessários para atender aos anseios da população (BRASIL, 2005b). Na resolução CNRH 91/2008, também são descritos os procedimentos e metodologias utilizados para o enquadramento dos corpos d'águas superficiais e subterrâneos (BRASIL, 2008).

Em um estudo nacional feito por de Ribeiro e Hora (2019), foi constatado que entre os cinco instrumentos estabelecidos pela PNRH (plano de bacia, enquadramento, cobrança pelo uso dos recursos hídricos, sistema de informações de recursos hídricos e outorga), o enquadramento dos corpos de água, que é um dos principais meios de controle da qualidade da água, é o instrumento que tem menor prioridade dentro de programas governamentais na implantação das ações da PNRH, como é mostrado na Figura 4.



Figura 4 – Instrumentos da PNHR priorizados pelos órgãos gestores das CBHs



Fonte: Ribeiro e Hora (2019).

É importante frisar, que esse estudo foi realizado utilizando metodologia com questionários estruturado fechado, de múltipla escolha, aplicado nos órgãos gestores, em 126 CBH's de bacias estaduais e em quatro bacias interestaduais. Assim, é preocupante a não percepção da importância do enquadramento por parte dos gestores públicos, passados mais de 20 anos da PNHR.

Algumas modificações no texto inicial da resolução 357/2005 foram feitas ao longo desses 15 anos da data de sua publicação. As resoluções nº 370, de 2006, nº 397, de 2008, nº 410, de 2009, e nº 430, de 2011 foram responsáveis por essas alterações (Tabela 2).

Tabela 2 – Resoluções que alteram o texto da resolução Conama nº 357 de 2005.

Resoluções	Ano	Título
nº 370	2006	Prorrogou o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes.
nº 397	2008	Alterou os padrões de lançamento de efluentes.
nº 410	2009	Prorrogou o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes.
nº 430	2011	Tratou das condições e padrões de lançamento de efluentes.

Fonte: Elaborado pelos autores

As resoluções nº 370, de 2006 e nº 410, de 2009 tratam somente da alteração do prazo o atendimento das condições especificadas na lei 357/2005. A resolução nº 397 de 2008 altera alguns valores para o lançamento de efluentes. As principais mudanças no aspecto qualitativo



das águas, foram inseridas na resolução 430/2011, nela são elencados as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para que efluentes possam ser lançados nos corpos da água. Fica explicitado que esses efluente só podem ser lançados em conformidade com os padrões de qualidade da água, estabelecidos a partir do enquadramento do corpo hídrico presente na resolução 357 de 2005.

No âmbito do estado do Piauí, e em consonância com as normativas federais, em 2010, foi apresentado o Decreto de nº 14.143 que rege o enquadramento dos corpos hídricos piauienses. No entanto, devido à ausência dos comitês de bacia no estado, o enquadramento dos corpos hídricos é deficitário e na maioria das vezes inexistentes.

Nos trabalhos consultados, ficou claro que as legislações, com o passar do tempo, foram se aperfeiçoando no desenvolvimento de novos modelos de gerenciamento estratégicos dos recursos hídricos, e as interações que ocorrem em nível de bacia hidrográfica passaram à serem consideradas nesses novos modelos. No estado do Piauí, há uma deficiência nesse gerenciamento, talvez, resultado da ausência dos comitês de bacias. É responsabilidade dos comitês de bacia utilizar a resolução 357/2005 como meio de planejamento dos recursos hídricos objetivando o progresso na qualidade das águas de rios e reservatórios (CUNHA et al., 2013). A ausência do comitê de bacias no estado reflete negativamente na qualidade das águas e gera carência de informações sobre os recursos hídricos.

A ausência de informação não é particularidade do estado do Piauí. Um dos instrumentos da PNRH é a implantação do sistema de informações dos recursos hídricos, porém como constatado por Ribeiro e Hora (2019), existe um déficit de informações em quase todos os estados brasileiros. Mesmo nos estados onde há um sistema em funcionamento, as informações são dúbias ou incompletas.

Assim se torna importante maior envolvimento dos agentes vinculados no processo de implantação e aplicação dos instrumentos proposto na PNHR, possibilitando a efetivação das políticas de gestão dos recursos hídricos de modo a contemplar todas as ações para a conservação e preservação desse recurso natural tão importante para vida no planeta Terra.

#### **2.4 Qualidade da água e a eutrofização**

Algumas questões foram se tornando necessárias ao longo do trabalho de quantificação e monitoramento da CHL-a em reservatórios. A CHL-a é chave na avaliação da qualidade da água, reflete as condições da região estudada, sobretudo, climáticas e ações antrópicas. Nesse tópico, são discutidos alguns índices de qualidade da água, que servem como métodos de

avaliação, sendo abordados, também, a definição de qualidade da água, estabelecendo limites que definem se um reservatório ou açude está eutrofizado ou não. Além disso, é mostrado como a falta de informações sobre a qualidade da água pode influenciar nas ações de gerenciamento dos corpos hídricos e na tomada de decisões, quanto a utilização desses reservatórios pela sociedade.

A qualidade da água é resultado da confluência de fatores naturais e humanos (VON SPERLING; FERREIRA; GOMES, 2008). Do ponto de vista dos fatores naturais, a heterogeneidade da qualidade da água é afetada pelas contribuições naturais das bacias hidrográficas, por exemplo, pedologia e geologia, já os fatores antrópicos que mais influenciam, são a construção de barragens, lançamento de efluentes domésticos e industriais, escoamento superficial de áreas rurais e urbanas (CUNHA et al., 2013). O homem atua no processo de transformação do espaço, promovendo alterações nos fatores naturais, especialmente, por meio do uso e ocupação da terra, o que provoca variações nos parâmetros que compõem a qualidade da água.

É importante salientar que qualidade da água não é sinônimo de pureza, a qualidade da água é um compilado de informações, que expressam se um determinado corpo hídrico está de acordo com o uso a que ele se destina (BATISTA et al., 2013). Ela é definida a partir da união de características física, química e biológica, que possibilitam que os recursos hídricos tenham os seus usos garantidos, precisando para isto, que eles estejam dentro dos padrões de aceitabilidade previstos nas legislações (DERISIO, 2007).

Saber como os fatores naturais e humanos têm impactado na qualidade da água é de grande valia para os gestores públicos e para a comunidade, que faz o uso desse recurso cotidianamente. Por isso, pesquisadores e órgãos públicos utilizam índices para avaliar a qualidade da água que está disponível superficialmente. Os índices transformam as informações sobre a qualidade da água em dados mais acessíveis e de fácil compreensão.

De modo global, existem modelos que utilizam índices simplificados para avaliar os corpos d'água, especialmente, lagos e reservatórios (BARRETO et al., 2013). No Brasil, os índices mais utilizados para avaliar a qualidade das águas são o Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET) em que, ambos utilizam um conjunto de parâmetros agrupados, que discriminam o estado da qualidade da água.

O IET foi proposto por Carlson (1977) para regiões temperadas. Ele utiliza o fósforo, a CHL-a e a transparência das águas para determinação do grau de trofia dos corpos d'água (LAMPARELLI, 2004). Em função das diferentes características climáticas em ambientes tropicais, Toledo Júnior et al. (1983) adaptaram esse índice às condições do clima tropical,

modificando alguns coeficientes estudados a partir do reservatório de Barra Bonita, em São Paulo.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) utiliza o IET adaptado por Toledo Júnior et al. (1983) para o monitoramento dos reservatórios do estado de São Paulo. O IET quantifica os nutrientes e os agrupa em diferentes níveis tróficos (BARRETO et al., 2013; LAMPARELLI, 2004). Os diferentes graus de trofia, são definidos em cinco classes ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico por Toledo Júnior (1990), entretanto, tal subdivisão não é fixa existindo algumas outras subdivisões propostas por diferentes autores. Por exemplo, Salas e Martino (2001) propuseram uma nova classificação a partir de três classes básicas oligotrófico, mesotrófico e eutrotrófico.

Barreto et al. (2013) explicam que na literatura podem existir outras classes de trofia, cada uma estabelece os limites de cada categoria. Maia, Carvalho e Carvalho (2015), também lembram que outros fatores podem causar variação no IET. A entrada externa de nutrientes e as características dos reservatórios (tamanho, volume) como características contribuem para variações no IET.

No trabalho desenvolvido por Barreto et al. (2013), o IET foi usado para a construção de uma revisão bibliográfica sobre a eutrofização dos rios brasileiros, verificando o aumento de nutrientes dos corpos hídricos. Em outro estudo, desenvolvido no Brasil, por Maia, Carvalho e Carvalho (2015), são usados nitrogênio, transparência da água e o fósforo, para calcular o IET e em seguida se realiza a classificação dos corpos d'água de acordo com o grau de trofia.

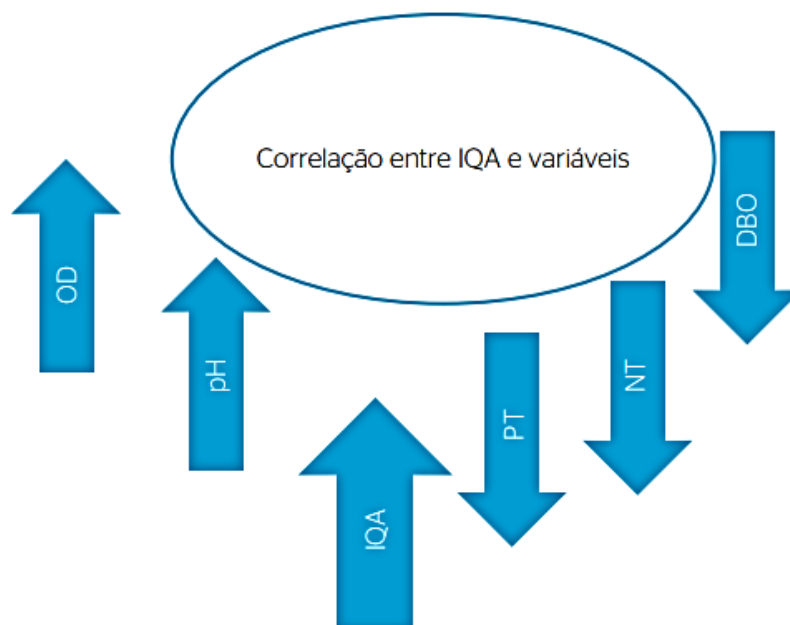
O Índice de Qualidade da Água (IQA), também, é bastante recorrente em trabalhos que visam mensurar a qualidade das águas. Ele foi originado pela *National Sanitation Foundation Institution* (NSF), a partir da utilização de nove parâmetros (oxigênio dissolvido - OD, demanda bioquímica de oxigênio - DBO, coliformes totais e termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais, pH, turbidez e temperatura), que juntos, se tornam um valor numérico, possibilitando a classificação das águas em cinco classes. Para a obtenção desses valores numéricos são atribuídos pesos a cada parâmetro, conforme a sua importância dentro do ambiente CETESB (1997).

Existem diferentes estudos relacionados ao uso desse indicador. Moretto et al. (2012) usaram ferramentas estatísticas para calibrar os pesos adotados no IQA convencional, por meio de dados coletados, mensalmente, em oito pontos da bacia do rio Pardo, durante os anos de 2007 a 2009. Após a calibração dos pesos, os autores verificaram que os resultados do IQA se mostraram mais significativos do que o IQA convencional. Além disso, os seus valores foram mais próximos dos valores considerados satisfatórios pela resolução Conama nº 357.

Figueiredo et al. (2019) abordaram a significância e a correlação de cada parâmetro do IQA da bacia do córrego de Lageado. Os autores coletaram amostras em dois períodos do ano de 2015 e depois em 2018, e com essa análise, constataram que houve declínio na qualidade da água dessa área. Eles ainda frisaram, que embora o resultado do IQA tenha ficado dentro dos padrões de aceitabilidade, alguns dos parâmetros que o compõe, quando analisados individualmente, não atendem os limites fixados na resolução Conama 357.

No estudo realizado por Amorim et al. (2017), foi avaliada a qualidade da água de igarapés Rabo de Porco e Precuá (Maranhão), também por meio da mensuração dos parâmetros que compõe o IQA. Testes estatísticos realizados com base nos resultados obtidos mostram relação significativa entre alguns parâmetros da qualidade da água e o IQA (Figura 5).

Figura 5 – Correlação das variáveis usadas no IQA



Fonte: Amorim et al. (2017)

Como pode ser visto na Figura 5, o IQA tem correlação com o oxigênio dissolvido (OD) e com o PH. As setas direcionadas para cima, indicam correlação positivas, já o fósforo total (PT), nitrogênio total (NT) e demanda bioquímica de oxigênio, representados pelas setas voltadas para baixo, explicita que esses componentes não tiveram tanto impacto na qualidade da água. Os resultados apresentados após a análise da correlação, foi que o IQA se correlacionou positivamente com pH ( $r=0,642$ ) e com OD ( $r=0,469$ ), e inversamente com a DBO ( $r=-0,522$ ), o NT ( $r=-0,598$ ) e o PT ( $r=-0,646$ ) (AMORIM et al., 2017). Os autores

apontaram nesse estudo, a aproximação dos resultados da classificação do IQA quando efetuada a comparação com o enquadramento da Resolução CONAMA nº 357/2005.

Por fim, alguns autores utilizam e comparam os dois índices apresentados, para ter melhor panorama dos ambientes estudados. Buzelli e Santino (2013), por exemplo, monitoraram nove variáveis coliformes fecais, ph, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total, fósforo total, turbidez, sólidos totais, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, para o cálculo do IQA no reservatório de Barra Bonita (São Paulo) usando a metodologia produtória. Os resultados do IQA variaram entre 0 a 100, já para o cálculo do IET usaram somente duas variáveis (CHL-a e o fósforo). Os autores puderam fazer um diagnóstico desse reservatório utilizando esses índices, facilitando, o estabelecimento de planejamentos para a conservação da qualidade da água.

É válido ressaltar, que tanto o índice de qualidade da água (IQA) como o Índice de Estado Trófico (IET) são baseados na qualidade da água. Tais índices podem ter diferentes classificações à medida que os corpos d'água sofrem alterações das suas propriedades. Por isso, ambos índices utilizam intervalos de valores para realizar a classificação de diversos ambientes aquáticos. Foi constatado que por usar uma maior quantidade de variáveis, o IQA retrata de forma mais real a qualidade da água quando comparado ao IET. Essa é a principal razão para a ANA utilizar o IQA como principal indicador qualitativo do estado da água no país (BRASIL, s.d.).

Von Sperling (1996) agrupou alguns fatores usados em conformidade com suas propriedades, com os parâmetros físicos envolvendo cor, turbidez, sabor e odor, temperatura, já os parâmetros químicos incluem ph, alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica, micro poluentes inorgânicos, micro poluentes orgânicos. Nos parâmetros biológicos, são analisados os organismos indicadores de algas e bactérias.

Os parâmetros aplicados nesses índices dependem de um conjunto de fatores endógenos e exógenos, que atuam nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos (ESTEVEZ, 2011). Carmo, Bevilacqua e Bastos (2008) ponderam que as características da água sofrem alterações ao longo do tempo e espaço. Assim, a qualidade da água é volátil, o que exige um monitoramento constante (SOBRAL et al., 2016).

Comumente, o monitoramento da qualidade da água é feito com metodologias que englobam coleta amostrais em campo, com posteriores análises laboratoriais que determinam e quantificam os parâmetros citados anteriormente (LIMA et al., 2019; VONSPERLING; FERREIRA; GOMES, 2008). Como foi exposto no item anterior, o monitoramento dos

parâmetros da qualidade da água é um dos itens que está previstos na resolução 357/2005 do Conama. Barreto et al. (2013) ponderam, que embora a resolução estabeleça classes de qualidade de água de acordo com seus usos pretendidos, ela não associa esses corpos ao nível de trofia.

Lopes et al. (2016) expõem o caráter essencial que o monitoramento da água tem na atualidade, tanto do ponto de vista da sustentabilidade, quanto na gestão dos recursos hídricos. Entretanto, existem dificuldades na realização desse monitoramento, especialmente, pelo caráter imprescindível do uso de equipamentos caros, pessoal capacitado, além da grande demanda de recursos financeiros (GONÇALVES; FERNANDES, 2017). Somado a essas dificuldades, a grande espacialização dos corpos hídricos (BODDULA et al., 2016; GALO et al., 2002), também é, um dos principais fatores que impede a prática do monitoramento tradicional de forma rotineira.

Como forma de diminuir a carência de informações acerca da qualidade das águas no Brasil, a Agência Nacional das Águas (ANA) em parceria com entidades públicas e privadas realizava até 2005 o monitoramento da qualidade da água em 1.671 pontos (Figura 6). Para ampliar o monitoramento dos recursos hídricos, em 2013, a ANA lançou a Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água (RNQA), na qual os estados brasileiros são os responsáveis pela implantação e operação das redes de monitoramento da qualidade da água (BRASIL, s.d.).

Na Figura 6, se pode observar que no estado do Piauí só constam sete pontos de monitoramento, o que é insuficiente para representar a qualidade das águas estaduais. Além disso, esse monitoramento é realizado somente nos principais rios como Parnaíba, Poti e Longá. Assim é notória a insuficiência ou inexistência de informações sobre a qualidade da água em todo o país de modo geral (ANA, 2005). O Paraná, Bahia e São Paulo são estados que realizam o monitoramento constante, utilizando metodologias próprias e sistemas de informação, demonstrando preocupação com seus recursos hídricos. Barreto et al. (2013) enfatiza que a carência de estudo sobre a da qualidade da água em rios brasileiros é maior na região Norte e Nordeste.

Nos pontos de monitoramento, são coletados dados de cinco parâmetros (ph, turbidez, condutividade elétrica, temperatura e oxigênio dissolvido). Os resultados dessas coletas são compilados, processados e disponibilizados no banco de dados *hidroweb* que pode ser acessado por toda a comunidade (ANA, 2005).

Figura 6 – Pontos de monitoramento de qualidade das águas da Rede Hidrometeorológica Nacional em 2004



Fonte: ANA (2005).

Na Tabela 3, são mostradas as unidades da federação que realizaram o monitoramento da qualidade da água, durante 2001 a 2010. Dentro dessa quantidade de pontos de monitoramento existentes, alguns pontos foram desativados. Ao todo 17 estados realizaram o monitoramento no período descrito, em 3.411 pontos de monitoramento. Apesar dessa quantidade, em apenas 1.988 foram realizados o IQA e em 2.202 fizeram o IET. Outro índice analisado, foi Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE), que se fez constante em 1.035. Todos esses dados, compõe um banco de dados georreferenciados e disponibilizados na base de dados Hidro, no Portal da Qualidade das Águas (ANA, 2012).

Tabela 3 – Número de pontos de monitoramento existentes nas Unidades da Federação até 2010

Unidade da Federação	Entidade	Pontos de monitoramento	Pontos com IQA - 2010	Pontos com IET - 2010	Pontos com ICE - 2010	Pontos com análise de tendência do IQA (2001-2010)	Pontos com análise de tendência do IET (2001-2010)
Alagoas	IMA	18	18	18	18	0	0
Bahia	INEMA	294	216	216	0	0	0
Ceará	COGERH	396	43	43	0	0	0
Distrito Federal	ADASA/ CAESB	81	46	46	45	0	0
Espírito Santo	IEMA	84	77	77	58	27	36
Goiás	SEMARH	57	55	56	17	4	7
Mato Grosso	SEMARH	151	82	82	1	17	18
Mato Grosso do Sul	IMASUL	235	84	84	29	75	76
Minas Gerais	IGAM	531	488	509	411	242	242
Paraíba	SUDEMA	136	68	71	0	0	0
Paraná	IAP/ AGUAS PARANÁ	314	213	213	4	103	124
Pernambuco	CPRH	133	38	38	33	2	2
Rio de Janeiro	INEA	120	22	112	38	0	72
Rio Grande do Norte	IGARN	211	94	94	0	0	0
Rio Grande do Sul	FEPAM	187	36	128	36	0	26
São Paulo	CETESB	408	360	360	345	191	217
Tocantins	SANEATINS	55	48	55	0	0	0
<b>TOTAL</b>		<b>3411</b>	<b>1988</b>	<b>2202</b>	<b>1035</b>	<b>661</b>	<b>820</b>

Fonte: ANA (2012).

Em 2013, a ANA por meio da resolução nº 903, criou a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas (RNQA). Entre suas principais finalidades, estão, a análise da tendência de evolução das águas superficiais, avaliar se a qualidade atual das águas atende os usos estabelecidos pelo enquadramento dos corpos d'água superficiais e disponibilizar para a sociedade as informações da qualidade da água (ANA, 2013). Essa resolução deve estar em operação, em todos os estados, até dezembro de 2020.

Já em 2014, a ANA criou o programa de estímulo de divulgação de dados de qualidade da água (QUALIÁGUA), utilizando-se da resolução nº 1.040. O QUALIÁGUA tem como objetivo divulgar os dados sobre a qualidade das águas superficiais no Brasil, além de implementar a RNQA em todas as unidades da federação (ANA, 2014). A partir de 2016, a



resolução nº1.040 foi alterada pela resolução nº 643, na qual foi determinado que todos os estados deveriam aceitar os termos do QUALIÁGUA até a data limite de 30 de junho 2017.

O QUALIÁGUA, dividiu os estados em três grupos, com metas mínimas a serem atingidas por cada um desses grupos. Conforme estabelecido no Anexo III da Resolução ANA nº 903/2013, o grupo I, foi formado pelos estados (CE, DF, MG e SP), que já possuem redes de monitoramento de qualidade de água e que podem expandir a rede, o grupo II, estão os estados que tem redes de monitoramento estaduais (BA, ES, GO, MT, MS, PB, PR, PE, RJ, RN e RS), porém necessitam de melhoramento na estrutura de modo geral, o grupo III, último grupo, estão os estados (AC, AL, AP, AM, MA, PA, PI, RO, RR, SC, SE, TO) que não tem monitoramento (ANA, 2013). O QUALIÁGUA é uma importante iniciativa para tentar diminuir a escassez de dados em relação a qualidade da água (GIRARDI; PINHEIRO; VENZON, 2019).

Existem em funcionamento 1.722 pontos de monitoramento, nos quais são medidos o ph, oxigênio dissolvido, condutividade e temperatura (ANA, 2019). Embora, exista essa rede de monitoramento, a própria ANA reconhece que a quantidade de pontos da rede de monitoramento é insuficiente. Assim, a elaboração de um diagnóstico nacional da qualidade da água na maior parte do país é limitada.

Entre os problemas inerentes à qualidade d'água, a eutrofização é um dos mais recorrentes e de mais fácil visualização podendo se manifestar de forma natural ou artificial, sendo o motivo mais comum do comprometimento da qualidade da água em águas interiores (MOAL et al., 2019). Ela envolve o incremento da quantidade de nutrientes, nitrogênio (N) e fósforo (P) (ESTEVES, 1998; YANG et al., 2008) em um ecossistema aquático, provocando maior ou menor fertilidade nesses ambientes (FIGUEIRÊDO et al., 2006), ou seja, é uma quebra na dinâmica natural do ecossistema (ESTEVES, 1998; LAMPARELLI, 2004; LOPES et al., 2016).

O desenvolvimento (crescimento) desenfreado das cidades e o aumento populacional, são fatores que contribuem para o aumento da eutrofização. Yang et al. (2008) acrescentam aos fatores propulsores da eutrofização, o enriquecimento de nutrientes, processo hidrodinâmico, fatores ambientais (temperatura, salinidade, dióxido de carbono, equilíbrio de elementos) e biodiversidade.

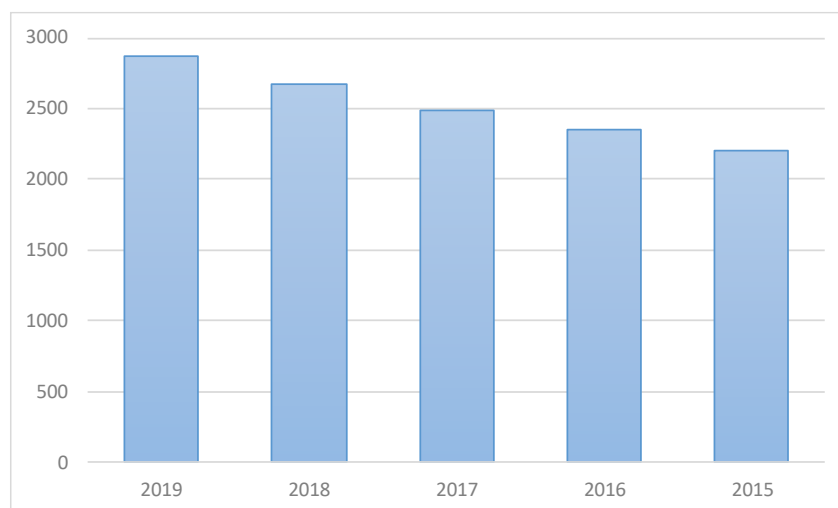
A eutrofização é apontada por Figueirêdo et al. (2006) como o principal impacto qualitativo da água, representando uma forma de poluição nos ambientes aquáticos, ameaçando a sustentabilidade de ecossistemas de água doce (PAERL et al., 2011). Por sua facilidade de aparecimento nos ambientes aquáticos, Esteves (1998) deixa claro que o processo de

eutrofização pode causar muitos prejuízos, tornando corpos d'água impróprios para o abastecimento, geração de energia, e como área de lazer.

A eutrofização em ambientes aquáticos, implica na abundância de elementos da comunidade fitoplanctônica e macrófitas ocasionando acumulação de algas que podem ser um indicativo da proliferação de cianobactérias, algas potencialmente tóxicas, que originam prejuízos a qualidade das águas e consequentemente a saúde humana (ESTEVES, 1998; LAMPARELLI, 2004; LOPES et al., 2016; MOAL et al., 2019). Além disso, a eutrofização de águas continentais se transformou em um grave problema ambiental de ordem mundial. Sobral et al. (2016) são taxativos ao informar que a eutrofização é um dos mais graves problemas na qualidade das águas do Brasil.

A temática da eutrofização se tornou amplamente discutida pela comunidade acadêmica ao longo dos últimos 20 anos. Ao realizar uma rápida pesquisa na base acadêmica *Web of Science* usando os termos “*eutrophic*” e “*eutrophication*” na língua inglesa durante 2015 até 2019, é possível ter a dimensão dessa temática no meio acadêmico. Tal busca, resultou em 12.587 trabalhos. É mostrado na Figura 7, que existe uma tendência de crescimento na quantidade de trabalhos, também é possível verificar, que em cada ano, são produzidos mais de 2.000 trabalhos com essa temática.

Figura 7 – Quantidade de trabalhos publicados entre 2015 e 2019



Fonte: Elaborado pelos autores

A grande maioria desses estudos, são artigos (92%), distribuídos nas mais diferentes áreas de conhecimento, com destaque para a área das ciências ambientais, biologia marinha, engenharias e recursos hídricos. Entre os países que mais produzem conteúdo acadêmico sobre

a temática ganham notoriedade a China (27%), EUA (20%), Brasil (6%), Inglaterra (6%) e Canadá (5%).

Dentre os resultados, alguns trabalhos são mais utilizados como referência para outros estudos, com destaque para os estudos de Huisman et al. (2018) e Moal et al. (2019). Huisman et al. (2018) constataram que o processo de eutrofização tem por consequência o aumento global de cianobactérias. Eles explicam que esse processo, põe em risco os ecossistemas e torna a água imprópria para uso. Já o trabalho realizado por Moal et al. (2019), os autores apresentam um resumo geral sobre o processo de eutrofização, destacando os agentes centrais no debate dessa temática. Desse modo, os autores enumeraram as consequências do incremento de nitrogênio e fósforo em lagos, áreas costeiras e rios do mundo.

No cenário nacional, trabalhos desenvolvidos por Barreto et al. (2013), Buzelli e Santino (2013), Farias, Dantas Neto e Lima (2011), Figueiredo et al. (2019), Franz, Cunha e Gobbi (2007), Rodrigues et al. (2015), Sobral et al. (2016), Trindade e Mendonça (2014), entre outros, discutem a eutrofização em rios, açudes e reservatórios. A eutrofização na região semiárida do Brasil, foi discutida nos trabalhos desenvolvidos por Batista et al. (2013), Figueirêdo, Vieira e Mota (2006), Lopes et al. (2016), Rocha Júnior et al. (2018), Ventura (2013), Vonsperling, Ferreira e Gomes (2008).

No cenário estadual, após pesquisa exaustiva em bases acadêmicas e periódicos, houve a constatação que no estado do Piauí existe um déficit de publicações sobre qualidade da água em reservatórios do estado. Os trabalhos realizados no estado que abordam a qualidade da água, é geralmente, realizado em rios perenes, como o Parnaíba (OLIVEIRA FILHO; LIMA NETO, 2018) e Poti (CAMARA; PASSOS, 2013; DAMASCENO et al., 2010).

O fato é que a qualidade da água está, estreitamente, associada à eutrofização dos recursos hídricos. Por esta razão, constitui tema tão discutido e abordado em diversos campos da ciência. A aceleração do processo de eutrofização traz consigo preocupações dos mais variados setores da sociedade, pois além da questão da disponibilidade hídrica, saneamento básico, a eutrofização estagna os processos de desenvolvimento nas regiões onde ela ocorre, inibindo diversas práticas econômicas viabilizadas pelo uso dos recursos hídricos.

## **2.5 Clorofila-A**

A poluição de mananciais, uso exacerbado de fertilizantes e associados à outras ações humanas, são as principais razões para a contaminação das águas. Tais condições são favoráveis para o desenvolvimento do processo de eutrofização (MACHADO, 2003). A associação desses

fatores pode causar diversas condições indesejáveis dentro de um ambiente aquático, principalmente naqueles ambientes, que são enriquecidos por nutrientes como fósforo e nitrogênio (CUNHA et al., 2013). A mortalidade de peixes e o crescimento excessivo de plantas aquáticas, são exemplos de danos provocados pela eutrofização (MOAL et al., 2019, SOBRAL et al., 2016).

As clorofilas-a, pigmentos fotossintéticos da cor verde, existem em quaisquer organismos que realizem fotossíntese oxigênica (DUAN et al., 2007; ESTEVES, 1998; STREIT et al., 2005; WANG; GONG; PU, 2018), por isso ela é o componente opticamente ativo mais estudado (CICERELLI; GALO, 2015). A quantidade de CHL-a varia de acordo com a espécie (STREIT et al., 2005). Sua formação, é estimulada por fatores internos, fósforo total, transparência das águas e por fatores externos, principalmente, a temperatura (BATISTA et al., 2013).

Autores como Esteves (1998), Moses et al. (2009), Ha et al. (2017), são unânimes ao apontar a CHL-a como um eficaz indicador de biomassas fitoplanctônica nos ambientes aquáticos. Além de avaliar quantitativamente as algas, ela também permite obter informações sobre o estado nutricional dos fitoplânctons (HA et al., 2017; WANG; GONG; PU, 2018).

Lopes et al. (2013) relatam que esse parâmetro está diretamente relacionado ao estado trófico dos corpos hídricos, também podendo ser associado à multiplicação de algas nocivas (cianobactérias). Essas algas, representam risco à saúde humana, animal, dos ecossistemas aquáticos (CARVALHO; BARBOSA; NOVO, 2013; BODDULA et al., 2016) e também impactos econômicos (KUBIAK; KOTLARZ; MAZUER, 2016).

Quanto a cianobactérias, Page, Kumar e Mishra (2018) alertam que as elas são capazes de ocorrer em qualquer manancial superficial especialmente naqueles com elevados níveis de nutrientes. Elas produzem variadas toxinas entre elas as “neurotoxinas, hepatoxina, citotoxina e endotoxinas”, que alteram as características físico-químicas das águas, podendo também, originar doenças e até mesmo levar a morte de animais e seres humanos.

Por todos esses motivos, a CHL-a é frequentemente usada para determinar a concentração de biomassa fitoplanctônica (ESTEVES, 1998), sendo um indicador indispensável para verificar o estado de eutrofização (LI et al., 2018). A estimativa da clorofila-a é o ponto inicial para estudos que visam obter a qualidade da água em qualquer corpo hídrico (WANG; GONG; PU, 2018).

A eutrofização artificial e antropogênica deve ser monitorada por meio da determinação e quantificação da CHL-a nos ambientes aquáticos. Lopes et al. (2016) atribuem ao monitoramento da CHL-a fundamental importância para a manutenção da qualidade da água.

Esse monitoramento deve ser feito relacionando a CHL-a e aos fatores ambientais que atuam nesses ambientes (LI et al., 2018). Somente por meio do monitoramento, é possível a tomada de decisões antes da inviabilização do uso dos recursos hídricos (SOBRAL et al., 2016). Nesse sentido, o monitoramento serve como meio de precaver que corpos d'água deixem de ter utilização por conta da eutrofização.

## **2.6 Metodologia aplicada a obtenção da Clorofila-A**

A CHL-a se faz presente em muitos trabalhos, que têm por finalidade monitorar a qualidade da água, em rios, açudes, reservatórios e até mesmo no mar. A coleta, extração, determinação e análise da CHL-a pode ser feita por metodologias tradicionais ou por metodologias alternativas.

A metodologia tradicionalmente aplicada para a obtenção de CHL-a em corpos hídricos, é realizada a partir de amostragens *in situ* e posteriores análises laboratoriais (ZHANG et al., 2016). Kuroda et al. (2015) explicam que desde a década de 60, vários métodos foram propostos para a quantificação da CHL-a: fluorimetria, cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) e espectrofotometria (ALVES, 2006; BARROSO; LITTLEPAGE, 1998; KURODA et al., 2015; SANTOS et al., 2003). Cada um desses métodos, é usado de diferentes formas, com ou sem maceração (MATORIN et al., 2004; JONES, 1979), a quente ou a frio, e com diferentes solventes (KURODA et al.; POMPEO et al., 2015).

No método fluorimétrico também ocorrem os processos de coleta, filtragem e extração da amostra com solventes, em seguida é utilizado o fluorímetro para lançar um feixe de luz de comprimento específico na solução analisada, após a leitura dos comprimentos de onda a 670 nm, são adicionadas gotas de ácido clorídrico (HCl) diluído para converter a clorofila em feopigmentos. Os resultados das leituras antes e depois da acidificação são usados para calcular a concentração de clorofila (BARROSO; LITTLEPAGE, 1998). A fluorimetria é mais utilizada quando o tempo, é fator limitante, para o objetivo dos estudos, por exemplo, em estudos hidrodinâmicos, ou quando, a clorofila é usada como forma de comparar o crescimento de algas em testes (SANTOS et al., 2003).

A cromatografia líquida de alta eficiência é o método mais recentemente desenvolvido para a determinação da CHL-a e de outros pigmentos vegetais (SANTOS et al., 2003). Esse tipo de metodologia, também é usada após a coleta e filtragem das amostras. Conforme Wright et al. (1991), a HPLC é formada por basicamente três aparelhos que utilizam solventes para a extração da CHL-a.

Esse tipo de extração da CHL-a é indicado quando existe a necessidade de separar componentes nas amostras, isso porque, essa metodologia é mais exata e sensível (SANTOS et al., 2003), permitindo a quantificação exata da clorofila e dos seus derivados (RIVERA et al., 2005). Contudo, o uso da HPLC exige altos custos, com equipamentos e pessoal especializados. Outro empecilho para o uso dessa metodologia, é a lentidão do processo, não sendo vantajoso a utilização diária desse método (POMPEO et al., 2015; RIVERA et al., 2005; SANTOS et al., 2003).

A espectrofotometria utiliza o equipamento denominado espectrofotômetro para a leitura dos comprimentos de onda das amostras a partir das amostras coletadas e filtradas (MOURA et al., 2013). Lamparelli (2004) utilizou essa metodologia em seu trabalho após constatar que, embora, a HPLC tenha os melhores resultados, a espectrofotometria é amplamente utilizada por ser mais viável financeiramente e demandar menos tempo.

Em resumo, as metodologias tradicionalmente empregadas para a extração da CHL-a, exigem um maior tempo para a extração, necessitam ainda, de mão de obra especializada (SANTOS et al., 2003). Além disso, Pompeo et al. (2015) acrescentam que os custos na instalação e operação dessas metodologias as tornam inacessíveis, impossibilitando o seu uso por muitas entidades públicas. Para a escolha da melhor metodologia para a extração da CHL-a, é preciso levar em consideração fatores como precisão da análise, facilidade de aplicação, pesquisa de outros trabalhos na área e adequação aos objetivos do estudo (SANTOS et al., 2003)

Ao fazer um estudo comparativo sobre as metodologias, Barroso e Littlepage (1998) explicam que a fluometria é a mais delicada em comparação com a espectrofotometria e exige menor volume de amostra, podendo ser utilizada para determinações *in vivo*. Já o método por cromatografia é o mais preciso, mas não é adequado para análises de rotina.

No estudo de Santos et al. (2003), as três metodologias para a obtenção da clorofila foram comparadas a partir de 120 amostras em dois reservatórios, em um dos reservatórios estudados os três métodos apresentaram valores semelhantes, exprimindo resultados positivamente correlacionados. A fluometria se destacou por aferir as maiores concentrações médias, já o método espectrofotométrico, utilizado em conjunto com a cromatografia, resultou em valores médios menores. Os autores concluíram, que das três metodologias estudadas, a fluometria foi a menos eficiente pois superestimou as concentrações de clorofila e que o método cromatográfico é o mais confiável.

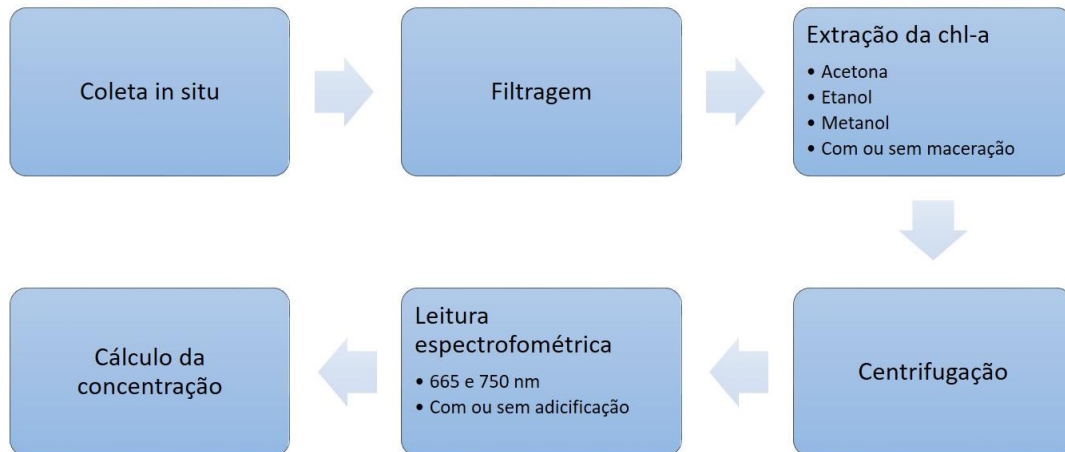
Rivera et al. (2005), compararam os valores de clorofila obtidos por meio da espectrofotometria e fluometria, e identificaram os coeficientes de correlação foram similares para as amostras analisadas. Os autores explicam que embora, o método espectrofotométrico

superestima os valores, esse método não pode ser descartado, pois seus resultados são altamente consistentes.

Em suma, todos os autores aqui destacados, são unânimes quanto a escolha da cromatografia (HPLC) como o melhor método para a quantificação da clorofila (ALVES, 2006; BARROSO; LITTLEPAGE, 1998; POMPEO et al., 2015; SANTOS et al., 2003). Porém, a espectrofotometria é mais utilizada, por ser mais viável para grandes escalas de trabalho (POMPEO et al., 2015), sendo encontrada na maioria dos laboratórios de análise de água, e usada mundialmente em programas de monitoramento (RIVERA et al., 2005; SANTOS et al., 2003).

No Brasil, a metodologia da espectrofotometria é mais utilizada, de acordo com Lamparelli (2004), Kuroda et al. (2005), Pompeo et al. (2015). Conforme manual da Cetesb (2014), ela consiste nas etapas de coleta amostral, filtragem, extração, leitura espectrofotométrica e cálculo das concentrações. Esses procedimentos, devem ser realizados sequencialmente, conforme a Figura 8, resultando na quantificação da CHL-a.

Figura 8 – Etapas metodológicas para determinação da clorofila



Fonte: Elaborado pelos autores

Brandão et al. (2011) ressaltam que para executar a coleta amostral, é necessário que seja feito um planejamento dos equipamentos e materiais utilizados, devendo levar em consideração, o estudo e o tipo de análise que será realizada, pois cada metodologia requer ensaios e interpretação de dados de forma específica.

Kuroda et al. (2005) veem a escolha do solvente como a principal decisão a ser tomada para a determinação de clorofila, uma vez que, o caráter hidrofílico/hidrofóbico da CHL-a possui influência direta na hora da escolha do solvente para sua extração. Os solventes polares,

como a acetona, o metanol, o etanol, o acetato de étila, a piridina e a dimetilformamida são os mais eficientes para a extração (STREIT et al., 2005).

A *Standart Methods* e a EPA (*Envioronmental Protection Agency*), indicam a acetona como solvente padrão para a determinação da CHL-a (ARAR,1997; APHA, 1999). A extração da clorofila por meio desse solvente, é baseada na metodologia descrita por Nusch (1980), porém Alves (2006) explica que a acetona subestima as concentrações da clorofila, apresentando desempenho inferior aos demais solventes.

Os solventes mais usados são acetona, etanol e metanol. Nesse sentido Kuroda et al. (2005) buscaram determinar a melhor metodologia para a determinação da CHL-a. Eles foram avaliados, quanto a eficiência na extração, rapidez e facilidade, toxicidade e preço. Durante os ensaios realizados, a acetona apresentou os menores valores de concentrações da CHL-a, quando comparado aos demais solventes, o que indicou para os autores a possibilidade de menor eficiência desse solvente.

O metanol por sua vez, obteve as maiores concentrações de CHL-a, demonstrando maior eficiência na extração da CHL-a. Já o etanol teve uma grande semelhança de resultados em relação o metanol. Após análise comparativa de todos os resultados e avaliação dos critérios mostrados anteriormente, os autores concluíram que o metanol se adequou melhor a todos os critérios e com os melhores resultados. Kuroda et al. e Alves (2006) concordam que o etanol e metanol, são eficientes para a determinação da clorofila, superando consideravelmente, os resultados obtidos por meio da acetona.

De fato, há várias maneiras de quantificar a CHL-a por meio da metodologia tradicional, existindo grandes variedades de equipamentos, procedimentos, temperaturas para extração, solventes, etc., porém, as dificuldades intrínsecas em alguns métodos, e a falta de recursos de algumas entidades, tornam a avaliação e o monitoramento da qualidade da água menos corriqueiras do que é desejado pelos órgãos ambientais.

O ponto-chave das metodologias tradicionais, sem dúvidas, é não expressar visão do todo, mostrando apenas a realidade local (ZHANG et al., 2016). Assim, sua eficácia para o monitoramento em grandes escalas espaciais, é questionável (BODULLA et al., 2016). A amostragem pontual *in situ*, raramente, irá descrever irregularidades na distribuição da CHL-a em ambientes aquáticos (HUNTER et al., 2008), diferentemente do sensoriamento remoto, como será possível compreender no item seguinte.



## 2.7 Sensoriamento remoto

Para superar os desafios oriundos das metodologias tradicionais no monitoramento da qualidade da água, os sensores remotos, a partir de imagens de satélites Landsat, MODIS, MERIS, Sentinel, dentre outros., têm sido utilizados para a obtenção de informações constantes sobre a qualidade da água em distintas escalas geográficas (BODULLA et al., 2016).

O surgimento do sensoriamento remoto (SR) é congruente ao aperfeiçoamento das técnicas fotográficas e da ampliação das pesquisas espaciais, sendo as fotografias aéreas à primeira forma de obtenção de informações por SR (NOVO, 2010). Em 1960, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou os primeiros satélites que permitiram a observação da Terra marcando assim, o nascimento do sensoriamento remoto (LORENZZETTI, 2015).

Com o lançamento dos primeiros satélites meteorológicos, o sensoriamento remoto foi se tornando uma das principais tecnologias para a coleta de dados e monitoramento dos recursos terrestres, por permitir o rápido acompanhamento de fenômenos dinâmicos, variáveis no espaço e no tempo, além de mudanças da superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012).

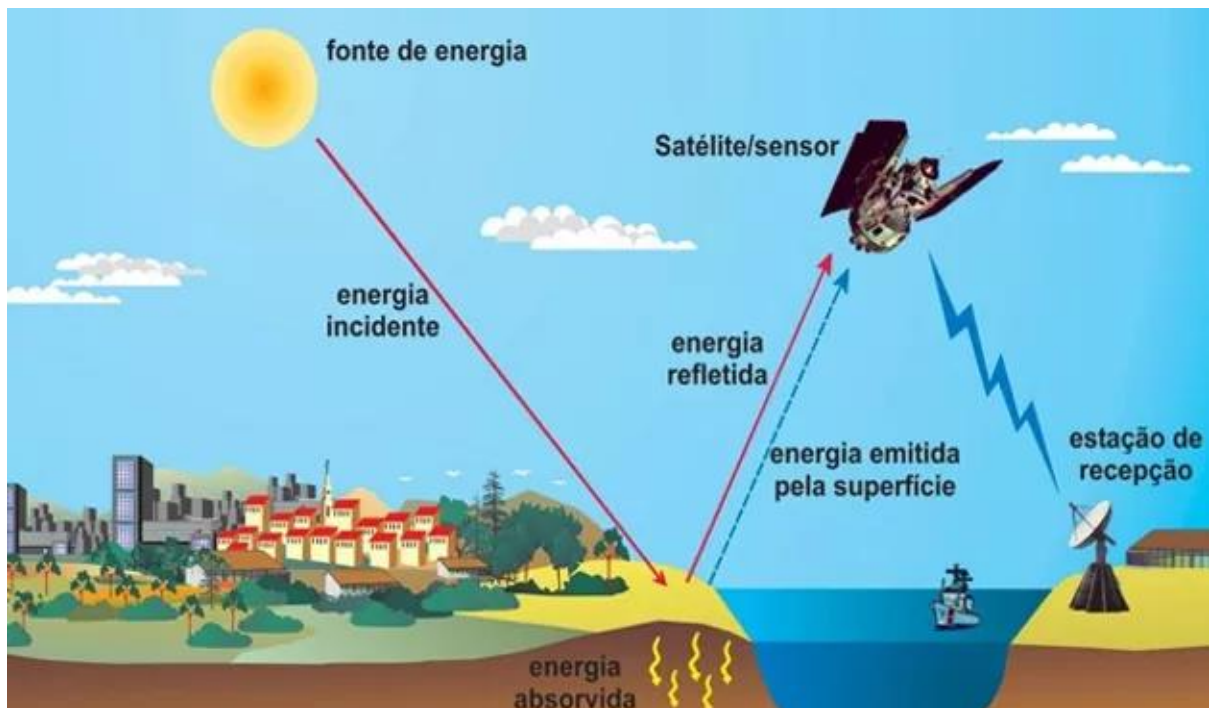
Novo (2010) lembra que a expressão “sensoriamento remoto”, só foi utilizada no meio acadêmico pela primeira vez em 1960, de lá até os dias atuais, essa expressão tem englobado ao seu significado várias tecnologias e conhecimentos complexos de diferentes áreas do conhecimento, se tornando uma tecnologia multidisciplinar (FLORENZANO, 2011). No Brasil, o SR foi introduzido por intermédio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 1972 (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Estabelecer o que é sensoriamento remoto requer a confluência de perspectivas, uma vez que cada autor o define conforme sua interpretação (FLORENZANO, 2011). Na visão de Meneses e Almeida (2012), por exemplo, o SR é a tecnologia que possibilita a aquisição de imagens e outros dados da superfície terrestre, mediante a captura e registro da energia proveniente da superfície terrestre. Entretanto, Novo (2010) considera essa forma de definir SR muito abrangente, pois para ela existem outros meios de conseguir informações sem que haja contato direto. A definição de SR elaborada por Novo (2010), explica que o SR é formado pela união de sensores e equipamentos, que processam dados, com o objetivo final, de estudar as interações eletromagnéticas entre a superfície terrestre e seus componentes. Conforme pode ser visto na Figura 9, o SR coleta informações terrestres, por meio da captação de energia eletromagnética (LORENZZETTI, 2015). A captura dessas informações é feita por sensores terrestres, aéreos ou orbitais (FLORENZANO, 2011). Todo e qualquer corpo ou objeto, presente na Terra, que tenha temperatura maior à 0 K, emite radiação eletromagnética (REM)

(NOVO, 2010). Essa REM pode ser proveniente do Sol ou produzida pelos sensores (LORENZETTI, 2015), sendo captada e registrada por sensores (FLORENZANO, 2011).

A REM pode ser procedente de sensores ativos, que produzem sua própria energia, ou de sensores passivos, que utilizam a REM proveniente do Sol ou dos alvos (FLORENZANO, 2011). Os sensores são os responsáveis por converterem a REM em informações que podem ser associadas as propriedades dos objetos (NOVO, 2010).

Figura 9 – Coleta de dados da superfície terrestre a partir do sensoriamento remoto



Fonte: Florenzano (2011).

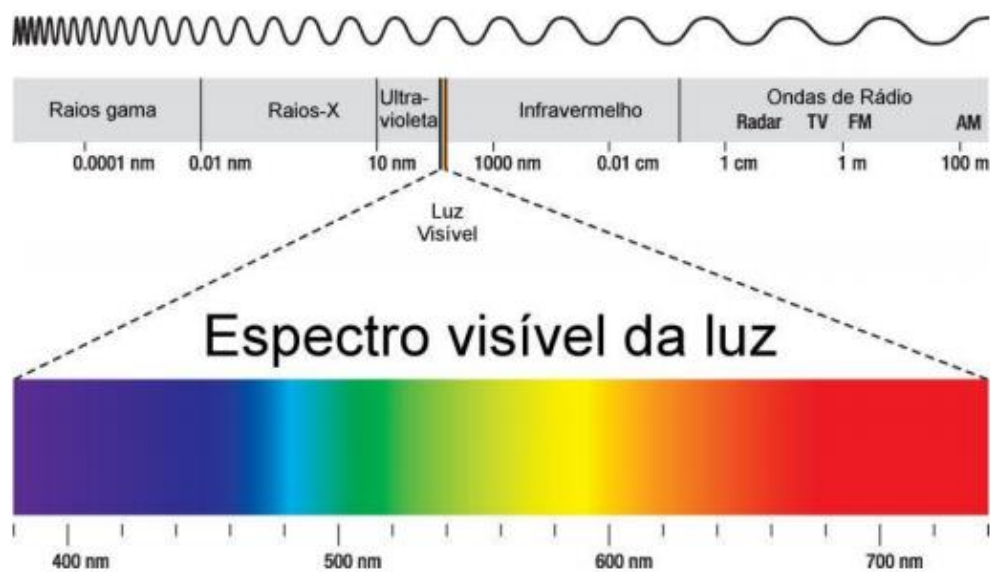
Novo (2010) explica ainda, que a REM é o instrumento através do qual a informação dos alvos é transferida ao sensor, assim a REM é um estado dinâmico de energia, que surge a partir da sua interação com os elementos. Cada elemento terrestre tem uma forma de refletir ou emitir a REM, essa forma é chamada de assinatura espectral (KUPLISH et al., 2016).

A assinatura espectral de um elemento representa os comprimentos de onda que ele reflete ou absorve, quando um objeto possui cor vermelha, significa que ele reflete REM correspondente à cor vermelha e absorve a REM nas demais cores (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). Assim, os objetos da superfície terrestre como a vegetação, água e o solo refletem, absorvem e transmitem REM, em proporções que variam conforme o

comprimento de onda de cada objeto estudado (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

O espectro eletromagnético representa a distribuição da REM por regiões. Cada região tem um intervalo de comprimento de onda específico, que varia desde os raios gama até as ondas de rádio, como é mostrado na Figura 10. A distribuição da REM nas regiões espectrais varia de acordo com tamanho do comprimento de onda (FLORENZANO, 2011) e frequência (KUPLISH et al., 2016). O comprimento na faixa da luz visível, região que a visão humana consegue reconhecer, varia entre 400 a 700 nanômetros ou  $10^{-9}$  metros (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015), distinguindo as cores do violeta ao vermelho (FLORENZANO, 2011). Kuplish et al. (2012) explicam que nos sensores remotos, as regiões do espectro eletromagnético são chamadas de bandas espectrais e abrangem diferentes regiões.

Figura 10 – Espectro eletromagnético

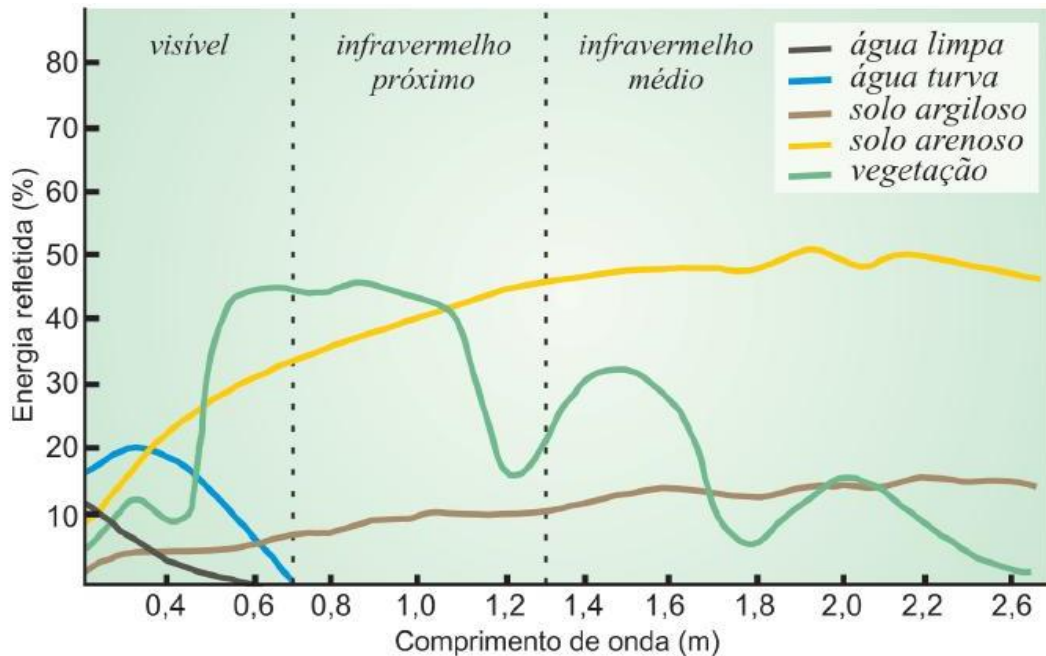


Fonte: Carminato, Leite e Pamboukian (2015).

Na Figura 11, é possível observar a REM dos principais elementos terrestres: água, solo e vegetação. Florenzano (2011) analisa que o comportamento espectral da água limpa é baseado na absorção, refletindo pouco energia na região do visível e nenhuma na região do infravermelho próximo e médio. A autora destaca que a resposta espectral da água é muito variável, pois sofre influência dos materiais que podem estar presentes na sua composição. Ainda com base na figura supracitada, é nítido que a vegetação reflete maior quantidade de

energia na faixa do infravermelho próximo, se diferenciando assim dos demais elementos da natureza.

Figura 11 – Curvas espectrais dos principais elementos terrestres



Fonte: Florenzano (2011).

É possível analisar o comportamento espectral da vegetação por meio da REM, usando a reflectância das folhas, plantas individuais ou conjuntos de plantas. Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) revelam que o processo de fotossíntese realizado por todo tipo de vegetação, é perceptível na região do visível, 0,4 a 0,72  $\mu\text{m}$ . Nessa faixa de onda ocorre a absorção da REM.

A REM de cada elemento, pode ser obtida com de sistemas sensores imageadores ou não imageadores (NOVO, 2010). Sensores imageadores têm como produto final, imagens, que são formadas por uma matriz de *pixels*, e cada um desses pixels tem um valor numérico correspondente, chamado de número digital (DN). Os sensores não-imageadores têm como resultado final, gráficos ou dados numéricos (NOVO, 2010).

As imagens de satélites têm importantes características, que as qualificam para utilização (NOVO, 2010). Não existe a imagem ideal para determinado fim. O fator principal na escolha de uma imagem de satélite, é sua a resolução, que deve ser compatível com a finalidade do trabalho desenvolvido. Se deve identificar a resolução adequada para observar e analisar o objeto de interesse. Toda imagem de satélite tem quatro resoluções (espacial,

temporal, espectral e radiométrica), que as caracterizam (FLORENZANO, 2011; NOVO, 2010).

A resolução espacial é caracterizada pela dimensão do *pixel* da imagem, essa dimensão se equivale a uma dimensão real (CAMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). Ela representa a menor área do terreno detectado por um sensor remoto (NOVO, 2010). Nos sensores orbitais (satélites), esse tipo de resolução é comumente encontrada no intervalo de 50 cm a 1 km. Uma imagem com resolução espacial de 50 cm, consegue detectar alvos maiores que 50 cm (FLORENZANO, 2011). A frequência na qual um satélite passa por uma mesma área é chamada de resolução temporal (FLORENZANO, 2011). Quanto menor a resolução temporal, maior é quantidade de imagens de uma mesma área.

A quantidade de bandas espectrais e o tamanho da faixa do espectro eletromagnético de cada banda definem a resolução espectral do sensor (KUPLISH et al., 2016). Quanto menor a resolução espectral, maior será a capacidade de um sensor distinguir os objetos dentro das regiões do espectro eletromagnético (NOVO, 2010). Um sensor, com resolução espectral de 0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ , tem maior resolução, quando comparado a outro sensor com comprimento de onda de 0,4 a 0,6  $\mu\text{m}$  (NOVO, 2010). Florenzano (2011) considera que o número de bandas espectrais, também, influi na resolução da imagem, para ele quanto mais bandas espectrais, maior resolução. Isso porque, quanto maior o número de bandas de um sensor, maior a faixa espectral é contemplada, e assim, maiores são as chances de discriminar objetos nas imagens (KUPLISH et al., 2016).

Já a resolução radiométrica é associada a competência que um sensor tem em diferenciar a quantidade de energia refletida ou emitida pelos objetos (FLORENZANO, 2011), quanto maior for a capacidade do sensor de distinguir diferenças de intensidade do sinal, maior será sua resolução radiométrica (NOVO, 2010). Todas essas resoluções devem ser analisadas ao utilizar uma imagem de satélite, a definição do problema a ser analisado e os objetivos pretendidos, deve levar em consideração a tecnologia disponível, tempo e o custo. Imagens de satélites com alta resolução espacial, na grande maioria tem elevado custo financeiro e demanda máquinas mais potentes

### **2.7.1 Sensoriamento remoto e qualidade da água**

O sensoriamento remoto tem sido, amplamente, utilizado para o monitoramento da qualidade da água interiores (CICERELLI; GALO, 2015), rios (GONÇALVES; FERNANDES, 2017), lagos (CARVALHO; BARBOSA; NOVO, 2013; FERREIRA et al.,

2017; MACHADO; BAPTISTA, 2016), lagoas (MARTINI, 2006), açudes (VENTURA, 2013) e reservatórios (MINHONI et al., 2017; RODRIGUES et al., 2015; SOBRAL et al., 2016; TRINDADE; MENDONÇA, 2014), pela sua capacidade em fornecer um monitoramento constante e sinótico (HUNTER et al., 2008).

Muitos algoritmos para a estimativa da concentração de CHL-a têm sido criados nos últimos anos (BRESCIANI et al., 2012). Moses et al. (2009) ressaltam que não existe um algoritmo único para a estimativa direta da CHL-a por meio de dados de satélites, pois, no geral, os algoritmos existentes foram criados a partir de uma grande diversidade de imagens: multiespectrais (DUAN et al., 2007), hiperespectral (JIAO et al., 2006), aerofotogramétricas (MATTHEWS et al., 2012), de satélites: Landsat (DUAN et al., 2007), Sentinel (GRENDALTE et al., 2018; TOMMING et al., 2016), MODIS (CICERELLI; GALO, 2015; GITELSON et al., 2009), MERIS (BRESCIANI et al., 2014; MATTHEWS et al., 2012; MOSES et al., 2009) e números de bandas.

Imagens hiperespectrais foram usadas por Jiao et al. (2006) para estimar a concentração de CHL-a em um lago da China. Os autores padronizaram e correlacionaram 28 curvas de reflectâncias, utilizando pontos coletados *in loco* com o espectroradiômetro. Assim, de posse desses dados, foram realizadas análises de regressão em distintos comprimentos de onda, em que a correlação é forte. O resultado que apresentou melhor correlação foi usado na elaboração de um algoritmo de razão de bandas. Esse algoritmo obteve coeficiente de determinação  $R^2 = 0,87$ , o que indicou bom ajuste do algoritmo para a realidade local retratada.

Duan et al. (2007), também, analisaram a concentração de CHL-a em um lago na China, eles aplicaram diversas razões de bandas, conjuntamente, com dados coletados em campo. Os autores optaram por utilizar imagens multiespectrais do satélite Landsat. O algoritmo formulado pelo autor resultou em um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,67$ , valor inferior ao do algoritmo proposto por Jiao et al. (2006). Apesar do  $R^2$  ser inferior ao elaborado por Jiao et al. (2006), Duan et al. (2007) constataram que o satélite Landsat é capaz de avaliar com eficácia, a concentração de CHL-a em ambientes aquáticos.

Hunter et al. (2008), por sua vez, escolheram imagens de aerofotogrametria, em decorrência da alta resolução espacial, importante característica no monitoramento da proliferação de cianobactérias com base na quantidade de CHL-a. O algoritmo semi-empírico produzido pelos autores se mostrou bastante consistente, resultando em  $R^2 = 0,96$ . Assim, os autores recomendaram o uso do sensoriamento remoto com imagens de alta resolução derivadas da aerofotogrametria para a produção de series temporais da clorofila.

Imagens Espectrofotométricas de Média Resolução (MERIS) foram testadas, por diferentes autores, para a estimar a quantidade de CHL-a. Moses et al. (2009) testaram duas formas para a obtenção da CHL-a, a primeira usando razão de duas bandas e a segunda usando três bandas. Matthews et al. (2012) optaram por utilizar algoritmo de subtração de linhas a partir de três bandas espectrais, já Bresciani et al. (2014) elaboraram modelo diferente com duas bandas espectrais. Todos os autores obtiveram resultados positivos. Nos dois algoritmos elaborados Moses et al. (2009) apresentaram  $R^2$  superiores a 0,95, no algoritmo elaborado por Bresciani et al. (2014) a precisão foi de  $R^2 = 0,93$ . Matthews et al. (2012) foram os que obtiveram menor precisão  $R^2=0,71$ , entretanto, essa precisão é aceitável para aferição da CHL-a. É importante salientar, que todos os autores, validaram os algoritmos elaborados a partir da concentração de CHL-a medida em campo.

Sensores hiperespectrais também podem ser utilizados na estimativa da CHL-a. Kutser et al. (2016) recorreram a esses sensores para comparar dados obtidos pôr radiometria de campo, com dados de reflectâncias dos satélites Landsat e Sentinel-2. Os autores alcançaram uma boa correlação  $R^2 = 0,77$ , isso possibilitou os autores concluírem que os dados adquiridos através das imagens são equivalentes aos alcançados em medições de campo.

Existe grande quantidade de sensores remotos que disponibilizam informações de forma gratuita ou de baixo custo para o monitoramento da qualidade da água. Foi constatado, nos estudos aqui apresentados, boa correlação dos dados de sensoriamento remoto e dados obtivos *in loco*. Isso indica, que o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficiente no monitoramento da qualidade da água. Palmer, Kutser e Hunter (2015) destacam que só é possível monitorar a qualidade da água, de forma contínua e com menor custo, a partir do sensoriamento remoto.

As séries de satélites Landsat e Sentinel são as mais recorrentes em estudos de monitoramento da qualidade água. Isso porque, a qualidade das suas resoluções espaciais e radiométricas, o tornam eficiente nesse tipo de monitoramento (KUTSER et al., 2016).

O programa Landsat é responsável pelos principais satélites de monitoramento de recursos naturais mundial, ele é composto atualmente, por uma série de oito satélites que foram desenvolvidos e lançados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Inicialmente, os satélites da série Landsat foram concebidos para terem vida útil de dois anos, entretanto, alguns tiveram seu tempo de órbita estendido e outros nem chegaram a realmente entrar em operação.

Os satélites Landsat permitem a aquisição de imagens da superfície terrestre para atender diversas finalidades, tendo como característica principal a sua boa resolução espacial, principalmente quando comparado a outros satélites globais gratuitos (NOVO, 2010). O

Landsat 8 é o mais novo satélite da série, ele foi lançado em 2013, com órbita quase polar, tem resolução temporal de dezesseis dias, como é mostrado na Tabela 4. Esse satélite é equipado com sensores multiespectrais e monocromáticos, podendo capturar imagens com resoluções espaciais de 15 e 30 metros, respectivamente, (USGS, s.d.).

Tabela 4 – Resoluções das bandas espectrais do satélite Landsat 8

Bandas	Nome da banda	Resolução espacial	Comprimento de onda
1	Visível	30 m	0,43 - 0,45 $\mu\text{m}$
2		30 m	0,450 - 0,51 $\mu\text{m}$
3		30 m	0,53 - 0,59 $\mu\text{m}$
4	Vermelho	30 m	0,64 - 0,67 $\mu\text{m}$
5	Infravermelho próximo	30 m	0,85 - 0,88 $\mu\text{m}$
6	SWIR 1	30 m	1,57 - 1,65 $\mu\text{m}$
7	SWIR 2	30 m	2,11 - 2,29 $\mu\text{m}$
8	Pancromática	15 m	0,50 - 0,68 $\mu\text{m}$
9	Cirro	30 m	1,36 - 1,38 $\mu\text{m}$

Fonte: USGS (s.d)

O sensor *Operational Land Imager* (OLI) acoplado no satélite Landsat 8, é o responsável por medir a porção do infravermelho visível. Ele apresenta uma faixa de imageamento de 185 km de largura. Quanto ao nível de ruídos e defeitos na imagem, ele tem melhor desempenho em relação aos sensores que equipavam os satélites anteriores. Sua resolução radiométrica é de 12 bits na captura de dados, mas após o processamento dos seus dados, é redimensionada para número inteiros de 16 bits (USGS, s.d.).

A série de satélites Sentinel iniciou suas operações em 2014. Ela é composta de seis satélites, cada um com uma finalidade específica. O Sentinel-1 adquire imagens fazendo uso de radares, tal método de aquisição, permite a obtenção de informações independentemente da situação climática. O Sentinel-2 tem o objetivo de monitoramento ambiental, enquanto o Sentinel-3 é focado no monitoramento marinho e topografia do mar. Os satélites Sentinel-4 e 5, foram desenvolvidos para o monitoramento da qualidade do ar, respectivamente, na Europa e no mundo. O último lançamento dessa série, o Sentinel-5p, foi realizado em 2017, com o objetivo de fazer medições atmosféricas, relacionadas à qualidade do ar, clima, camada de ozônio e radiação ultravioleta (USGS, s.d.).

A missão Sentinel-2, lançada em 2015 pela Agência Espacial Européia (ESA), foi concebida com a finalidade de dar continuidade aos dados fornecidos pelos satélites SPOT e Landsat, auxiliando nas observações e monitoramento terrestres por intermédio de imagens



multiespectrais com melhores resoluções. Essa missão é composta por um conjunto de dois satélites, Sentinel-2A e Sentinel-2B, equipados com o sensor *Multispectral Imager* (MSI), juntos eles imageam uma faixa de 290 km, com resolução temporal de cinco dias, resolução radiométrica de 12 bits e resolução espacial de 10, 20 e 60 metros (Tabela 5).

Tabela 5 – Resoluções das bandas espectrais do satélite Sentinel-2

Bandas	Nome da banda	Resolução espacial	Comprimento de onda central
1	Aerossol	60 m	0,443 $\mu\text{m}$
2	Azul	10 m	0,49 $\mu\text{m}$
3	Verde	10 m	0,56 $\mu\text{m}$
4	Vermelho	10 m	0,665 $\mu\text{m}$
5	Red Edge 1	20 m	0,705 $\mu\text{m}$
6	Red Edge 2	20 m	0,740 $\mu\text{m}$
7	Red Edge 3	20 m	0,783 $\mu\text{m}$
8	NIR	10 m	0,842 $\mu\text{m}$
8A	Red Edge 4	20 m	0,865 $\mu\text{m}$
9	Vapor d'água	60 m	0,940 $\mu\text{m}$
10	Cirrus	60 m	1,375 $\mu\text{m}$
11	SWIR 1	20 m	1,610 $\mu\text{m}$
12	SWIR 2	20 m	2,190 $\mu\text{m}$

Fonte: USGS (s.d)

A boa resolução espacial do Sentinel-2 permite a utilização das suas imagens, para o estudo de grandes e pequenos lagos (TOMING et al., 2016). Boddula, Ramaswamy e Misha (2017) enumeraram o porquê dos sensores multiespectrais, como o Sentinel-2, serem eficientes no monitoramento de variáveis ambientais, citando como principais vantagens o custo benefício, uniformização dos dados, grande amostragem na área de interesse, boa cobertura global, etc.

Devido as boas resoluções do Sentinel-2 no monitoramento ambiental, Grendaite et al. (2018) o utilizaram para testar vários algoritmos empíricos de obtenção da CHL-a a partir de informações espectrais desse satélite. Os algoritmos estudados foram elaborados para distintos satélites e regiões. Assim, os comprimentos de onda do Sentinel-2 foram adaptados para valores mais próximos aos dos satélites originais. Os autores, concluíram com esse experimento, que a maioria das equações testadas apresentou bom desempenho, embora, o estudo tenha sido realizado em um diferente contexto.

Bresciani et al. (2012) enfatizam a importância do sensoriamento remoto como uma ferramenta válida para estudos ecossistêmicos completos em longo prazo. No entanto, existem

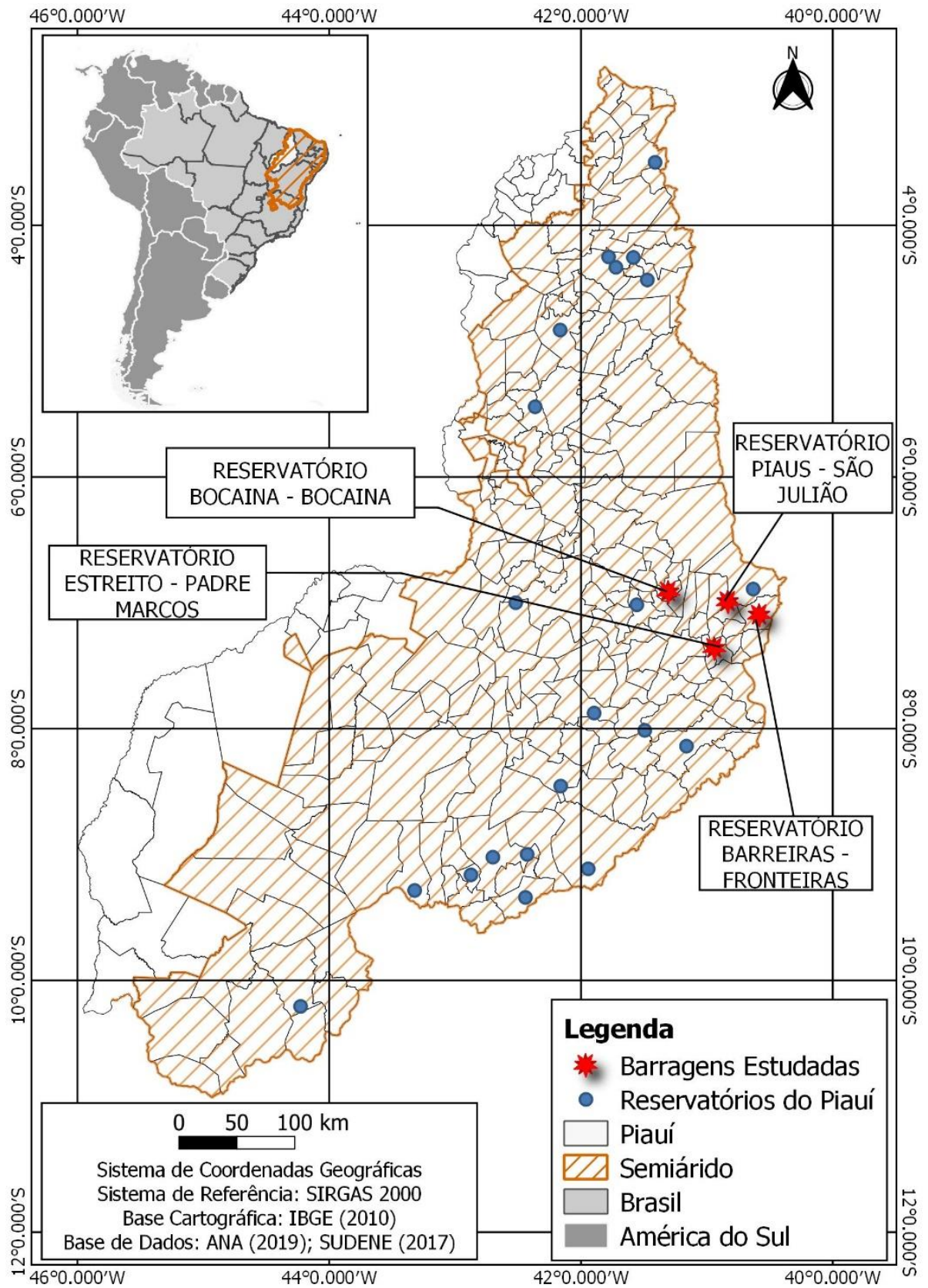
limitações quanto ao uso dessa tecnologia. A maior delas diz respeito aos sensores que estão atualmente em órbita, e que foram planejados e construídos para o monitoramento de fenômenos terrestres, oceanográficos e meteorológicos, sendo eles usados de modo adaptado no estudo da qualidade da água (HA et al.,2017). Além disso, algoritmos que são usados para águas opticamente complexas, precisam de melhorias para alcançar a excelência no monitoramento em tempo real, principalmente, em termos de correções atmosféricas (BRESCIANI et al., 2012).

Entretanto, é notável a ampliação da utilização do sensoriamento remoto em diversas esferas, o tornando cada vez mais conhecido pela sua capacidade em propiciar informações sobre o meio terrestre. E, de todo modo, o sensoriamento remoto é sem dúvida uma importante abordagem no monitoramento dos ambientes aquáticos, devido aos altos custos no levantamento de informações *in situ* com os métodos tradicionais.

### **3 METODOLOGIA**

Para a realização desse estudo, optou-se por utilizar a abordagem quantitativo-qualitativa. Assim, foram utilizados conhecimentos matemáticos, estatísticos e tecnológicos, para subsidiar a mensuração, análise e interpretação, dos dados resultantes dos algoritmos utilizados para aferir a concentração de CHL-a. Essa pesquisa se apresenta com natureza explicativa, visto que, ela busca esclarecer a dinâmica da CHL-a, no tempo e espaço, pela aplicação da álgebra de bandas e algoritmos na área de estudo mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Delimitação da Área em Estudo

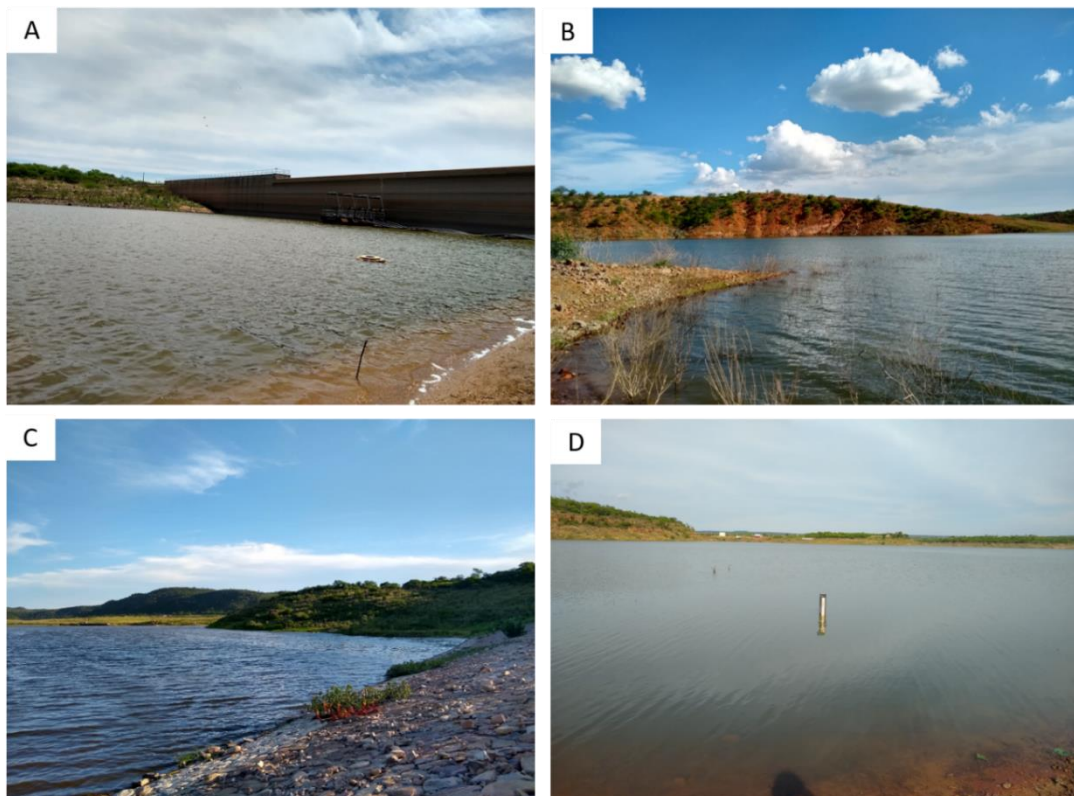


Fonte: Elaborado pelos autores

A população de dados considerada nesse estudo representa o conjunto dos vinte e cinco reservatórios monitorados pela ANA no Piauí. Dentro desse conjunto, o estudo foi concentrado em quatro reservatórios: Reservatório Estreito (Figura 13 – A) em Padre Marcos, Reservatório Piaus (Figura 13 – B) em São Julião, Reservatório Barreiras (Figura 13 – C) em Fronteiras e Reservatório Bocaina (Figura 13 – D) localizado na cidade de mesmo nome.

Na Figura 13, é possível, verificar a variabilidade de características locais. O reservatório Estreito, possui águas em tons esverdeado, a parede da barragem é de concreto e com pouco vegetação em suas margens, a barragem de Piaus apresenta águas mais turvas, o solo da região é siltoso, sua vegetação é escassa e seca. O reservatório Barreiras é uma barragem de enrocamento, que utiliza pedras para a sustentação da barragem, suas margens possuem cobertura vegetal rasteira, de aproximadamente um metro de altura. No reservatório Bocaina a coloração da água é mais turva, provavelmente influenciada pelas características do solo local, que é latossolos vermelho, além disso, quase não tem presença de vegetação em suas margens.

Figura 13 – Reservatórios d'água estudados



Fonte: Elaborado pelos autores

A escolha desses reservatórios como amostras, se deu em virtude da grande espacialização dos reservatórios, apresentando maior viabilidade técnica e financeira para a

execução da pesquisa. O tamanho das imagens de satélite utilizadas durante o estudo, ou seja, a faixa de imageamento, também foi fator determinante na escolha da área, quanto distantes um reservatório do outro, mais quadrantes de imagens teriam que ser utilizados, demandando assim, maior capacidade computacional e operacional para a análise dos dados. Desse modo, é desejável que a referida pesquisa, realizada a partir dessas amostras, possibilite a execução de estudos posteriores em quaisquer elementos da população total do estudo.

Os procedimentos da pesquisa presentes, neste trabalho, são de caráter documental e pesquisas de campo. A sua elaboração foi baseada em materiais já publicados, apresentando ao investigador, a ampliação dos conhecimentos sobre a temática estudada. Esse benefício acaba se tornando particularmente, muito importante, quando o problema de pesquisa necessita de dados em que se encontrem dispersos pelo espaço (GIL, 2013).

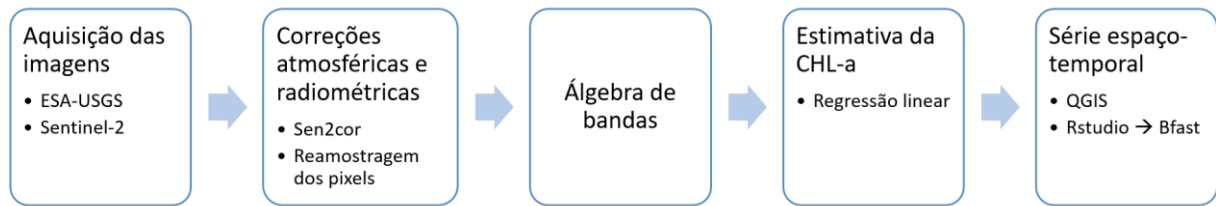
O conjunto de referências trabalhadas durante esta pesquisa, foi formado a partir de documentos oficiais de nível internacional, nacional e estadual, informações de acesso livre em sites governamentais como o IBGE, SUDENE, ANA, DATA-ORG, MONITOR DA SECA, dentre outros. Também foram utilizadas bases acadêmicas consolidadas, como o Google Acadêmico, *Web Of Science*, *Scopus*, *Sciello*, o portal de periódicos mantido pela Capes, foi um importante aliado na construção da pesquisa.

Os procedimentos para a utilização do sensoriamento remoto, na estimativa da concentração de CHL-a em reservatório, foram mostrados na Figura 14, as principais etapas foram a aquisição das imagens, correção atmosférica, álgebra de bandas, finalizando com a confecção da série espaço-temporal de CHL-a em cada um dos reservatórios.

A primeira etapa, foi a aquisição das imagens de satélite. As imagens utilizadas, abrangeram o intervalo temporal de janeiro de 2017 a dezembro de 2019, provenientes dos sensores ópticos Sentinel-2 A e B, disponibilizadas gratuitamente no endereço eletrônico da instituição americana *United States Geological Survey* (USGS).

A escolha das imagens levou em consideração a quantidade de nuvens presentes na imagem. Foram selecionadas as melhores cenas, com quantidade de nuvens inferior a 10% da imagem, ou imagens, que não tivessem presença de nuvens dentro da área dos reservatórios. Boddula, Ramaswamy e Mishara (2017) explicam que a cobertura de nuvens pode ser considerada um grande empecilho para o monitoramento da proliferação de algas, devendo assim ter um cuidado quanto a quantidade de nuvens presentes nas imagens. Para abranger toda a distribuição espacial dos reservatórios, foram adquiridas cenas de cada reservatório dentro dos quadrantes 24MTT, 24MUT, 24MTS.

Figura 14 – Etapas da obtenção da CHL-a pelo sensoriamento remoto



Fonte: Elaborado pelos autores

As imagens foram corrigidas quanto a interferências por meio da extensão *Sen2Cor*, desenvolvida pelo ESA para o aplicativo SNAP 5.0 (*Sentinel Application Platform*). No próprio aplicativo SNAP 5.0, foi executado o procedimento de reamostragem de pixels. Assim, todas as cenas foram reamostradas para a resolução espacial de 20 metros. Com as cenas corrigidas e com tamanhos iguais, foi realizada a execução da álgebra de bandas (MISHRA; MISHRA, 2012), resultando em imagens contendo a concentração de CHL-a em cada reservatório (BRESCIANI et al., 2012; GRENDALITE et al., 2018). Essas imagens permitiram elaborar séries espaço-temporal de CHL-a em cada reservatório.

#### 4 REFERÊNCIAS

ACOSTA, A. O Bem Viver, uma alternativa ao desenvolvimento. In: ACOSTA. **O bem viver: uma oportunidade para imaginar outros mundos**. [S.I.]: Autonomia Literária; Elefante, 2016. P.33-64.

Agência Nacional das Águas - ANA. CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **A questão da água no Nordeste**. Brasília. 2012. Disponível em: <http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/669/4/A%20quest%C3%A3o%20da%20C3%A1gua%20no%20Nordeste.pdf>. Acesso em: 14 maio 2019.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Portal qualidade das águas**. S.d. Disponível em <http://pnqa.ana.gov.br/pnqa.aspx>.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Panorama da qualidade das Águas**. Brasília, p. 179. 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2011**. ANA, 2012.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil 2012**. 2012.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Resolução N° 903, de 22 de julho de 2013**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2013/903-2013.pdf>. 2013.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Resolução N° 1.040, de 21 de julho de 2014**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2014/1040-2014.pdf>. 2014.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Resolução N° 643, de 27 de junho de 2016**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2016/643-2016.pdf?122436>. 2016.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. 2018.

Agência Nacional das Águas - ANA. **Indicadores de qualidade de água em reservatórios (IQAR)**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-qualidade-agua.aspx>. Acesso em: 4 mar. 2019.

Agência Nacional das Águas - ANA. **SAR - Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios**. Brasília, s.d. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/Nordeste>. Acesso em: 15 fev. 2019.

ALVES, M. S. A. **Cianobactérias e cianotoxinas em águas continentais**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALVIM, A. T. B.; KATO, V. R. C.; ROSIN, J. R. de G. A urgência das águas: intervenções urbanas em áreas de mananciais. **Cadernos MetrÓpole.**, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 83-107, 2015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2236-99962015000100083&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2236-99962015000100083&lng=en&nrm=iso). Acessado em: 02 Maio 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3304>.



AMORIM, D. G. et al. Enquadramento e avaliação do índice de qualidade da água dos igarapés Rabo de Porco e Precuá, localizados na área da Refinaria Premium I, município de Bacabeira (MA). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 251-259, abr. 2017. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522017000200251&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000200251&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 30 Abr. 2019.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association (APHA), **American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF)**. 20ª edição. 1999.

ARAR, E.J. Determination of Chlorophyll a, b, c1 and c2, and Pheophytin a in marine and freshwater phytoplankton by spectrophotometry. **EPA metod 446.0**, 1997.

ARAÚJO, S. M. S. de. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica-Revista Científica da FASETE**, v. 5, n. 5, p. 2-4, 2011.

ASSIS, A.P. et. al. **Barragens de Terra e Enrocamento**. UnB, Publicação interna. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/3550>>. Acesso em: outubro de 2017.

BARRETO, L. V. et al. Eutrofização em Rios Brasileiros. **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 2165-2179, 1 jul. 2013. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/EUTROFIZACAO.pdf>. Acesso em: 1 out. 2018.

BARROSO, G. F.; LITTLEPAGE, J. Protocolo para análise de clorofila a e feopigmentos pelo método fluorimétrico (Fluorímetro TD-700). **Vitória: Programa de Monitoramento Ambiental-BMLP**, 1998.

BATISTA, A. A. et al. Parâmetros interferentes na eutrofização das águas superficiais do Açude Orós, Ceará. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 2, p. 1-8, 2013.

BEZERRA, A. A. et al. Gestão das Águas de Barragens do Nordeste a partir de uma Perspectiva Social e Econômica. **Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**, Porto Alegre, 2009.

BODDULA, V. et al. Data driven analysis of Algal Bloom activity for effective Water Sustainability. In: **IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom)(BDCloud-SocialCom-SustainCom)**. IEEE, 2016. p. 424-430.

BODDULA, V.; RAMASWAMY, L.; MISHRA, D. A Spatio-Temporal Mining Approach for Enhancing Satellite Data Availability: A Case Study on Blue Green Algae. In: **2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)**. IEEE, 2017. p. 216-223.

BRANDÃO, C. **Território & desenvolvimento: as múltiplas escalas entre o local e o global**. Editora da UNICAMP, 2007.

BRANDÃO, C. J. et al. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. **São Paulo: CETESB**, 2011.



BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil 1988**. Brasília: 292 p. 1988.

BRASIL. **Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos: 20 p. 1997.

BRASIL. **Lei N° 9.984 - Criação da Agência Nacional das Águas**. Brasília 2000.

BRASIL. **Plano estratégico de desenvolvimento sustentável do semi-árido**: Versão preliminar para discussão. 1 ed. Brasília-DF: Ministério da Integração (MI): Secretária de Políticas de Desenvolvimento Regional, Agência de Desenvolvimento do Nordeste (ADENE), 2005a. 137 p.

BRASIL. **Resolução N° 115/2017**: Aprova a Proposição n° 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL n° 107, e 27 de julho de 2017. Brasília: Diário Oficial da União - Seção 1, 2017. ISBN ISSN 1677-7042. Disponível em: <<http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiariado/arquivos/resolucao115-23112017-delimitacaodosemiariado-DOU.pdf>>. Acesso em: 2018.

BRASIL. **Resolução N° 357 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília: 27 p. 2005b.

BRASIL. **Resolução N° 370 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília. 2006.

BRASIL. **Resolução N° 397 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília. 2008a.

BRASIL. **Resolução N° 91 - Procedimentos Gerais Para o Enquadramento dos Corpos de Água Superficiais e Subterrâneos**. Brasília: 5 p. 2008b.

BRASIL. **Resolução N° 410 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília. 2009a.

BRASIL. **Resolução N° 430 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília. 2009b.

BRESCIANI, M. et al. Monitoring blooms and surface accumulation of cyanobacteria in the Curonian Lagoon by combining MERIS and ASAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 146, p. 124-135, 2014.

BRESCIANI, M. et al. Retrospective analysis of spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the Curonian Lagoon. **Journal of Coastal Conservation**, v. 16, n. 4, p. 511-519, 2012.

BUZELLI, G. M.; SANTINO, M. B. da. C. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita, SP. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 186-205, abr. 2013. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2013000100014&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2013000100014&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 11 fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.930>.

CÂMARA, O. C.; PASSOS, M. H. da S. A Utilização do índice IET para caracterizar o processo de eutrofização do rio Poti em Teresina-PI. *Ciências e Inovação: Tecnologias Sustentáveis Para Preservação do Meio Ambiente – Anais... II EITEC*, v. 2, n. 1, 2013.

CAMPOS, V. N. de O.; FRACALANZA, A. P. Governança das águas no Brasil: conflitos pela apropriação da água e a busca da integração como consenso. *Ambiente & Sociedade*, Campinas, v. 13, n. 2, p. 365-382, dez. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2010000200010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2010000200010&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 02 mai. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2010000200010>.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

CARMINATO, L. P.; LEITE, G. T. D.; PAMBOUKIAN, S. V. D. Utilização de imagens de sensoriamento remoto em projetos de geoprocessamento. In: **CONGRESSO ALICE BRASIL**.

CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K. X. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: abordagem qualitativa da identificação de perigos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 426-434, 2008.

CARVALHO, L. A. S. de; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. de M. Ajuste de bandas de modelos empíricos de estimativa de clorofila aplicados à região da planície de inundação do Lago Grande Curuai - PA. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu - PR, ano XVI, p. 8924-8931, 2013. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.31.30?mirror=dpi.inpe.br/marte2/2013/05.17.15.03.08&metadataarepository=dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.31.31>. Acesso em: 18 jul. 2018.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO.,1997. Indicadores de Qualidade das Águas.

CHENG, C. et al. Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake considering spatial and temporal variations. *Environmental monitoring and assessment*, v. 191, n. 2, p. 84, 2019.

CICERELLI, R. E.; GALO, M. de L. B. T. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 259-265, Mar. 2015. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662015000300259&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662015000300259&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 11 Fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p259-265>.

CUNHA, D. G. F. et al. Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 159-168, 2013.

DALY, H. E. Crescimento sustentável? Não, obrigado. *Ambiente & sociedade*, Campinas v. 7, n. 2, p. 197-202, Dez. 2004. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-)

753X2004000200012&lng=en&nrm=iso>. Acessado em:  
24 Abril. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200012>.

DAMASCENO, L. M. O. et al. Aspectos qualitativos da água do Rio Poty na região de Teresina, PI. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 139-148, 2010.

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. 3ª edição, São Paulo: Signus Editora, 2007.

DUAN, H. et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. **Environmental monitoring and assessment**, v. 129, n. 1-3, p. 295-308, 2007.

ESTEVEVES, F. de A. Fundamentos de Limnologia. 3ª edição. **Interciência, Rio de Janeiro**, 2011.

FARIAS, M. S. S. de ; DANTAS NETO, J.; LIMA, V. L. A. de. Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Cabelo: parâmetros físico-químicos. **Revista GEPROS**, n. 1, p. 161, 2011.

FAVARETO, A. da S. **Paradigmas do desenvolvimento rural em questão-do agrário ao territorial**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FAYER, G. C. et al. **Crise hídrica: evolução dos decretos estaduais sobre escassez hídrica em minas gerais**. III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2018.

FERREIRA, R. M. P. et al. Aplicação do sensor MSI/Sentinel-2 na estimativa de componentes óticamente ativos em lagos de planície de inundação amazônica. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais**, p. 3687-3694.

FERREIRA, S. P. Desenvolvimento Sustentável-Cultura e Cidadania. **Horizonte - Revista de Estudos de Teologia e Ciências da Religião**, v. 8, n. 17, p. 178-186, 2010.

FIGUEIREDO, H. P. de et al. Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 2, p. 117, 2019.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; VIEIRA, V. de P. P. B.; MOTA, F. S. B. Avaliação do risco de eutrofização em reservatórios da bacia do Acaraú, Ceará, Brasil. **Revista Tecnologia**, v. 27, n. 2, 2006.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**, 3ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

FLORES, S. S.; MEDEIROS, R. M. V. A Dimensão territorial da sustentabilidade. In: SAQUET, M. A. **Estudos Territoriais na Ciência Geográfica**. 1ª. Ed. São Paulo: Outras Expressões, 2013. p. 129-142.

FRANZ, G. A. S.; CUNHA, C. L. N.; GOBBI, M. F. Eutrofização em um reservatório destinado ao abastecimento público: o caso do reservatório do Iraí-PR. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 2007, 2007.

FRASQUET, M. T. S. et al. Sentinel 2 Analysis of Turbidity Patterns in a Coastal Lagoon. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 2926, 2019.

FURTADO, C. **O mito do desenvolvimento econômico**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1974.

GALO, M.L.B.T. et al. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta daninha**, Viçosa, v. 20, n. spe, p. 7-20, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-83582002000400002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-83582002000400002&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 03 Mai. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582002000400002>.

GALO, M.L.B.T. et al. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta daninha**, Viçosa, v. 20, n. spe, p. 7-20, 2002. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-83582002000400002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-83582002000400002&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 03 Mai. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582002000400002>

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos avançados**, v. 29, n. 84, p. 43-68, 2015.

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semi-árido. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 38-39, dez. 2003. Disponível em <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252003000400021&lng=en&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400021&lng=en&nrm=iso)>.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIRÃO, E. G. et al. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibas pelo emprego da análise da componente principal. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, p. 17-24, 2007.

GIRARDI, R.; PINHEIRO, A.; VENZON, P. T. Parâmetros de qualidade de água de rios e efluentes presentes em monitoramentos não sistemáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, e2, 2019. 10.21168/reg.v16e2.

GNADLINGER, J. **A contribuição da captação de água de chuva para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro - uma abordagem focalizando o povo**. Simpósio Brasileiro de Captação de água de chuva no Semiárido. Campina Grande 2001.

GOMES, M. A. F. **ÁGUA: Sem ela Seremos o planeta Marte de Amanhã. Embrapa Meio Ambiente - INFOTECA-E**, Brasília - DF, 2012. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/921047>>. Acesso em: 15 Maio 2018.

GONÇALVES, V. D.; FERNANDES, C. V. S. Variabilidade espaço-temporal de parâmetros de qualidade da água ao longo de seção de monitoramento do rio Iguacu. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 533-553, 2017.

GP1. **Piauí: Barragem do Estreito terá mais 25% de armazenamento**. 2009. Disponível em: <<https://www.gp1.com.br/noticias/piaui-barragem-do-estreiro-tera-mais-25-de-armazenamento-62283.html>>. Acesso em: 01 abr. 2019.

GRENDAITĖ, D. et al. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. **Geologija. Geografija**, v. 4, n. 1, 2018.

HA, N. T. T. et al. Selecting the Best Band Ratio to Estimate Chlorophyll-a Concentration in a Tropical Freshwater Lake Using Sentinel 2A Images from a Case Study of Lake Ba Be (Northern Vietnam). **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 9, p. 290, 2017.

HUISMAN, J. et al. Cyanobacterial blooms. **Nature Reviews Microbiology**, v. 16, n. 8, p. 471-483, 2018.

HUNTER, P. D. et al. The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. **Limnology and Oceanography**, v. 53, n. 6, p. 2391-2406, 2008.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. Brasília, 31 dez. 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6579#resultado>. Acesso em: 14 maio 2019.

IICA, Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura e Secretária de Estado do Planejamento e das Finanças. **Plano de desenvolvimento sustentável da região do Alto Oeste: Participação da sociedade**. v. 1. Natal, RN, 2006.

JIAO, H. B. et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 19, p. 4267-4276, 2006.

JONES, J.G. A. Guide to Methods for Estimating Microbial Numbers and Biomass in Freshwater. Ambleside: **Freshwater Biological Association Scientific Publication**. v. 39, 1979.

KUBIAK, K. A.; KOTLARZ, J.; MAZUR, A. M. *Monitoring Cyanobacteria Blooms in Freshwater Lakes using Remote Sensing Methods*. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 25, n. 1, 2016.

KUPLICH, T. M. et al. Algumas aplicações de sensoriamento remoto em estudos de vegetação campestre no RS. **Disponível: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.02>**, v. 13, 2016.

KURODA, E. K. et al. Determinação de Clorofila pelo Método Espectrofotométrico Visando o Monitoramento da Eficiência do Tratamento de Águas para. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2005, Campo Grande - MS. Anais [...]. Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2005. Disponível em: [https://www.academia.edu/1218314/I-074\\_DETERMINA%C3%87%C3%83O\\_DE\\_CLOROFILA\\_PELo\\_M%C3%89TODO\\_ESPECTROFOTOM%C3%89TRICO\\_VISANDO\\_O\\_MONITORAMENTO\\_DA\\_EFICI%C3%84NCIA\\_DO\\_TRATAMENTO\\_DE\\_](https://www.academia.edu/1218314/I-074_DETERMINA%C3%87%C3%83O_DE_CLOROFILA_PELo_M%C3%89TODO_ESPECTROFOTOM%C3%89TRICO_VISANDO_O_MONITORAMENTO_DA_EFICI%C3%84NCIA_DO_TRATAMENTO_DE_). Acesso em: 1 out. 2018.

KUTSER, T. et al. Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 497, 2016.

LACERDA, C. de S.; CÂNDIDO, G. A. Modelos de indicadores de sustentabilidade para gestão de recursos hídricos. **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa [online]**. Campina Grande: EDUEPB, p. 13-30, 2013.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo - SP, 2004. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf)>. Acesso em: 05 de jul. de 2018.

LI, Y. et al. Spatiotemporal dynamics of chlorophyll-a in a large reservoir as derived from Landsat 8 OLI data: understanding its driving and restrictive factors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 2, p. 1359-1374, 2018.

LIMA, D. L. et al. Revisão Bibliométrica sobre Turbidez e Sólidos Suspensos por Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 107-116, 2019.

LIMA, D. L. et al. Revisão Bibliométrica sobre Turbidez e Sólidos Suspensos por Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 107-116, 2019.

LOPES, F. B. et al. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016.

LOPES, H. et al. Análise espaço-temporal da Clorofila-A no reservatório de Itaparica por meio de imagens Landsat-TM. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. doi: online INPE, p. 6628-6635, 2013.

LOPES, O. F. et al. Influence of land use on trophic state indexes in northeast Brazilian river basins. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 2, p. 77, 2019.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2015.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & sociedade**, Campinas, v. 6, n. 2, p. 121-136, Dez. 2003. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2003000300008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2003000300008&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 02 Mar. 2019. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2003000300008>.

MACHADO, M. T. de S.; BAPTISTA, G. M. de M. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, 2016.

MAIA, A. A. D.; CARVALHO, S. L. de; CARVALHO, F. T. de. Comparação de dois índices de determinação do grau de trofia nas águas do Baixo Rio São José dos Dourados, São Paulo, Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 613-622, dez. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522015000400613&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000400613&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em: 25 Apr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020040121258>.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, São Paulo , v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008 . Disponível em: Acesso em: 17 Agosto 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>

MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 1973-1985, Ago. 2018. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 02 Mar. 2019.

MARTINI, L. C. P. et al. Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila<sub>a</sub> na Lagoa da Conceição-Florianópolis, SC. **Eng. sanit. ambient**, v. 11, n. 4, p. 318-324, 2006.

MATORIN, D. N. et al. Chlorophyll fluorimetry as a method for studying light absorption by photosynthetic pigments in marine algae. *Oceanologia*, v. 46, n. 4, p. 519–531, 2004. Disponível em: <<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/464mator.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

MATTHEWS, et al. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 637-652, 2012.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MINHONI, R. T. de A. et al. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de macrófitas aquáticas no reservatório de barra Bonita, SP. *Irriga*, v. 22, n. 2, p. 330, 2018.

MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394-406, 2012.

MOAL, M. L. et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle?. **Science of the total environment**, v. 651, p. 1-11, 2019.

MORETTI, E. C.; MARINHO, V. L. F. Os caminhos das águas: As políticas públicas ambientais e criação dos Comitês de Bacias Hidrográficas. *Geosul*, v. 28, n. 55, p. 123-142, 2013.

MORETTO, D. L. et al. Calibration of water quality index (WQI) based on Resolution nº 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 29-42, 2012.

MOSES, W. J. et al. Satellite estimation of chlorophyll-A concentration using the red and NIR bands of MERIS —The Azov sea case study. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 4, p. 845-849, 2009.

MOURA, F. C. de et al. Effect of aqueous extracts from the clove (*Syzygium aromaticum*) on chlorophyll content and breath in seedlings of Cabbage (*Brassica oleracea*). **Eclética Química**, v. 38, p. 123-127, 2013.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto-Princípios e Aplicações, 4ª edição. **São Paulo: Edgard Blücher**, 2010.

NUSCH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Hydrobiol. Belh. Ergebn. Limnol.*, v. 14, p. 14-36, 1980.

OLIVEIRA FILHO, A. A. de; LIMA NETO, I. E. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, 2018.

OLIVEIRA FILHO, A. A. de; LIMA NETO, I. E. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 3-14, 2018.

ONU. Nações Unidas Brasil. S.d. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>

PAERL, H. W. et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy. **Water research**, v. 45, n. 5, p. 1973-1983, 2011.

PAERL, H. W.; HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental microbiology reports*, v. 1, n. 1, p. 27-37, 2009.

PAGE, B. P.; KUMAR, A.; MISHRA, D. R. A novel cross-satellite based assessment of the spatio-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 66, p. 69-81, 2018.

PALMER, S. C. J.; KUTSER, T.; HUNTER, P. D. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 157, p. 1-8, fev. 2015.

PASTORE, J. Teorias de desenvolvimento econômico: problemas metodológicos. **Revista Administração de Empresas**, São Paulo, v. 7, n. 23, p. 25-48, Junho 1967. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75901967000200001&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75901967000200001&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 25 Mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-75901967000200001>.

PATRA, P. P. et al. Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states in Nalban Lake of East Kolkata Wetland, India from Landsat 8 OLI data. **Spatial Information Research**, v. 25, n. 1, p. 75-87, 2017.

PIAUI, G. D. Caracterização do Semi-árido piauiense. **Semiarido**, 2018. Disponível em: <[http://www.semiarido.pi.gov.br/conheca\\_mais.php](http://www.semiarido.pi.gov.br/conheca_mais.php)>. Acesso em: 19 jun. 2018.

PIAUI, S. D. M. A. D. E. D. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Piauí: Relatório Síntese**. SEMAR. Teresina. 2010.

PIAUI. **Decreto Nº 14.143 - Dispõe sobre o Enquadramento dos Corpos Hídricos de Domínio Estadual**. SEMAR. 2010.

POMPÊO, M. et al. Kit clorofila-A – Uma proposta de método de baixo custo na estimativa do índice de estado trófico com base nos teores de clorofila. **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da USP., v. 1, p. 411-420, 2015.



PONZONI, F.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T. Sensoriamento remoto da vegetação. atualizada e ampliada. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2012.

RIBEIRO, G. L. Ambientalismo e desenvolvimento sustentado: ideologia e utopia no final do século XX. **Ciência da informação**, v. 21, n. 1, 1992.

RIBEIRO, P. E. A. M.; HORA, M. A. G. M. 20 anos da lei nº 9.433/97: percepções dos comitês de bacia hidrográfica e dos órgãos gestores acerca da implementação da política nacional de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, e1, 2019. <https://dx.doi.org/10.21168/reg.v16e1>.

RIVERA R., C. et al. Comparison of Spectrophotometric and Fluorometric Measurements of Chlorophyll-a. **Acta biol.Colomb.**, Bogotá, v. 10, n. 2, p. 95-103, Dec. 2005. Disponível em <[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-548X2005000200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2005000200007&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 18 Mai 2019.

ROCHA JÚNIOR, C. A. N. da et al. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 30, 2018.

RODRIGUES, T. W. P. et al. Comparação entre métodos empíricos para estimativa da concentração de clorofila-A em reservatórios em Cascata (Rio Tietê, São Paulo). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, 2015.

ROSSI, R. A.; SANTOS, E. Conflito e regulação das águas no Brasil – a experiência do Salitre. **Cad. CRH**, Salvador, v. 31, n. 82, p. 151-167, Abril. 2018. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-49792018000100151&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-49792018000100151&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 02 Maio 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-49792018000100010>.

SACHS, I. **Caminho para o desenvolvimento sustentável**. Org. STROH, P. Y. Garamond, Rio de Janeiro, 2009.

SALAS, H. J.; MARTINO, P. **Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales**. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Programa Regional CEPIS/HPE. OPS OPS/CEPIS/PUB/01, 2001.

SANTOS, A. C. A. dos et al. Comparison of three methods for Chlorophyll determination: Spectrophotometry and Fluorimetry in samples containing pigment mixtures and spectrophotometry in samples with separate pigments through High Performance Liquid Chromatography. **Acta Limnol. Bras**, v. 15, n. 3, p. 7-18, 2003.

SANTOS, S. R. Q. dos; CUNHA, A. P. M. do A.; RIBEIRO NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SARTORI, S.; LATRONICO, F.; CAMPOS, L. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & sociedade**, v. 17, n. 1, 2014.

SILVA, A. E. P. et al. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. **Acta amazônica**, v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008.

SILVA, D. A.; NELSON, A. V. M.; SILVA, M. A. R. Do Desenvolvimento como crescimento econômico ao desenvolvimento como liberdade: a evolução de um conceito. **Desenvolvimento em Questão**, v. 16, n. 42, 2018.

SILVA, E. D. J. D.; COELHO, F.; SILVA, W. P. D. Sensoriamento Remoto no Monitoramento da Qualidade dos Recursos Hídricos. **Cadernos UNIFOA**, Volta Redonda, p. 33, Abr 2017. Disponível em: <<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/437/1159>>. Acesso em: 15 Abril 2018.

SILVA, M. B.; HERREROS, M, M, A, G.; BORGES, F, Q. Gestão integrada dos recursos hídricos como política de gerenciamento das águas no Brasil. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 10, n. 1, p. 101-115, 2017.

SILVA, R. M. A. da. **Entre o combate à seca e a convivência com o semi-árido: transições paradigmáticas e sustentabilidade do desenvolvimento**. 2006. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília.

SOBRAL, et al. Comportamento espacial da Clorofila-A no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, 2016.

SPINOLA, C. de A.; VITORIA, F.; CERQUEIRA, L A Lei das Águas e o São Francisco: Os Limites da Gestão descentralizada dos Recursos Hídricos No Brasil. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 18, n. 33, 2016.

STREIT, N. M. et al. Como clorofilas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, junho de 2005. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 10 de abril de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000300043>

SUDENE. Delimitação do semiárido. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. S.d.

TOLEDO JÚNIOR et al. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 12., Camboriú, 1983. **Anais...** Camboriú, 1983. p. 1-34.

TOLEDO JÚNIOR, A.P. **Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de açudes de regiões quentes tropicais**. 1990. São Paulo: CETESB, 1990. (Relatório interno).

TOMING, K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016.

TOMMING, K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016.

TRINDADE, P. B. C. B.; MENDONÇA, A. S. F. Eutrofização em Reservatórios-Estudo de Caso: Reservatório de Bonito (ES). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, 2014.

TUNDISI, J. G. Água no século 21: enfrentando a escassez. **RIMA/IIIE**, 2003. 247p

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

TUNDISI, J. G. et al. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. Rio de Janeiro: **Academia Brasileira de Ciências**, p. 47, 2014.

USGS. Missions Sentinel-2. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

VEIGA, J. E. da. **O prelúdio do desenvolvimento sustentável**. 2005.

VENTURA, D. L. T. **Uso do sensoriamento remoto para monitoramento da concentração de clorofila a em açudes do semiárido**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília.

VICTORINO, C. J. A. Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos. Porto Alegre: **Edipucrs**, 2007.

VIEIRA, V. et al. **A Água e o Desenvolvimento Sustentável no Nordeste**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2000.

VILELA, M. A. M. A. **Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto**. 2010. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14144/1/MetodologiaMonitoramentoQualidade.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

VITTE, C. de C. S.; KEINERT, T. M. M. **Qualidade de vida, planejamento e gestão urbana: discussões teórico-metodológicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

VON SPERLING, E.; FERREIRA, A. C. da S.; GOMES, L. N. L. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. **Desalination**, v. 226, n. 1-3, p. 169-174, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

WANG, X.; GONG, Z.; PU, R. Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 10, p. 620, 2018.

WATANABE, F. et al. Parametrization and calibration of a quasi-analytical algorithm for tropical eutrophic waters. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 121, p. 28-47, 2016.

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

WOLKMER, M. de F. S.; PIMMEL, N. F. Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental. **Sequência (Florianópolis)**, n. 67, p. 165-198, 2013.

WRIGHT, S. W. Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, v. 77, p. 183-196, 1991.

YANG, X. et al. *Mechanisms and assessment of water eutrophication*. **Journal of Zhejiang University Science B**, v. 9, n. 3, p. 197-209, 2008.

YOUNG, C. E. F. et al. A questão ambiental no esquema centro-periferia. **Economia**, v. 4, n. 2, p. 201-221, 2003.

ZHANG, Y. et al. Satellite analysis to identify changes and drivers of CyanoHABs dynamics in Lake Taihu. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 5, p. 1451-1466, 2016.

## 5 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA INTERNACIONAL SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA E O SENSORIAMENTO REMOTO

**Resumo:** Foi realizado estudo bibliométrico, considerando-se análise da produção científica internacional nos últimos dez anos. Na base de dados científicos *web of scienc*, foram realizadas consultas e filtros em função dos termos “*remote sensin*”, “*water quality*”, “*eutrophic*”, “*chloroph\**”. Foram aplicados filtros para eliminar trabalhos repetidos e adequar a problemática estudada. Por fim, foram analisados o total de 3.797 trabalhos distribuídos em todo mundo. Na análise das palavras-chave foi notória a inter-relação entre o sensoriamento remoto, clorofila, fitoplânctons, todas associadas à eutrofização em ambientes aquáticos. O maior volume de trabalhos foram artigos científicos, escritos em língua inglesa, por estudiosos dos Estados Unidos e China. O Brasil se mostrou em um estágio intermediário em relação a quantidade de publicações.

**Palavras-chave:** Bibliometria. Clorofila. Eutrofização. Recursos hídricos.

### BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF INTERNATIONAL SCIENTIFIC PRODUCTION ON THE QUALITY OF WATER AND REMOTE SENSING

**Abstract:** A bibliometric study was carried out, considering an analysis of international scientific production in the last ten years. In the scientific database *web of scienc*, queries and filters were performed according to the terms “*remote sensin*”, “*water quality*”, “*eutrophic*”, “*chloroph \**”. Filters were applied to eliminate repeated work and adapt the studied problem. Finally, a total of 3,797 works distributed around the world were analyzed. In the analysis of the keywords, the interrelationship between remote sensing, chlorophyll, phytoplankton was notorious, all associated with eutrophication in aquatic environments. The largest volume of papers were scientific articles, written in English, by scholars from the United States and China. Brazil proved to be at an intermediate stage in relation to the number of publications.

**Keywords:** Bibliometrics. Chlorophyll. Eutrophication. Water resources.

### ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA Y LA DETECCIÓN REMOTA

**Resumen:** Se realizó un estudio bibliométrico, considerando un análisis de la producción científica internacional en los últimos diez años. En la base de datos científica *web de scienc*, las consultas y los filtros se realizaron de acuerdo con los términos “*teledetección*”, “*calidad del agua*”, “*eutrófico*”, “*clorofo \**”. Se aplicaron filtros para eliminar el trabajo repetido y adaptar el problema estudiado. Finalmente, se analizaron un total de 3.797 obras distribuidas en todo el mundo. En el análisis de las palabras clave, la interrelación entre la teledetección, la clorofila y el fitoplancton fue notoria, todos asociados con la eutrofización en ambientes acuáticos. El mayor volumen de artículos fueron artículos científicos, escritos en inglés, por académicos de los Estados Unidos y China. Brasil demostró estar en una etapa intermedia en relación con el número de publicaciones.

**Palabras clave:** Bibliometría. Clorofila. Eutrofización. Recursos hídricos.

## 5.1 Introdução

O crescimento populacional desordenado em conjunto com o desenvolvimento das cidades culmina em uma série de problemas hídricos, sobretudo, de infra-estrutura e perda da qualidade da água (TUCCI, 2008). O uso dos recursos hídricos de forma desmedida, exacerbada e sem o devido controle, contribui para um alarmante quadro de uma futura crise hídrica (MACHADO, 2003). Tal crise é entendida por autores como Fayer et al. (2018) como a diminuição na qualidade e quantidade de água doce disponível para o consumo, o que gera grandes prejuízos para a sociedade.

Com a realização do Fórum Econômico Mundial (2017), a crise hídrica global obteve uma mudança de patamar quanto aos riscos mundiais, passando de um risco ambiental para a categoria de risco social, terceira posição na Tabela de riscos (FAYER et al., 2018). O risco social se justifica ao analisar que a escassez dos recursos hídricos gera instabilidade nas produções, no abastecimento de água, saneamento básico e na saúde pública, causando vulnerabilidade no crescimento sustentável e desequilíbrio social (TUNDISI, 2014).

Desde 2016, vigora a Agenda 2030, nela são definidos 17 objetivos e 169 metas que devem ser implantadas até 2030 em prol do desenvolvimento sustentável. Dentre esses objetivos, a água é uma temática recorrente, contudo o objetivo número seis, traz em seu texto a meta de assegurar alguns pontos importantes para a sociedade, como a disponibilidade hídrica, a gestão sustentável da água e o saneamento básico para todos (ONU, 2015).

Para alcançar tal objetivo e diminuir a possibilidade de uma crise hídrica, é necessário o monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos (MORETTI; MARINHO, 2013; TUNDISI, 2014; FAYER et al., 2018), principalmente no aspecto qualitativo dos recursos hídricos (LOPES et al., 2016). Fatores endógenos e exógenos ao meio ambiente podem causar alterações na qualidade da água (VON SPERLING; FERREIRA; GOMES, 2008), entre os problemas de qualidade da água, a eutrofização é o mais recorrente (LE et al., 2019), considerado o principal impacto qualitativo da água (PAERL et al., 2011).

A eutrofização é um processo natural, e ou, artificial (ESTEVES, 2011), de incremento na quantidade de nutrientes em um ambiente aquático (ESTEVES, 2011; YANG et al., 2008; LE et al., 2019), resultando em alterações nos ecossistemas aquáticos (FIGUEIRÊDO, 2019). O processo de eutrofização pode causar muitos prejuízos, tornando os corpos hídricos impróprios para utilização como fonte de abastecimento de água, geração de energia, desenvolvimento da piscicultura, do turismo e lazer (ESTEVES, 2011; PAERL; HUISMAN, 2009).

Uma forma de mensurar quantitativamente a eutrofização é por meio da aferição da concentração da clorofila-a (ESTEVES, 2011; MOSES et al., 2009; HA et al., 2017), um pigmento que existe em todos os organismos fotossintético (STREIT et al., 2005; DUAN et al., 2007; WANG; GONG; PU, 2018).

O monitoramento da eutrofização utilizando a clorofila-a como variável principal, é realizado comumente *in situ*, entretanto, essa metodologia não apresenta uma visão do , exprimindo, apenas uma realidade local (ZHANG et al., 2016), não sendo o suficiente para o monitoramento de grandes espaços geográficos (BODULLA et al., 2016). O sensoriamento remoto, tecnologia que possibilita a aquisição de imagens e outros dados da superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012), vem sendo utilizado como metodologia alternativa para o monitoramento de corpos aquáticos (BRESCIANI et al., 2012, TOMING et al., 2016; GRENDALTE et al., 2018), pela sua capacidade em fornecer um monitoramento constante e sinóptico (HUNTER et al., 2008).

Neste sentido, torna-se necessário a investigação de como a produção científica mundial tem retratado a utilização do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água, especialmente, no que tange o processo de eutrofização dos recursos hídricos. Assim, foi realizada uma análise bibliométrica com dados provenientes na base *Web of Science*, durante o período de 2010 a 2020.

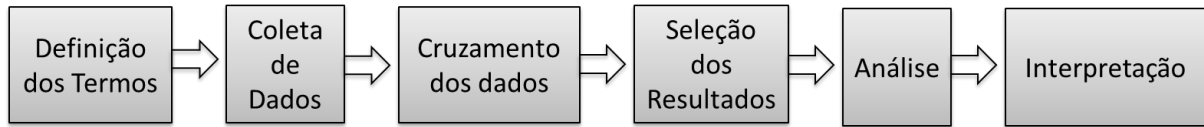
## 5.2 Metodologia

A presente pesquisa buscou discutir como a produção científica mundial vem retratando o uso do sensoriamento remoto para a identificação do processo de eutrofização nos mais variados ambientes aquáticos, desse modo à referida pesquisa tem caráter quantitativo-descritivo.

A Figura 15 ilustra as etapas desenvolvidas durante o estudo. Inicialmente, foram definidos os termos pesquisados de acordo com a sua relevância para a temática analisada *remote sensing* (sensoriamento remoto), *water quality* (qualidade da água), *eutrophic* (eutrofização), *chloroph\** (clorofila) or *CHLA*.

A coleta de dados foi realizada em uma base bibliográfica internacional multidisciplinar (*Web of Science*), responsável pela busca de trabalhos durante o horizonte temporal de 2010 a 2020. Todos os termos utilizados na pesquisa foram na língua inglesa, por ser mais abrangente no contexto internacional.

Figura 15 – Etapas do estudo bibliométrico



Fonte: Elaborado pelos autores

Dentro da própria base de dados, foram realizados cruzamentos dos resultados de cada termo pesquisado, possibilitando a escolha da combinação que melhor representa o estudo.

Com a finalidade de realizar as análises das informações, utilizou-se o software *VOSviewer 1.6.13* e a própria base de dados *Web of Science*, para desenvolver os métodos de análise bibliométricos *citation analysis* (análise de citações), *cocitation-analysis* (análises de co-citações), *bibliographic coupling* (acoplamento bibliográfico), *co-author analysis* (análise de co-autoria) e *co-word* (palavras-chave), propostos por Zupic e Ater (2014), possibilitando as interpretações discutidas nesse trabalho.

### 5.3 Desenvolvimento

A bibliometria é uma área de estudo que tem grande relevância quanto a sua forma de analisar a produção da ciência em nível global, seus parâmetros e ponderações conseguem representar o desempenho e desenvolvimento de um determinado campo do conhecimento (ARAÚJO; ALVARENGA, 2011). Nesse sentido, após a realização da busca pelos termos estudados na base de dados *Web of Science*, constatou-se a presença de 195.733 artigos, indicando que esse campo do conhecimento está em pleno desenvolvimento.

Na Tabela 6, é possível visualizar que as áreas do sensoriamento remoto, qualidade da água e clorofila têm grande gama de trabalhos dentro da base da *Web of Science*, representando cerca de 96% do total dos trabalhos, contudo a quantidade de trabalhos sobre eutrofização foi mais escassa. Ainda com base na Tabela 6, pode-se constatar como a qualidade da água está, estreitamente, associada à eutrofização nos ambientes aquáticos. Por esta razão, constitui um tema amplamente discutido nos últimos anos, abordado em diversos campos da ciência.



Tabela 6 – Resultados dos termos pesquisados na base de dados Web of Science

<b>Termo Pesquisado</b>	<b>Resultados</b>
Remote Sensing	69.789
Water Quality	51.596
Eutrophic	7.315
Chloroph* or CHLA	67.033

Fonte: Elaborado pelos autores

A utilização dos termos de forma individual resulta na assimilação de dados que não têm relação com a temática estudada. Assim, a combinação dos termos tornou a pesquisa mais restritiva, com maior enfoque na temática (Tabela 7). Nota-se que os estudos de sensoriamento remoto não têm muita significância quando associados à eutrofização. Entretanto, é perceptível a relação entre a eutrofização e a clorofila, além disso, a maioria dos estudos utiliza o sensoriamento remoto em conjunto com a clorofila.

Tabela 7 – Refinamento dos termos pesquisados

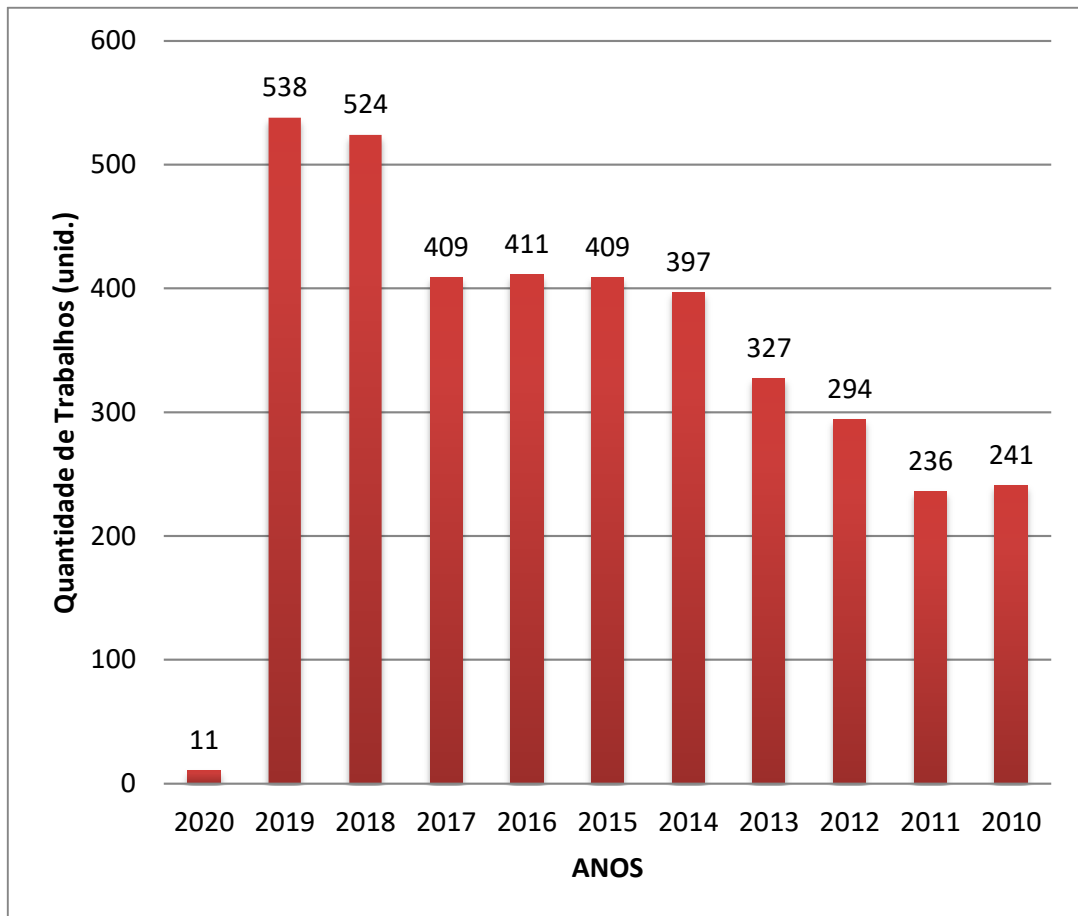
<b>Combinação dos Termos</b>	<b>Resultado</b>
Remote Sensing + Water Quality	1.489
Remote Sensing + Eutrophic	222
Remote Sensing + Chloroph* or CHLA	3.797
Water Quality + Eutrophic	1.456
Water Quality + Chloroph* or CHLA	3.246
Eutrophic + Chloroph* or CHLA	1.423

Fonte: Elaborado pelos autores

Com o refinamento dos termos, foram selecionados os 3.797 trabalhos referentes à relação entre sensoriamento remoto e clorofila, distribuídos em sua grande maioria em *article* (artigos), *proceedings paper* (artigos em anais de eventos) e *review* (revisões), correspondendo respectivamente a 83%, 13% e 2% do total de artigos coletados.

Na Figura 16 pode-se observar a distribuição temporal desses trabalhos. É possível afirmar que a discussão dessa temática vem crescendo linearmente nos últimos dez anos. Os anos de 2018 e 2019, especificamente, tiveram o maior volume de trabalhos, embora o 2020 ainda se encontre no início, já é possível visualizar que a temática continuará em ascensão durante o decorrer do ano.

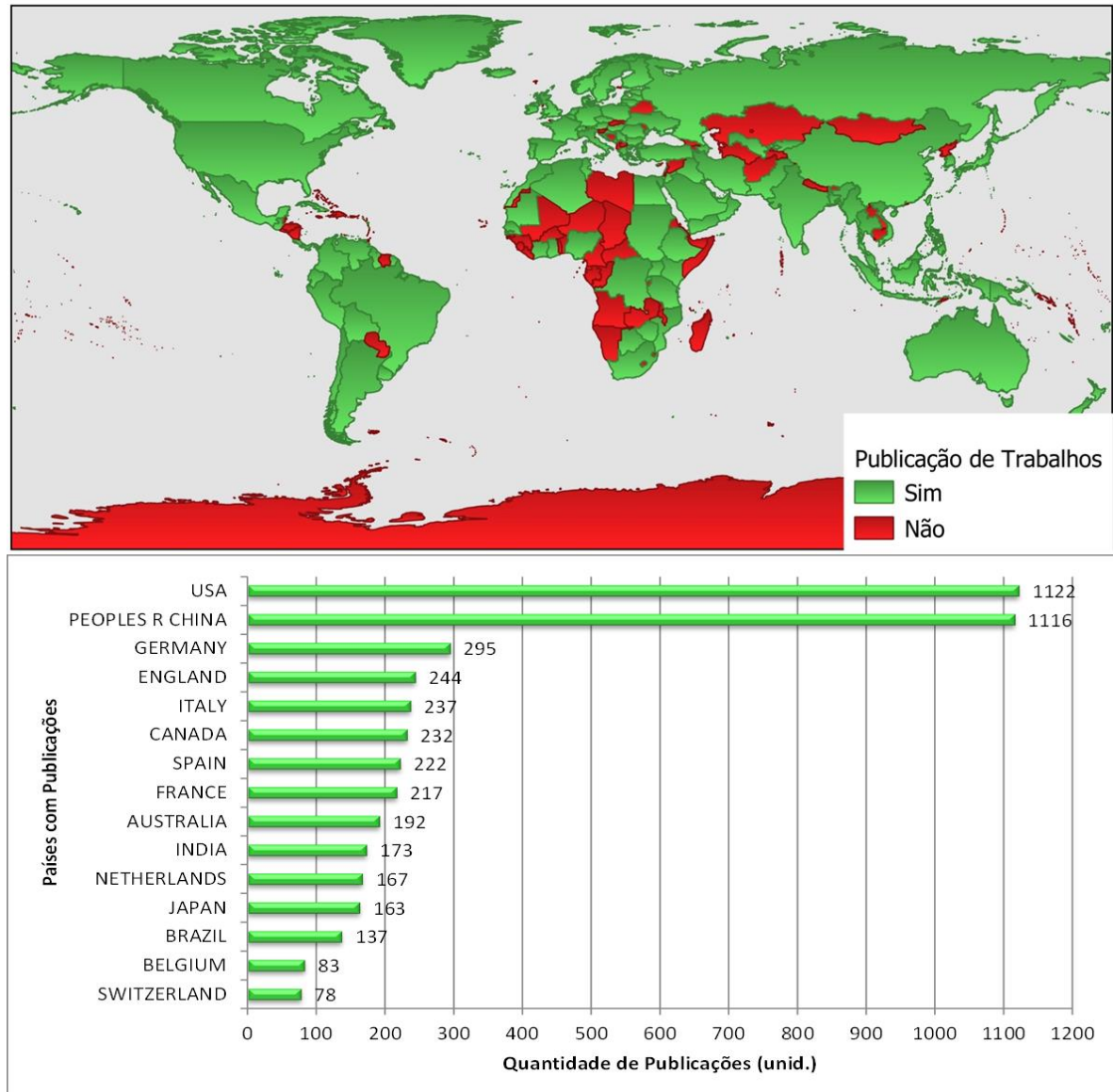
Figura 16 – Distribuição anual da quantidade de trabalhos



Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

Na Figura 17, se encontra a distribuição quantitativa de trabalhos pelo mundo, e apresenta os 15 países que mais publicaram sobre a temática durante o período analisado. Fica nítido que a temática é estudada mundialmente, comprovando que a eutrofização é um problema que tem preocupado todo o mundo conforme destacado por Yang et al. (2008), que poucos países ainda não se atentaram para esse sério problema de qualidade da água. Entretanto, países como Estados Unidos e a China têm demonstrado um grande interesse na área. Isto se comprova com o percentual de trabalhos publicados pelos dois países, ambos com 29%. Fazendo o somatório da publicação desses dois países, pode-se afirmar que eles detêm mais da metade dos trabalhos que investigam a clorofila a partir de tecnologias do sensoriamento remoto.

Figura 17 – Quantidade de trabalhos por países que publicaram durante o período pesquisado



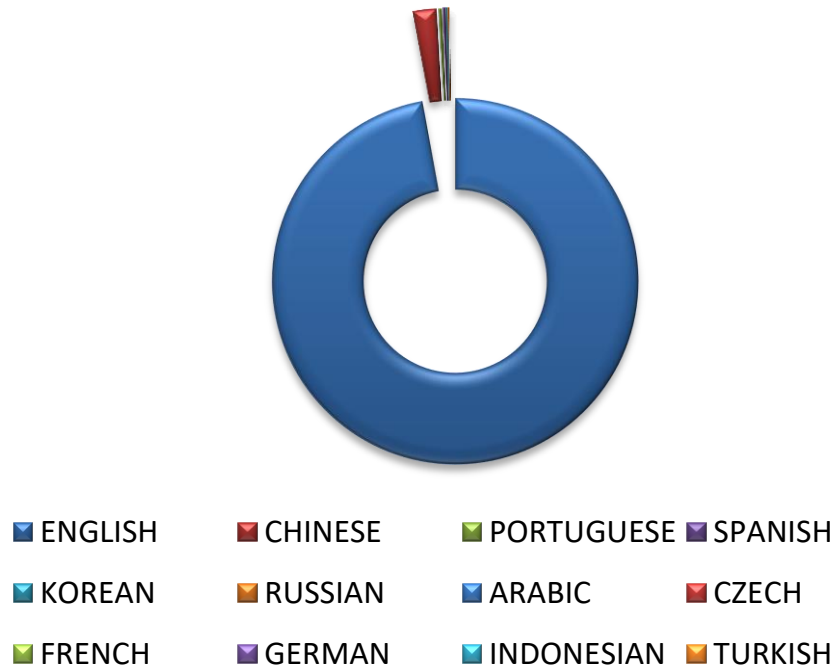
Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

Outros países europeus, como a Alemanha, Inglaterra e Itália também tem destaque na produção científica nessa área de estudo. O Brasil por sua vez, é o país que se encontra na 13ª posição do ranking, melhor colocação de um país sul-americano.

Embora esses trabalhos científicos tenham sido elaborados em diversas partes do mundo, durante a análise bibliométrica, confirma-se a universalização da língua inglesa perante a comunidade científica que aborda esses temas. De todos os trabalhos considerados na análise bibliométrica, 97% foram escritos em língua inglesa, 2% em chinês e o restante dos 1% encontra-se dividido entre outros idiomas (Figura 18), desse restante apenas 0,2% foram

escritos em português o que corresponde ao total de somente 10 trabalhos, mostrando que os pesquisadores brasileiros publicam em sua maioria em alguma língua estrangeira.

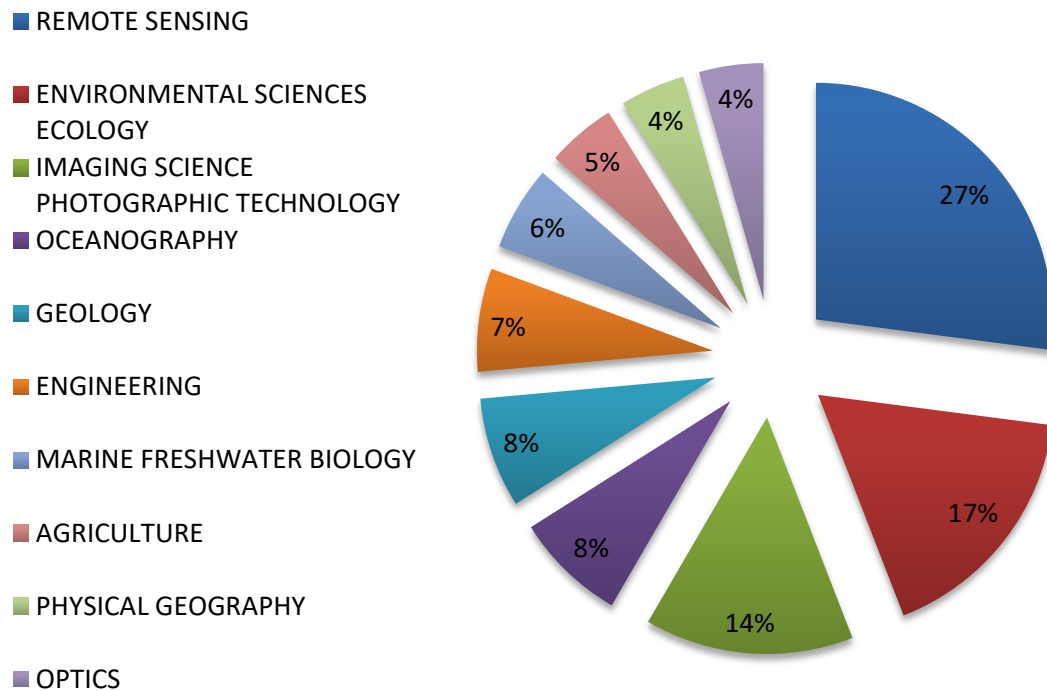
Figura 18 – Idiomas mais utilizados nos trabalhos analisados



Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

A presente temática é bastante diversa. Entre os trabalhos analisados, foram identificadas o total de 37 áreas de pesquisas. A Figura 19 estão apresentadas as 10 áreas que mais publicaram artigos relacionados à temática estudada. É perceptível que o maior percentual de trabalhos publicados (27%) está concentrado na área do conhecimento do sensoriamento remoto, logo em seguida tem destaque a categoria ecologia das ciências ambientais, com 17% do percentual de publicações e tecnologia fotográfica de ciência da imagem com 14%, as demais categorias apresentaram percentuais inferiores a 10% do total de publicações.

Figura 19 – Áreas de pesquisa na qual os trabalhos foram enquadrados

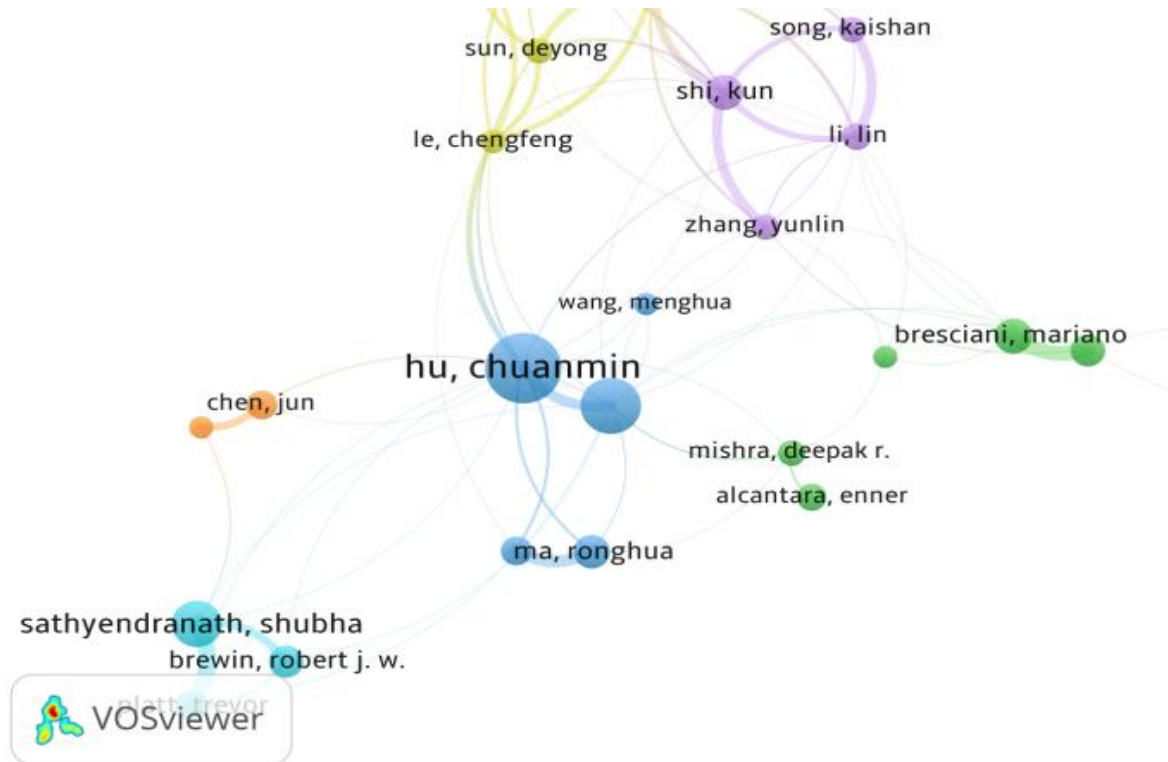


Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

Quanto à autoria desses trabalhos, foram catalogados o total de 11.998 autores, e 35 desses autores têm no mínimo 20 trabalhos escritos com essa temática. Esses autores possuem uma relação de coautoria uns com os outros, como pode ser observado na Figura 20.

Na Figura 20, o tamanho dos círculos é proporcional à quantidade de trabalhos publicados por cada autor, as linhas mostram as inter-relações entre os autores e as cores representam os *clusters*, ou seja, o agrupamento da rede de citações entre os autores, quem citou quem. Na imagem é notório que no geral, a rede de autores se relaciona entre si, alguns com relações mais fortes e outros com menor força. Nela fica explícito que os autores Chuanmin Hu, Zhongping Lee e Yunmei Li possuem as maiores quantidades de trabalhos, respectivamente, 67, 52, 41 documentos. O número de citações de cada autor indica o nível de influência que esse autor tem perante a comunidade científica que estuda essa temática, assim é possível afirmar que Chuamin Hu, José Moreno, Shubha Sathyendranath são alguns dos autores que são referências nessa área da ciência.

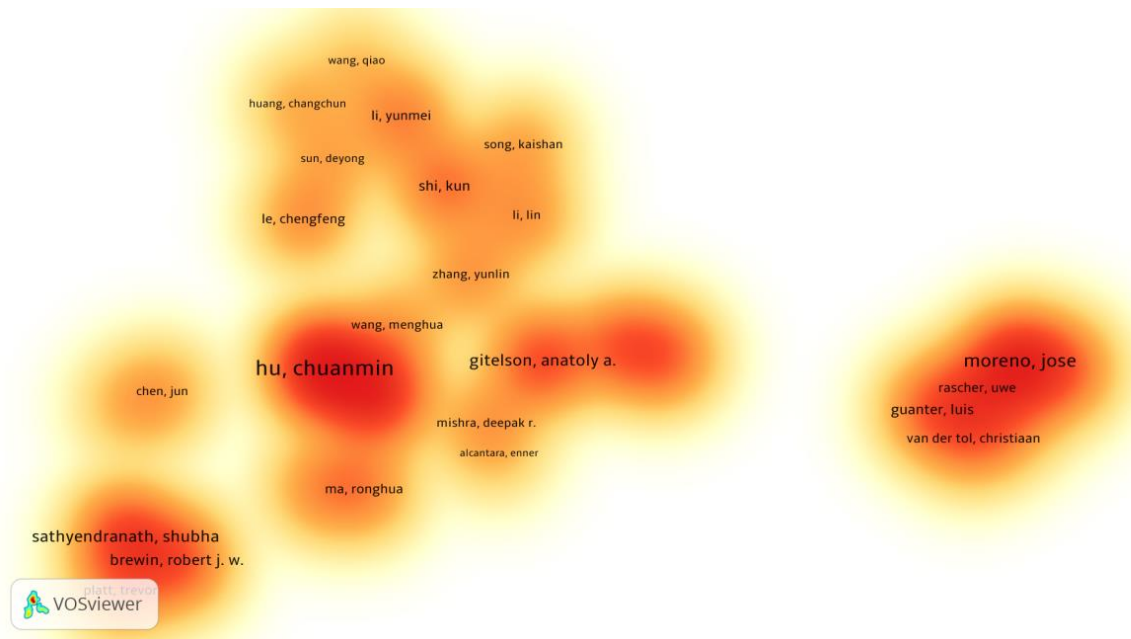
Figura 20 – Relação de autores e rede de co-autoria



Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

No filtro de acoplamento bibliográfico, foram acoplados documentos que tem no mínimo 100 citações em outros trabalhos, resultando no total de 57 documentos. Assim, para cada um dos 57 documentos, foi calculada a força total dos links de acoplamento bibliográfico com outros documentos, Figura 21.

Figura 21 – Relação de citações



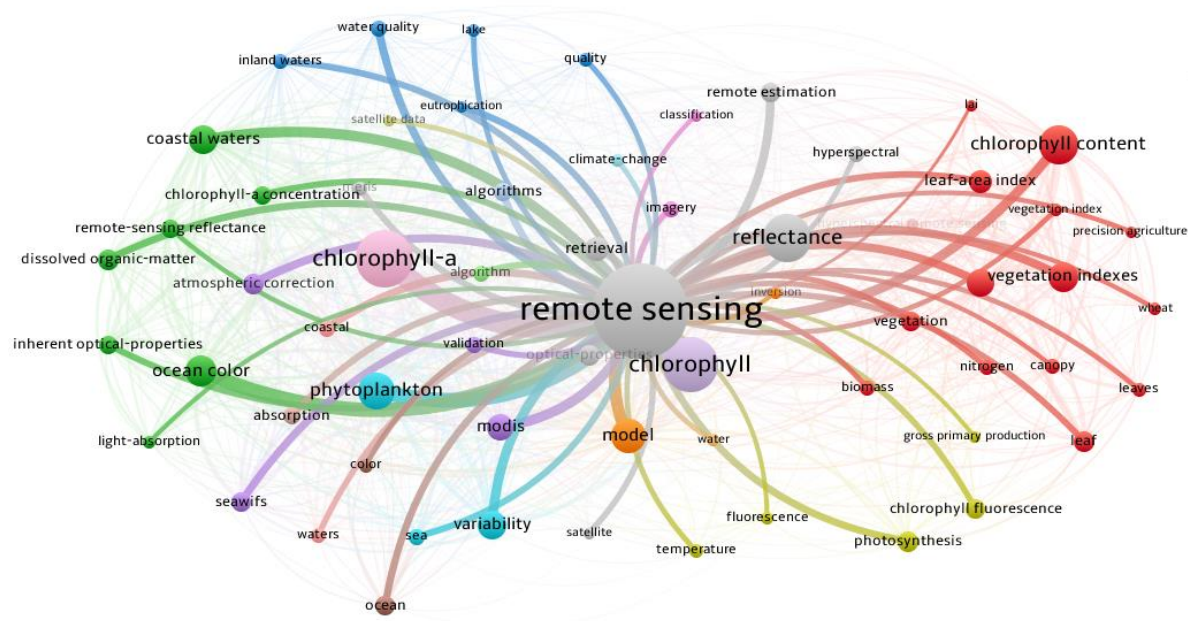
Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019)

A bibliometria é uma área de estudo que permite mapear a fundamentação de conceitos e temas, por meio dela é possível identificar as correntes teóricas que estão em destaque dentro das temáticas estudadas (CHUEKE; AMATUCCI, 2015). Segundo Zupic e Ater (2014), as *keywords* permitem identificar as palavras que mais têm sido utilizadas ao longo do período estudado, desse modo, no período de referência dessa pesquisa, foram utilizadas o total de 11840 *keywords*, dentre essas palavras 63 foram repetidas no mínimo 100 vezes (Figura 22). Como está em destaque na Figura 22, as palavras “*remote sensing*”, “*chlorophyll*”, “*reflectance*”, “*phytoplankton*”, são as mais recorrentes nessas publicações analisadas.







Figura 23 – Relação entre as *keywords*

Fonte: Adaptado da *Web of Science* (2019).

Percebe-se ainda que outros fatores causam grandes impactos no estudo dessa temática, dentre elas, reflectância, os índices de vegetação, a variabilidade de elementos atmosféricos e da temperatura. Além disso, são identificadas duas vertentes do estudo da clorofila pelo uso do sensoriamento remoto, a primeira relacionada a águas costeiras e a outra a águas oceânicas.

#### 5.4 Considerações finais

O estudo bibliométrico permitiu ter um panorama da temática dentro do limite espaço-temporal definido, possibilitando a análise e identificação de diversos aspectos que influenciam a pesquisa científica nesse campo da ciência.

Diante do que foi exposto é possível afirmar que o estudo da qualidade da água por meio do sensoriamento remoto tem se expandido ao longo dos últimos dez anos, sobretudo em países como Estados Unidos e China, e que ainda há uma tendência de crescimento na quantidade de pesquisas nessa área. Foi confirmada a supremacia da língua inglesa nas publicações dessa temática.

Além disso, foi possível constatar que a qualidade da água está intrinsicamente relacionada à eutrofização dos corpos hídricos e essa, por sua vez, a comunidade fitoplanctônica e a clorofila. Talvez por esse motivo, existem poucos trabalhos específicos sobre eutrofização.

Com a análise dos textos mais citados foi possível concluir que em função das palavras-chave mais utilizadas, todos os textos possuem a mesma linha de raciocínio, sempre utilizando o sensoriamento remoto, como meio de analisar, identificar e mensurar a concentração de clorofila em determinado corpo aquático e essa por sua vez, ser relacionada com a eutrofização desses ambientes.

## 5.5 Referências

ARAÚJO, R. F.; ALVARENGA, L. A bibliometria na pesquisa científica da pós-graduação brasileira de 1987 a 2007. **Enc. Bibli: Revista Eletrônica Biblioteconomia e ciência da informação**. Florianópolis, v.16, n. 31, p.51-70, 2011.

BODDULA, V. et al. Data driven analysis of Algal Bloom activity for effective Water Sustainability. In: **IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom)(BDCloud-SocialCom-SustainCom)**. **IEEE**, 2016. p. 424-430.

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. **Internext – Revista eletrônica de negócios internacionais da ESPM**, v.10, n.2, p.1-5, 2015.

DUAN, H. et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. **Environmental monitoring and assessment**, v. 129, n. 1-3, p. 295-308, 2007.

ESTEVEZ, F. de A. **Fundamentos de limnologia**. Interciência, 1998.

FAYER, G. C. et al. Crise hídrica: evolução dos decretos estaduais sobre escassez hídrica em minas gerais. **Simpósio de recursos hídricos da bacia do rio paraíba do sul**, Juiz de Fora - MG, v. 3, p. 1-10, 2018. Disponível em:<<https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/abrh/Eventos/Trabalhos/76/A0009.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2018.

FIGUEIREDO, H. P. de et al. Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 2, p. 117, 2019.

GRENDAITÈ, D. et al. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. **Geologija. Geografija**, v. 4, n. 1, 2018.

HA, N. T. T. et al. Selecting the Best Band Ratio to Estimate Chlorophyll-a Concentration in a Tropical Freshwater Lake Using Sentinel 2A Images from a Case Study of Lake Ba Be (Northern Vietnam). **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 9, p. 290, 2017.

HUNTER, P. D. et al. The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. **Limnology and Oceanography**, v. 53, n. 6, p. 2391-2406, 2008.

LE, M. M. et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle?. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1-11, 2019.

LOPES, F. B. et al. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agro@ambiente. On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambient. soc.**, Campinas, v. 6, n. 2, p. 121-136, Dez. 2003. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414753X2003000300008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414753X2003000300008&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 02 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2003000300008>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MORETTI, E. C.; MARINHO, V. L. F. Os caminhos das águas: As políticas públicas ambientais e criação dos Comitês de Bacias Hidrográficas. **Geosul**, v. 28, n. 55, p. 123-142, 2013.

MOSES, W. J. et al. Satellite estimation of chlorophyll-A concentration using the red and NIR bands of MERIS —The Azov sea case study. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 4, p. 845-849, 2009.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - ONU BR. **Secretário-geral da ONU apresenta síntese dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável pós-2015**. Publicado em: 4 dez. 2014. Atualizado em: 01 set. 2015.

PAERL, H. W. et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy. **Water research**, v. 45, n. 5, p. 1973-1983, 2011.

PAERL, H. W.; HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. **Environmental microbiology reports**, v. 1, n. 1, p. 27-37, 2009.

SOBRAL, et al. Comportamento espacial da Clorofila-A no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, 2016.

STREIT, N. M. et al. Como clorofilas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, junho de 2005. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 10 de abril de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000300043>

TOMING, K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estud. av.**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010340142008000200007&lng](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142008000200007&lng)

=en&nrm=iso>. Acessado em 10 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>.

TUNDISI, J. G. et al. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. Rio de Janeiro: **Academia Brasileira de Ciências**, p. 47, 2014.

VON SPERLING, E.; FERREIRA, A. C. da S.; GOMES, L. N. L. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. **Desalination**, v. 226, n. 1-3, p. 169-174, 2008.

WANG, X.; GONG, Z.; PU, R. Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 10, p. 620, 2018.

YANG, X. et al. Mechanisms and assessment of water eutrophication. **Journal of Zhejiang University Science B**, v. 9, n. 3, p. 197-209, 2008.

YANG, X. et al. Mechanisms and assessment of water eutrophication. **Journal of Zhejiang University Science B**, v. 9, n. 3, p. 197-209, 2008.

ZHANG, Y. et al. Satellite analysis to identify changes and drivers of CyanoHABs dynamics in Lake Taihu. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 5, p. 1451-1466, 2016.

Zupic, I.; Ater, T. 2014. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, 18(3), 429–472. <http://doi.org/10.1177/1094428114562629>, 2014.

## 6 ANÁLISE DE ATRIBUTOS LIMNOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO

**Resumo:** Este trabalho busca investigar parâmetros limnológicos: condutividade, sólidos totais, turbidez, pH e clorofila-A (mg/l), de quatro reservatórios multiuso do semiárido piauiense, o Reservatório Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus, que no período de 2018 a 2019 sofreram impactos da seca, resultando em volumes inferiores a 30%. Optou-se por usar os resultados médios para comparar, por meio de gráficos, os valores obtidos *in situ* e os valores estabelecidos na resolução CONAMA n° 357/2005 para águas doces de classe II. Fez-se o uso da correlação linear, para verificar as relações que os parâmetros estudados desenvolvem entre si, mas também, com fatores naturais: temperatura média e precipitação. A caracterização climática, e volumétrica e a ocorrência de seca, foram fatores importantes na discussão dos atributos limnológicos. Os resultados mostraram que, o período de seca ocorrido durante o tempo analisado, pode ter resultado na redução dos volumes dos reservatórios, impactando negativamente na qualidade da água. Os sólidos em suspensão na água, foram apontados como determinantes na variação de outros parâmetros, principalmente, da turbidez, condutividade e Ph. A clorofila-a, variável de grande importância para a qualidade da água, não apresentou correlação significativa com nenhum outro parâmetro limnológico estudado, podendo ser considerada uma variável independente. No entanto, foi constatado que ela tem relação direta com a precipitação e temperatura. Quanto os valores determinados pelo CONAMA, observou-se, que o pH, sólidos totais e clorofila-a, encontram-se com valores superiores ao que é recomendado. A turbidez foi o único parâmetro que se enquadrou dentro do limite de aceitabilidade da resolução CONAMA. Os reservatórios Barreiras e Estreito, se apresentaram com os piores valores médios para os parâmetros aqui analisados.

**Palavras-chave:** Limnologia, reservatórios, semiárido, qualidade da água.

### ANALYSIS OF LIMNOLOGICAL ATTRIBUTES IN RESERVOIRS OF THE SEMIARID

**Abstract:** This research work investigates limited parameters: conductivity, maximum limits, turbidity, pH and chlorophyll-A (mg / l), four multipurpose reservoirs in the semi-arid region of Piauí, or Barreiras, Bocaina, Estreito and Piaus reservoir, without a period from 2018 to 2019 suffered. drought impacts, resulting in volumes below 30%. Choose to use the average results for comparison, by means of graphs, the values obtained at the site and the values calculated in the CONAMA resolution n. 357/2005 for Class II fresh water. Make use of linear correlation, to verify the relationships that the studied have developed among themselves, but also with natural factors: average temperature and pollution. Scaled, volumetric and drought characterization were important factors in the discussion of limnological attributes. The results shown, the drought period that occurred during the analyzed time, can result in the reduction of reservoir volumes, negatively impacting water quality. Suspensions suspended in water were identified as determining the variation of other parameters, mainly turbidity, conductivity and Ph. Chlorophyll-a, a variable of great importance for water quality, with no significant correlation with any other limit studied, can be considered an independent variable. However, it was found that it has a direct relationship with temperatures and temperatures. When values are determined by CONAMA, seeds, pH or maximum values and chlorophyll-a, weekly with values higher than recommended. Turbidity was the only parameter that was adjusted within the acceptability limit of CONAMA resolution. The Barreiras and Estreito reservoirs, see the previous average values for the parameters analyzed here.

**Keywords:** Limnology, reservoirs, semiarid, water quality.

## 6.1 Introdução

A crescente diminuição da quantidade e qualidade de água doce no mundo, é considerado um importante problema social (FAYER et al., 2018). Em regiões semiáridas, características como fragilidade dos ecossistemas, déficit hídrico, elevadas taxas de evaporação e intenso balanço positivo de energia solar, reduzem, significativamente o volume de corpos d'água e ampliam ainda mais os problemas hídricos (LACERDA et al., 2018).

No estado do Piauí, o semiárido está inserido em 83% do território estadual. Essa região de grande densidade demográfica, sofre constantemente com secas intensas de longo prazo, que resultam em impactos negativos sobre as atividades econômicas, sociais e ambientais (MARENCO et al., 2018). A construção de reservatórios, açudes e barragens, foram alternativas usadas por órgãos governamentais para levar água a população do semiárido nordestino no intuito de minimizar os impactos adversos causados por longos períodos de seca (SANTOS et al., 2009).

Longos períodos de seca são um dos fatores que causam a perda da qualidade da água (LACERDA et al., 2018). Rocha Júnior et al. (2018) constataram que a seca contribui para a redução volumétrica de reservatórios, somado a isso, o aumento de sais dissolvidos e diminuição da oxigenação, proporcionam a acumulação de diversos nutrientes e intensificam o processo de eutrofização. Nesse sentido, o projeto Monitor da Seca, acompanha mensalmente a situação da seca no Nordeste (TEIXEIRA; MACHADO, 2015) e mostra os possíveis impactos desencadeados durante os períodos de seca, principalmente sobre os recursos hídricos.

Estudos sobre qualidade da água no semiárido piauiense, são escassos, sobretudo quando se trata de reservatórios destinados ao abastecimento de água. O estado possui vinte e cinco reservatórios de regulação e abastecimento, destacando-se nesse panorama, a sub-bacia do Canindé, maior sub-bacia do estado (BRASIL, 2014), que concentra o total de dezessete reservatórios, com capacidade de acumulação superior a 1.400 hm<sup>3</sup> (ANA, s.d.).

Barreto et al. (2013) enfatizam a importância e a carência do levantamento da qualidade da água de reservatórios de abastecimento. Altos custos financeiros, reduzida capacidade técnica e a localização desses reservatórios distantes dos centros urbanos, são fatores que impõem barreiras ao monitoramento da qualidade da água (PALMER; KUTSER; HUNTER, 2015).

Desde 2005, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da resolução N° 357/2005, estabelece metas de melhorias qualitativas das águas para que determinado corpo hídrico possa ser utilizado. Essa resolução é de grande importância para a conservação e preservação dos recursos hídricos nacionais (CUNHA et al., 2013), por isso é

utilizada por vários estudos que buscam analisar os parâmetros limnológicos de corpos hídricos (CUNHA et al., 2013; SILVA; GOUVEIA, 2018; SOBRAL et al., 2016; ROCHA JÚNIOR et al., 2018).

Na ausência de um enquadramento dos recursos hídricos as águas doces devem ser classificadas conforme o uso que a ela é destinado (BRASIL, 2005). Assim, para este trabalho todos os reservatórios foram classificados como de água doce de classe II, destinadas ao abastecimento para consumo humano após o tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário como natação, mergulho dentre outros.

Assim, no presente estudo buscou-se investigar alguns parâmetros limnológicos: condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), sólidos totais ( $\text{mg}/\text{l}$ ), turbidez (UNT), PH e clorofila-A ( $\text{mg}/\text{l}$ ) de quatro reservatórios Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus, localizados no semiárido piauiense. Verificando se os valores estão dentro das metas estabelecidas pela resolução CONAMA n° 357/2005 e analisando como os aspectos naturais e antrópicos que influenciam na variação desses parâmetros. Para isso, foram usados os valores médios de três amostras pontuais coletadas, trimestralmente, entre dezembro de 2018 e dezembro 2019.

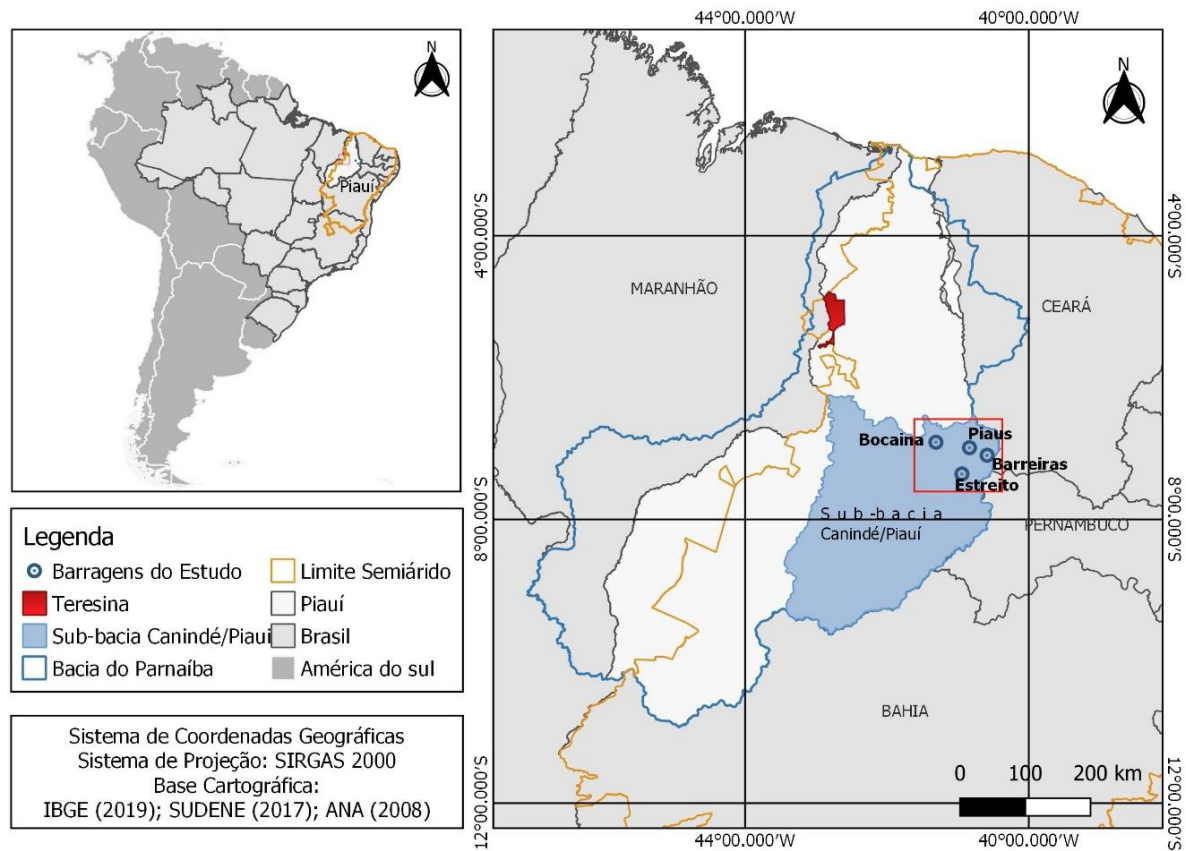
## **6.2 Metodologia**

### **6.2.1 Área de estudo**

Os reservatórios de água do Açude Barreiras, Açude Bocaina, Barragem do Estreito e Barragem Piaus, estão inseridos dentro da região semiárida do estado do Piauí (Figura 24), especificamente, a região sudeste do estado, distante 350 km da capital Teresina, onde fica localizada a sede da secretária do meio ambiente do estado (SEMAR).

Embora os reservatórios estudados estejam localizados na mesma região, eles foram construídos em distintas cidades. O reservatório Barreiras é situado no município de Fronteiras, o reservatório Bocaina na cidade de Bocaina, o reservatório do Estreito na cidade de Padre Marcos e o reservatório Piaus na cidade de São Julião.

Figura 24 – Localização dos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelos autores

O clima nessa região é semiárido quente (Bsh), caracterizado por períodos predominantemente secos, com temperaturas médias anuais superiores a 18°C, intensa radiação solar, chuvas distribuídas sazonalmente, evaporação média anual superior à precipitação (AYOADE, 1996), resultando em duas estações bem definidas: uma seca que compreende o período de maio a dezembro, e a outra chuvosa, ocorrendo entre janeiro a abril (BRASIL, 2014). Ainda, com base na Brasil (2014), a sub-bacia Canindé-Piauí situa-se no aquífero Serra Grande e Cabeças, apesar disso, sua formação geológica e geomorfológica no embasamento cristalino não permite a retenção de água, favorecendo a ocorrência de secas.

Juntos, os açudes estudados são importante fonte de abastecimento de água para região, com capacidade de acumulação pouco superior a 340 hm<sup>3</sup> e atendimento de demanda populacional aproximada de 30 mil pessoas residentes nos municípios estudados (Tabela 8).



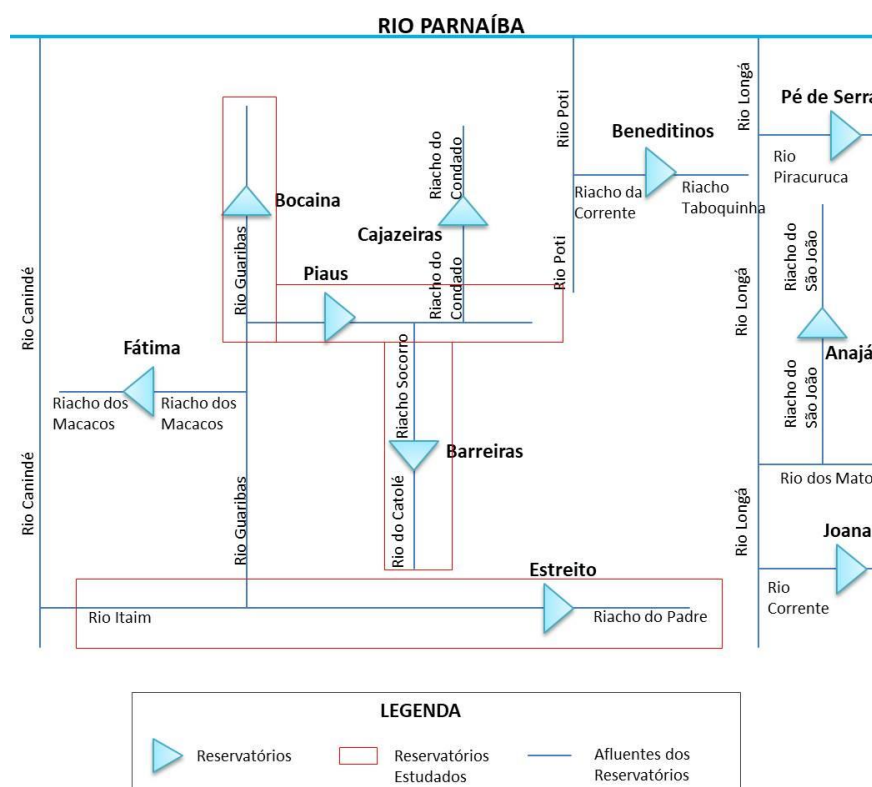
Tabela 8 – Capacidade volumétrica dos reservatórios e população atendida por município

Reservatórios	Municípios	Empreendedor	Volume (hm <sup>3</sup> )	População Resid. (hab)
Açude Barreiras	Fronteiras	Inst. Desenvolvimento do Piauí	106,51	11625
Açude Bocaina	Bocaina	Departamento de Obras Contra a Seca	106	4500
Barragem do Estreito	Padre Marcos	Inst. Desenvolvimento do Piauí	23,88	6868
Barragem de Pias	São Julião	Departamento de Obras Contra a Seca	104,51	6363

Fonte: Adaptado pelos autores com base em dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA e Contagem populacional do IBGE (2019).

Os afluentes desses reservatórios, no geral, são rios intermitentes (temporários) ou riachos, o que resulta em alterações sazonais no volume. O reservatório Barreiras tem como afluentes o riacho Socorro e o Rio Catolé, o reservatório Bocaina tem como afluente o Rio Guaribas, o reservatório Estreito recebe contribuições do Rio Itaim e Riacho do Padre, já o reservatório Pias recebe águas do Riachão e Rio Marchal, conforme pode ser verificado na Figura 25. É importante ressaltar, que embora estes rios sejam intermitentes, eventualmente, podem se tornar perenes, devido contribuições de águas subterrâneas provenientes dos aquíferos Serra Grande e Cabeças (BRASIL, 2014).

Figura 25 – Afluentes dos reservatórios de água do Piauí

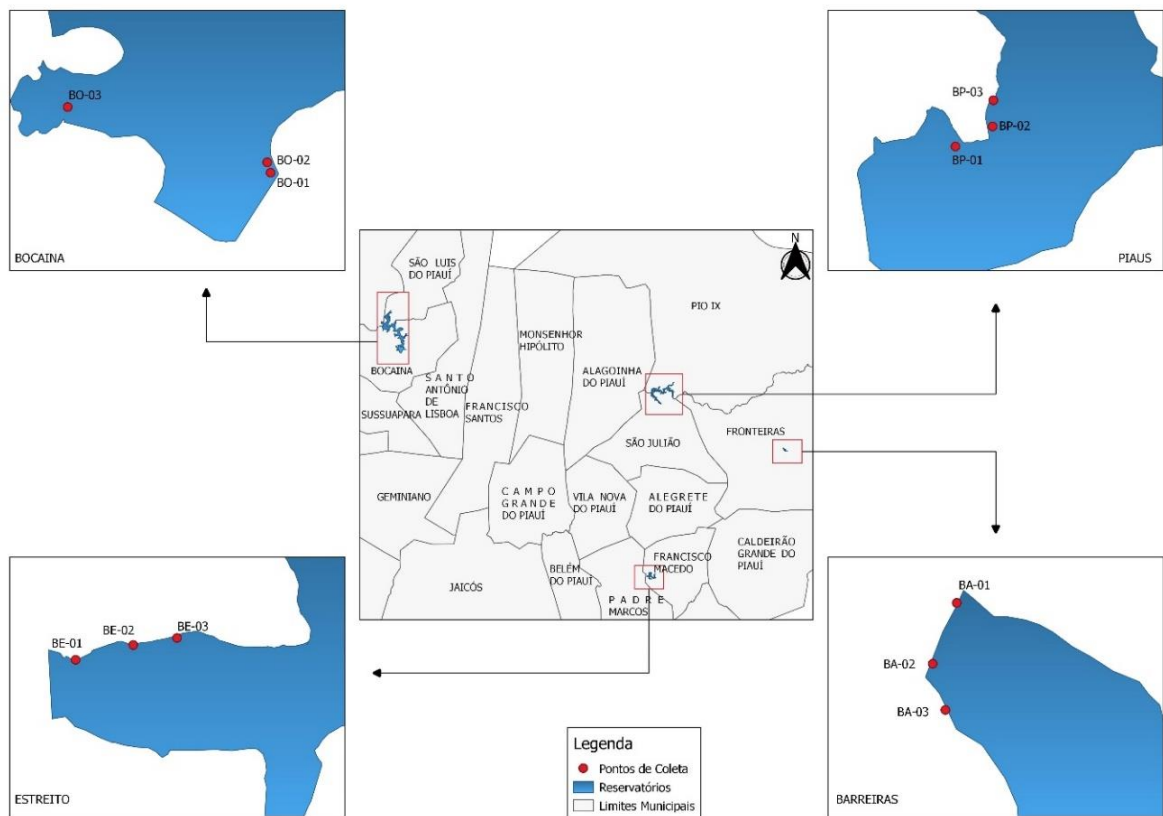


Fonte: Adaptado pelos autores a partir de dados da ANA (s.d.).

### 6.2.2 Atributos limnológicos

Foram coletadas três amostras de água de cada reservatório, trimestralmente, desde dezembro de 2018 a dezembro de 2019. Durante a coleta realizada em dezembro de 2018, foi coletado somente uma amostra em cada reservatório, nas demais coletas, foram amostrados três pontos amostrais (Figura 26), totalizando cinco coletas e cinquenta e dois dados analisados. A frequência amostral foi determinada para abranger os períodos chuvosos (dezembro e março) e seco (junho e setembro), permitindo ter informações do comportamento limnológico dos reservatórios em diferentes épocas do ano.

Figura 26 – Localização dos pontos amostrais



Fonte: Elaborado pelos autores

Acompanhando Batista et al. (2013), Grieco et al. (2017), Silva e Gouveia (2018), os pontos amostrais foram coletados superficialmente, 30 cm de profundidade, seguindo os procedimentos descritos pela CETESB (2011). A coleta ocorreu na zona litorânea dos reservatórios, nesse local a qualidade da água sofre mais alterações naturais e antrópicas (ESTEVES, 2008).

As medições das variáveis analisadas foram realizadas após a homogeneização das amostras. O PH, condutividade e sólidos totais foram medidos com a sonda multiparâmetro, a turbidez foi aferida utilizando um turbidímetro e a clorofila, através do método espectrofotométrico. A Tabela 9, descreve os parâmetros limnológicos e a metodologia utilizada em cada parâmetro.

Tabela 9 – Parâmetros analisados e metodologia adotada no estudo

<b>Parâmetros</b>	<b>Unid.</b>	<b>Metodologia</b>
PH		Multiparâmetro
Condutividade	µs/cm	Multiparâmetro
Sólidos Totais	mg/L	Multiparâmetro
Turbidez	NTU	Turbidímetro
Clorofila-a	mg/L	Espectrofotometria

Fonte: Elaborado pelos autores

Para a determinação da concentração de clorofila-a, aplicou-se a metodologia espectrofotométrica, por ser a mais recorrente em trabalhos com essa finalidade (POMPEO et al., 2015; LAMPARELLI, 2004; KURODA et al., 2005). A extração e cálculo da concentração de clorofila-a a quente seguiu os procedimentos descritos por Jones (1979), para a filtragem e centrifugação das amostras foram usados os preceitos de Marker et al. (1980). Embora o metanol seja um solvente perigoso, que requer cuidados durante o seu manuseio, autores como Alves (2006), Kuroda et al., (2005) e Pompeo et al., (2015), o apontam como o solvente que apresenta os melhores resultados durante a extração da clorofila-a, assim sendo, é o mais eficiente.

Pela inexistência de enquadramento dos corpos hídricos piauienses, os reservatórios estudados foram enquadrados como de águas doces na classe II. Assim, os resultados médios obtidos após as análises limnológicas, foram comparados por meio de um gráfico de linhas para cada parâmetro estudado, no qual são mostrados aos limites máximos de aceitabilidade definidos na resolução Conama 357/2005. Para o pH, os valores paramétricos devem estar entre 6 a 9, já a turbidez pode chegar até 100 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), para os sólidos totais o limite máximo permitido é de 500 mg/l, e para a clorofila-a é de 30 mg/l (CONAMA, 2005).

Análise estatística, usando matriz de correlação linear método de *Pearson*, foi usada para verificar o grau de relação que cada componente limnológico têm um com os outros e com variáveis ambientais como temperatura média e precipitação. Podendo assim, verificar se existem relações que podem impactar na qualidade da água dos reservatórios.

### 6.2.3 Ocorrências de secas

A ocorrência de secas nos municípios onde se encontram os reservatórios foi analisada a partir de informações coletadas no portal eletrônico Monitor da Seca, regulado pela Agência Nacional de Águas (ANA), com o auxílio da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os dados presentes no monitor da seca permitiram acompanhar regularmente a situação da seca na região durante o período de estudo, verificando as modificações do panorama da seca e os impactos que ela causou nos recursos hídricos.

A classificação da severidade da seca seguiu as categorias utilizadas pelo monitor da seca, da seca mais fraca (s0) até seca exponencial (s4), conforme é discriminado na Tabela 10. Cada classe da seca tem seus respectivos impactos, podendo variar de curto prazo (C) ou longo prazo (L), esses impactos têm reflexos na diminuição do plantio, restrições de água, perdas totais de culturas, escassez de água, e podem resultar em crises emergenciais.

Tabela 10 – Categorias de classificação de severidade da seca

Classificação de Severidade da Seca			
Categoria	Percentil	Descrição	Impactos Possíveis
S0	30 %til	Seca Fraca	Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
S1	20 %til	Seca Moderada	Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
S2	10 %til	Seca Grave	Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comuns; restrições de água impostas.
S3	5 %til	Seca Extrema	Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições
S4	2 %til	Seca Excepcional	Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência.

Fonte: Monitor da Seca (ANA, s.d)

## 6.3 Resultados e discussão

As águas dos reservatórios analisados são no geral utilizadas para fins de abastecimento, mas ao longo dos anos, tiveram os seus usos expandidos para outras finalidades como irrigação, recreação, aquicultura, pesca, piscicultura e turismo. As informações das atividades desenvolvidas nesses reservatórios são importantes para o entendimento dos processos que integram esses corpos d'água, demonstrando como os usos impactam diretamente na

conservação ou deterioração da qualidade da água desses ambientes aquáticos (ROLIM et al., 2019).

Entre os reservatórios estudados, o localizado na cidade de Bocaina tem destaque na prática da piscicultura, desenvolvida em parceria do Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Piauí (EMATER) com os moradores da região (PIAUI, 2005). Projetos da iniciativa privada também utilizam esses reservatórios para desenvolvimento das cidades. Já o reservatório do Estreito, tem destaque empreendimentos de lazer, construídos nas suas margens.

Na visão de Lacerda et al. (2018), quanto menor o volume de um reservatório, menor é a sua profundidade ocasionando o aumento e acúmulo de nutrientes, impactando na qualidade da água. Dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) mostram os volumes de armazenamento de cada reservatório. Entre os quatro reservatórios estudados, três estão com capacidade inferior a 20% do seu total, Estreito, Pias e Bocaina, respectivamente, com apenas 8%, 10% e 17%. Já o reservatório Barreiras apresenta melhor quadro volumétrico com o percentual de 34% do volume total. O baixo volume de armazenamento ocorre devido a extensos períodos de estiagem e alta evaporação (LACERDA et al., 2018).

A temperatura e a precipitação nas cidades onde se encontram esses reservatórios são outros fatores de grande relevância no estudo das características limnológicas. Bresciani et al. (2012) são enfáticos afirmando que a temperatura é o fator ambiental de maior importância para a qualidade da água. Para Griego et al. (2017), a temperatura é um importante fator no diagnóstico de atributos limnológicos, atuando como reguladora na interação entre os aspectos físico-químicos dos recursos hídricos. Lacerda e Santos (2018) acrescentam que a variação das chuvas, tem impactos nos fluxos dos rios e consequentemente na capacidade volumétrica e profundidade dos reservatórios.

Nesse sentido, na Tabela 11, são mostradas as condições climáticas das cidades nas quais estão localizados os reservatórios estudados. Ela permitiu identificar a variação de 3°C na temperatura média da região, além disso, mostrou que agosto é o mês mais seco, com as menores quantidades de precipitações em todas as cidades estudadas, enquanto o mês de março é marcado por altos índices pluviométricos. Assim, por meio da Tabela 11 foi identificado que o período de seca na região compreende os meses de maio a dezembro, e o período chuvoso inicia-se no mês de janeiro se estendendo até abril.

As características locais analisadas comprovaram que as condições climáticas como temperatura e precipitação, exercem papel de fundamental importância na regulação dos ecossistemas. Essas características geram alterações na limnologia local, além de influenciar nos volumes dos reservatórios. Assim, os impactos na qualidade da água variam conforme as condições climáticas locais.

Tabela 11 – Levantamento das características climáticas dos municípios estudados

Bocaina												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.8	26	25.6	25.7	25.2	24.6	25.3	26.6	27.9	28.4	28.1	27.4
Temperatura mínima (°C)	21.7	21.1	20.7	20.8	19.8	19	19	20.2	21.9	22.4	22.3	21.9
Temperatura máxima (°C)	31.9	30.9	30.5	30.7	30.7	30.2	31.6	33.1	33.9	34.4	33.9	33
Chuva (mm)	125	129	172	119	25	8	2	0	2	14	36	79

Fronteiras												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.2	25.4	25	24.8	24.4	24.1	24.3	25.1	26	26.8	26.9	26.7
Temperatura mínima (°C)	21.1	20.4	20.7	20.3	19.5	18.8	18.6	19.1	20.1	20.7	21.2	21.1
Temperatura máxima (°C)	31.3	30.4	29.4	29.4	29.4	29.5	30	31.2	31.9	32.9	32.6	32.3
Chuva (mm)	90	115	159	109	30	9	3	2	4	13	25	50

Padre Marcos												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.5	25.8	25.7	25.5	25	24.5	24.7	25.6	26.6	27.4	27.3	26.9
Temperatura mínima (°C)	21.2	20.6	20.9	20.5	19.8	18.9	18.8	19.3	20.5	21.2	21.6	21.2
Temperatura máxima (°C)	31.9	31.1	30.5	30.5	30.3	30.2	30.6	31.9	32.7	33.6	33.1	32.7
Chuva (mm)	104	117	161	96	19	5	2	1	4	14	33	76

São Julião												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.3	25.5	25.4	25.2	24.8	24.5	24.8	25.9	26.6	27.3	27.1	26.8
Temperatura mínima (°C)	21.1	20.4	20.8	20.3	19.5	18.8	18.8	19.7	20.7	21.1	21.4	21.1
Temperatura máxima (°C)	31.5	30.6	30	30.1	30.1	30.2	30.8	32.1	32.6	33.5	32.9	32.5
Chuva (mm)	98	117	158	112	25	7	4	2	5	14	27	59

Fonte: Adaptado do Clima-date.org (s.d.).

### 6.3.1 Monitoramento da seca na região

A condição árida da região é fruto da quantidade de chuvas e da temperatura, em que essa combinação é responsável pela evapotranspiração potencial que tem consequências na perda de água superficial (SILVA, 2008).

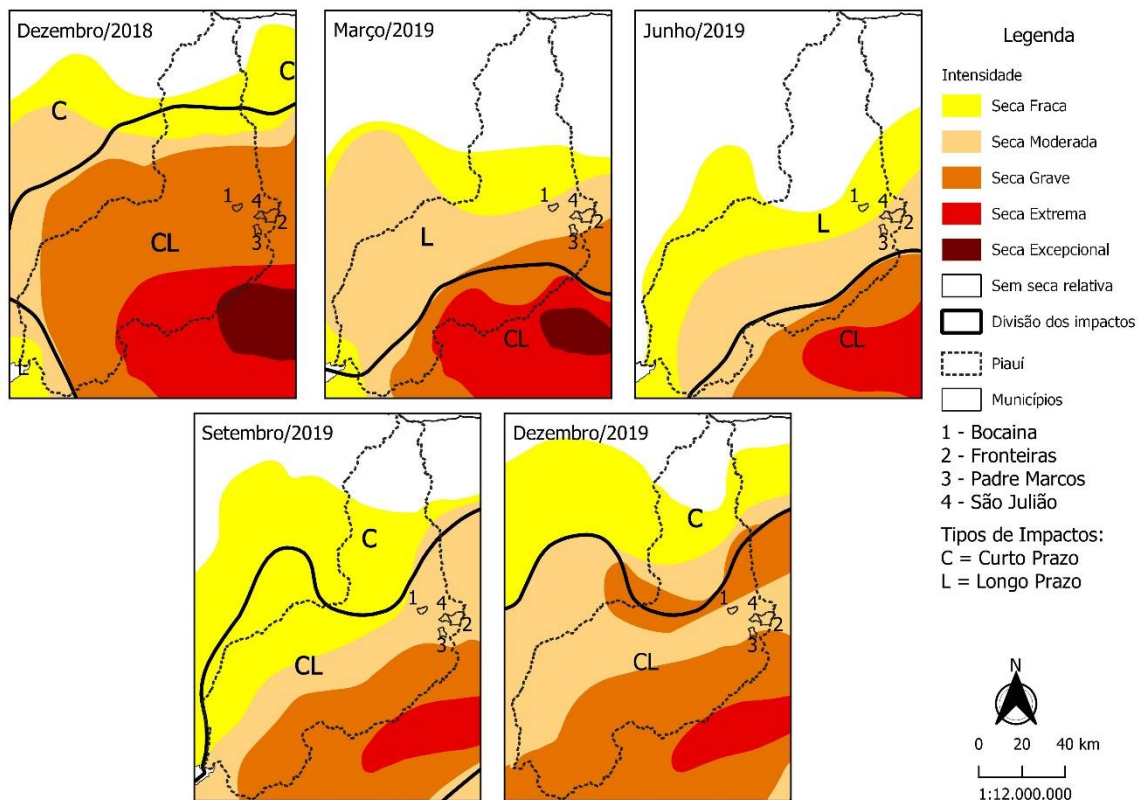
A necessidade do monitoramento da seca ao longo do tempo nas cidades onde estão os reservatórios é de extrema importância, levando em consideração que a situação da seca gera alterações dos ambientes aquáticos. Nos impactos sobre a água listados a partir do grau

severidade da seca, variam entre déficits hídricos, falta de água iminente, escassez de água comum, escassez de água generalizada e por fim, e mais preocupante, escassez de água em reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência (MONITOR DA SECA, s.d.).

Na Figura 27, é mostrado o comportamento da seca nas cidades de Bocaina (1), Fronteiras (2), Padre Marcos (3) e São Julião (4), durante os meses de coleta (dezembro/2018, março/2019, junho/2019, setembro/2019 e dezembro/2019). Todos os municípios durante o mês de dezembro de 2018 estavam em uma situação de seca grave, com diversos impactos de curto e longo prazo relacionados na Tabela 10.

Durante todo o ano de 2019, o panorama da seca nos municípios estudados foi estável, estando classificado como seca moderada, com impactos de curto e longo prazo, podendo ocorrer situações que acarretassem em restrições no acesso a água. Tal situação indica que os índices pluviométricos durante o ano de 2019 foram melhores que do ano anterior (Tabela 11).

Figura 27 – Monitoramento da seca nos municípios estudados



Fonte: Elaborado pelos autores

De modo geral, o panorama da seca permitiu obter visão geral do comportamento da seca na região estudada. O estado da seca ao longo do período estudado, refletiu a temperatura

e pluviometria mostradas na Tabela 11. Assim ficou explícito as características climáticas, têm reflexos na sazonalidade da seca e nas suas alterações.

### **6.3.2 *Análise dos atributos limnológicos de qualidade da água dos reservatórios***

A preocupação com as alterações dos atributos limnológicos dos reservatórios é pertinente pelo fato desses reservatórios constituírem uma importante fonte de água para o abastecimento público da região que sofre constantemente com problemas hídricos advindo da seca.

Nas Figuras 28, 29, 30, 31 e 32 mostradas a seguir, expressam os resultados médios dos atributos limnológicos em cada reservatório. A linha tracejada em vermelha, representa o limite de aceitabilidade do Conama nº 357/205, as demais linhas correspondem aos valores aferidos no estudo. Os valores que se apresentam dentro do limite estabelecido pelo Conama, indicam que a água tem boa qualidade para o seu uso prioritário que é o abastecimento da população.

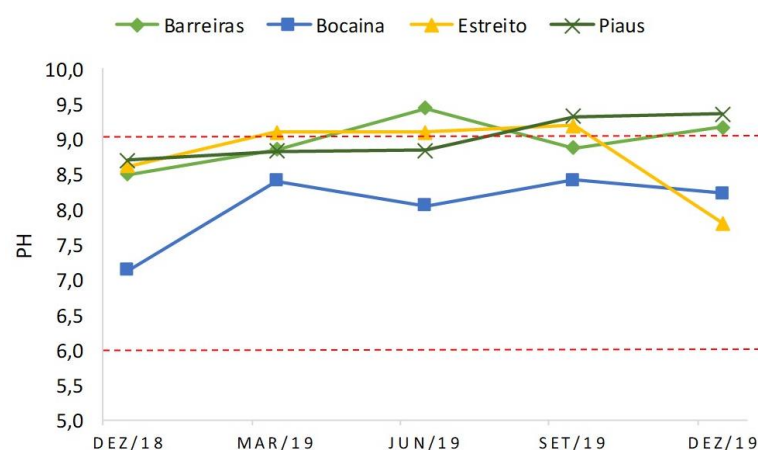
Os pontos foram coletados nas margens dos reservatórios, podem influenciar nos resultados amostrais. Apesar disso, esse trabalho é de grande valia por expressar uma perspectiva inicial da qualidade da água desses reservatórios.

O potencial hidrogeniônico (pH) é um dos parâmetros ambientais mais importantes e de maior complexidade, diversos fatores influenciam na interpretação dos seus valores (ESTEVES, 2008). Na resolução Conama nº 357/2005, os limites aceitáveis para o Ph encontram-se no intervalo entre 6 e 9, essa é a mesma faixa de valores da maior parte dos corpos d'água continentais (ESTEVES, 2008). Assegurar o pH dentro dos padrões de aceitabilidade é ideal para a conservação da vida aquática e manutenção de outros parâmetros físicos e químicos da água (SILVA; ANGELIS; MACHADO, 2007).

Na Figura 28, são mostrados os valores médios do pH nos reservatórios estudados. Nela é possível observar que os valores médios de Ph dos quatro reservatórios estudados, em sua maioria, se mantiveram em conformidade com os limites aceitáveis estabelecidos pelo Conama, mas apresentaram-se relativamente altos. Esteves (2008) destaca que em regiões com balanço hídrico negativo, como é o caso da área estudada, é comum valores de pH superiores a 8,0, podendo ultrapassar 9,0 em situações de secas prolongadas.



Figura 28 – Valores médios do pH nos reservatórios estudados.

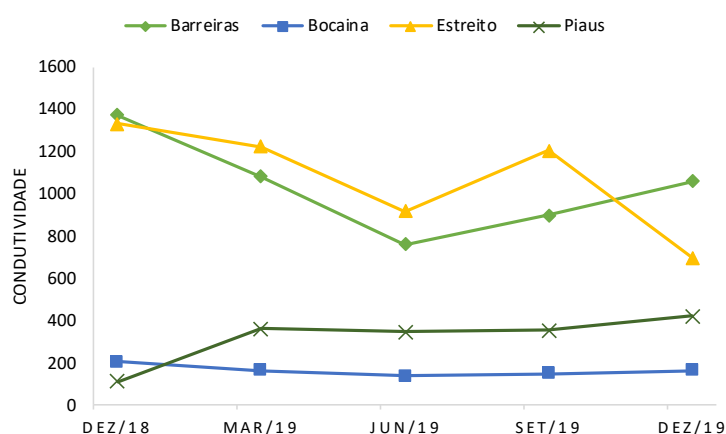


Fonte: Elaborado pelos autores

Embora a condutividade não seja um parâmetro previsto na resolução CONAMA N° 357/2005, ela é um importante fator na qualidade da água e por isso, é um dos parâmetros monitorados pela rede de qualidade de água operada pela Agência Nacional das Águas (ANA).

Na Figura 29, são expressados os valores médios da condutividade para cada período amostral. Nela os reservatórios Barreiras e Estreito em todas as épocas do ano, têm valores de condutividade bem superiores aos demais reservatórios.

Figura 29 – Valores da condutividade nos reservatórios estudados.



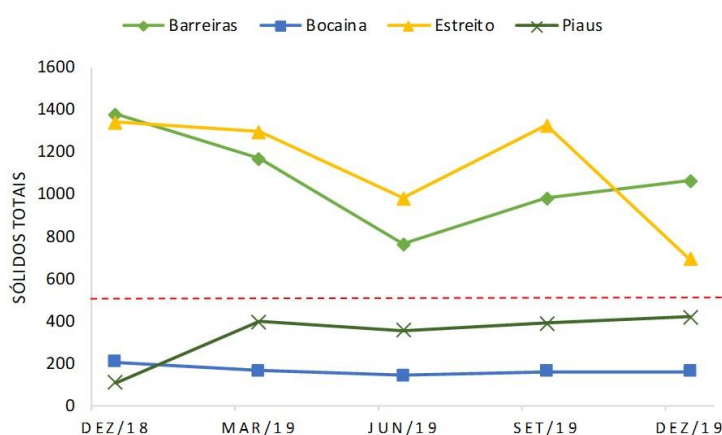
Fonte: Elaborado pelos autores

Análise dos sólidos totais na Figura 30, mostrou que os reservatórios Piaus e Bocaina apresentam valores dentro do limite estabelecido pela resolução Conama, entretanto os

reservatórios Barreiras e Estreito, assim como na condutividade, apresentaram valores bem superiores ao limite do Conama.

Lacerda et al., (2018) comprovaram em seu trabalho que baixos volumes de água em reservatórios, propiciam o aumento a quantidade de sais presentes na água e por isso têm maior condutividade. A poluição e baixo volume de água, podem explicar os elevados valores da condutividade e sólidos totais no reservatório Estreito, que entre os reservatórios estudados, é o que sofre mais ações antrópicas praticadas em seu entorno. Quanto o reservatório Barreiras, a sua estrutura formada por pedras de mão, pode ter motivado o aumento dos sólidos totais no reservatório, implicando no aumento da condutividade mostrada na Figura 29.

Figura 30 – Valores dos sólidos totais dos reservatórios estudados.

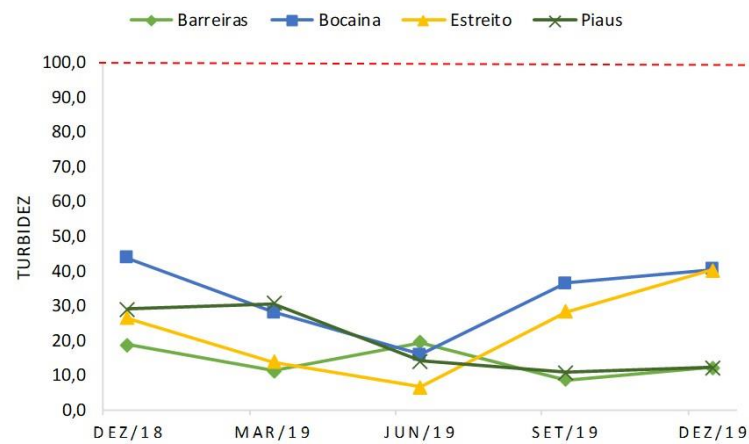


Fonte: Elaborado pelos autores

A turbidez de um corpo hídrico representa a quantidade de luz que atravessa as partículas de água, se o corpo d'água tem elevada turbidez a capacidade fotossintética da vegetação submersa é reduzida (SILVA; ANGELIS; MACHADO, 2007). A turbidez é um indicador do aumento de sólidos em suspensão dentro do corpo hídrico, quanto maior a quantidade de sólidos menor será a penetração de luz nas águas, pois eles dispersam a luz dentro dos corpos hídricos (ESTEVES, 1998; DERISIO, 2007). Vonsperling (2008) explica que a turbidez deve ser analisada com bastante cuidado, pois a coloração do corpo hídrico impacta na aferição desse parâmetro.

Apesar da grande quantidade de sólidos presentes nos reservatórios Barreiras e Estreito (Figura 30), a turbidez desses reservatórios foi baixa (Figura 31). De modo geral, todos os reservatórios mostram boa condição quanto ao parâmetro turbidez, estão em consonância com os padrões de aceitabilidade.

Figura 31 – Valores de turbidez para os reservatórios analisados.



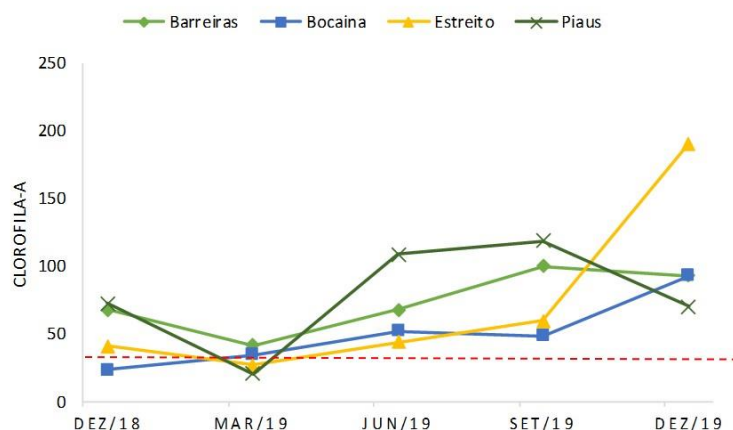
Fonte: Elaborado pelos autores

A quantidade de clorofila-a nos reservatórios indicam a existência de organismos fotossintetizantes (ESTEVES, 1998; STREIT et al., 2005; DUAN et al., 2007; WANG; GONG; PU, 2018), os altos teores de clorofila-a são estimulados por fatores internos: fósforo total, transparência das águas, e por fatores externos: temperatura (BATISTA et al., 2013).

Além de propiciar informações sobre biota aquática, a clorofila-a é o parâmetro que permite determinar o estado trófico dos corpos hídricos (LOPES et al., 2013). Também pode indicar a existência de algas nocivas à saúde humana, como as cianobactérias (CARVALHO; BARBOSA; NOVO, 2013; BODDULA et al., 2016).

Na figura 32, são expressados os valores de clorofila-a para os reservatórios estudados, observa-se que todos os reservatórios contêm elevados valores de clorofila-a, principalmente a partir do segundo semestre do ano, período em que as temperaturas são mais altas na região. Lacerda et al. (2018) explicam que naturalmente, com a redução volumétrica dos reservatórios há o aumento gradual na quantidade de clorofila-a em reservatórios.

Figura 32 – Valores de clorofila-a para os reservatórios estudados.



Fonte: Elaborado pelos autores

Dentre os reservatórios avaliados, foi possível observar que o reservatório Bocaina e Piaus têm valores paramétricos melhores, mas próximos dos valores ideais para águas doces de classe II. Diferentemente, o reservatório Estreito sofre consequências das atividades desenvolvidas no seu entorno e mostra a necessidade do acompanhamento constante da sua situação, para que no futuro consiga atingir as metas estabelecidas pela resolução Conama nº 357/2005 para cada parâmetro aqui analisado.

De modo geral, deve-se ter maior cuidado com a qualidade da água dos reservatórios estudados. A sazonalidade dos resultados é influenciada diretamente pelo clima, escassez de chuvas na região, forte evaporação e impactos das atividades antrópicas, como foi apontado em outros trabalhos (LACERDA et al., 2018; SILVA et al., 2018; SILVA; ANGELIS; MACHADO, 2007).

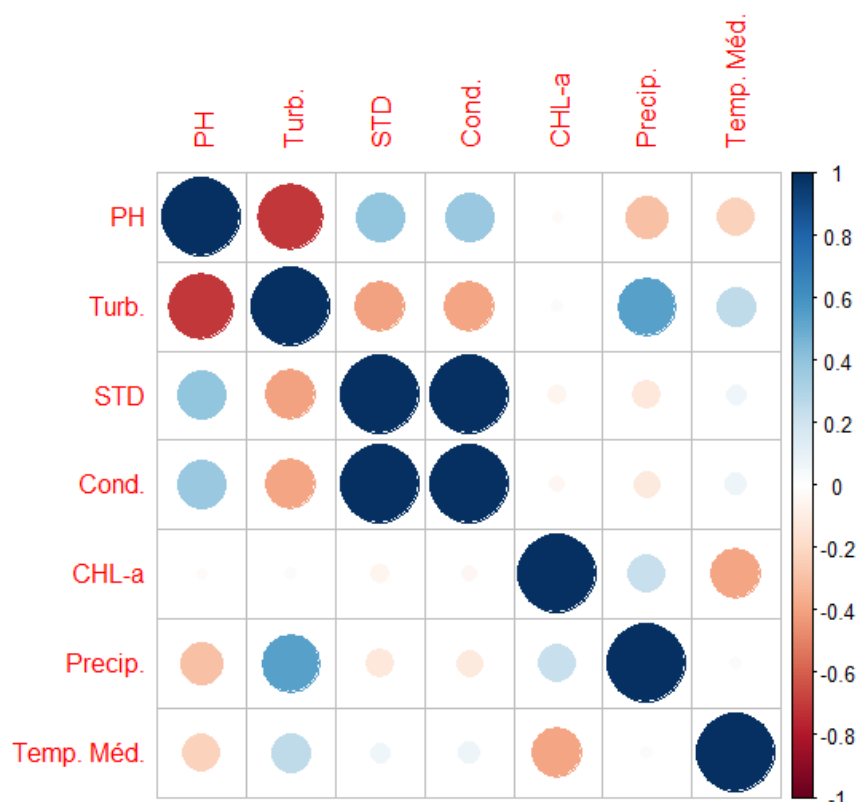
### 6.3.3 Correlação entre os atributos limnológicos

A avaliação das relações entre os componentes que caracterizam os ambientes aquáticos, pode indicar o grau de impacto ambiental (SILVA; GOUVEIA, 2018). Dessa forma, a análise da correlação dos parâmetros limnológicos pesquisados, permite conhecer a relação que os parâmetros desenvolvem entre si.

A correlação entre as variáveis estudadas com a chuva e a temperatura média é mostrada na Figura 33. Quanto maior o tamanho dos círculos apresentados na figura, mais forte é a correlação entre as variáveis. Correlações positivas, são indicadas pelas tonalidades de azul, já as correlações negativas, são mostradas nas tonalidades do vermelho. Os círculos pequenos, e ou brancos, mostram que as variáveis não têm relações com os outros parâmetros analisados.

A simbologia mostrada na figura, indica que a quantidade de sólidos totais, impacta diretamente e indiretamente nos outros parâmetros. Farias, Dantas Neto e Lima (2011) explicam que quanto maior for a poluição das águas, maior será o conteúdo mineral e isso agrega consequências em outros parâmetros limnológicos.

Figura 33 – Correlação entre as variáveis estudadas e as condições climáticas locais



Fonte: Elaborado pelos autores

Os valores dos sólidos totais apresentaram forte correlação positiva com a condutividade ( $r = 0,99$ ) e correlações médias com o pH ( $r = 0,39$ ) e negativa com a turbidez ( $r = -0,70$ ). Silva e Gouveia (2018) também verificaram a mesma relação entre esses parâmetros.

A turbidez além de ter correlação com os sólidos totais, exprime correlação negativa com a condutividade ( $r = -0,40$ ). Considerando que a turbidez representa a intensidade de luz nos corpos hídricos (SILVA; ANGELIS; MACHADO, 2007), é natural que quanto maior a quantidade de sólidos em suspensão maior será a dispersão de luz dentro do corpo aquático.

A clorofila-a não apresentou valores significativos de correlação, isso indica que os parâmetros não se inter-relacionam. Assim nesse cenário, a clorofila-a pode ser considerada uma variável independente das demais variáveis limnológicas.

Quanto a precipitação e temperatura média, por meio da Figura 33, constatou-se que a quantidade de precipitação, teve maiores impactos no pH e na turbidez das águas, enquanto a temperatura, impactou diretamente na produção de clorofila-a.

#### 6.4 Conclusões

O presente trabalho permitiu obter um breve conhecimento sobre a limnologia dos reservatórios localizados no semiárido piauiense. A dinâmica limnológica dos reservatórios pode eventualmente comprometer à sua utilização, deixando a população local em situação de vulnerabilidade ambiental, social e econômica.

O prolongado período de seca, mostrado por meio dos dados do monitor da seca, refletem nos dados volumétricos dos reservatórios estudados e nos parâmetros aqui analisados. Ficou perceptível que a influência da precipitação, temperatura e das atividades humanas desenvolvidas no entorno dos reservatórios alteram as características limnológicas naturais dessas estruturas.

Embora os valores da resolução Conama n° 357/2005 sejam metas futuras para garantir os usos múltiplos dos corpos hídricos, os órgãos estaduais devem ter a preocupação de monitorar os parâmetros limnológicos desses reservatórios, com maior quantidade de variáveis possíveis e de forma regular, uma vez que, esses parâmetros apresentam grande variabilidade espacial e temporal. Contudo, o cenário limnológico aqui descrito, apesar de introdutório, aponta para a necessidade do gerenciamento destes reservatórios, situação está, que provavelmente se repete nos demais reservatórios do semiárido.

#### 6.5 Referências

BARRETO, L. V. et al. Eutrofização em Rios Brasileiros. **Enciclopédia Biosfera**: Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 2165-2179, 1 jul. 2013. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/EUTROFIZACAO.pdf>. Acesso em: 1 out. 2018.

BATISTA, A. A. et al. Parâmetros interferentes na eutrofização das águas superficiais do Açude Orós, Ceará. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 2, p. 1-8, 2013.

BODDULA, V. et al. Data driven analysis of Algal Bloom activity for effective Water Sustainability. In: IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom)(BDCloud-SocialCom-SustainCom). **IEEE**, 2016. p. 424-430.

BRASIL. Agência Nacional das águas. **Monitor da Seca**. Disponível em: <http://monitordesecas.ana.gov.br/>.

BRASIL. Agência Nacional das águas. Secretária do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado do Piauí. **Atlas do Abastecimento de Água do Estado do Piauí: Bacia do Rio Canindé**. 2014. Disponível em: <http://www.ccom.pi.gov.br/download/CANIN.pdf>

BRASIL. Agência Nacional das águas. Secretária do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado do Piauí. **SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>

BRASIL. **Resolução N° 357 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Brasília: 27 p. 2005.

BRASIL. **Resolução N° 91 - Procedimentos Gerais Para o Enquadramento dos Corpos de Água Superficiais e Subterrâneos**. Brasília: 5 p. 2008.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K. X. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: abordagem qualitativa da identificação de perigos. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 426-434, dez. 2008. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522008000400011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522008000400011&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 26 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000400011>.

CARVALHO, L. A. S. de; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. de M. **Ajuste de bandas de modelos empíricos de estimativa de clorofila aplicados à região da planície de inundação do Lago Grande Curuai - PA**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu - PR, ano XVI, p. 8924-8931, 2013. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.31.30?mirror=dpi.inpe.br/marte2/2013/05.17.15.03.08&metadataarepository=dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.31.31>. Acesso em: 18 jul. 2018.

COMPANHIA, DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. CETESB. Guia nacional de coleta e preservação de amostras-água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. **São Paulo: CETESB**.

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. 3ª edição, São Paulo: Signus Editora, 2007.

DUAN, H. et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. **Environmental monitoring and assessment**, v. 129, n. 1-3, p. 295-308, 2007.

ESTEVEZ, F. de A. **Fundamentos de limnologia**. Interciência, 1998.

FARIAS, M. S. S. de ; DANTAS NETO, J.; LIMA, V. L. A. de. Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Cabelo: parâmetros físico-químicos. **Revista GEPROS**, n. 1, p. 161, 2011.

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semi-árido. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 38-39, dez. 2003. Disponível em

<[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252003000400021&lng=en&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400021&lng=en&nrm=iso)>.

GRIECO, A. A. et al. Diagnóstico espacial e temporal de condições físico-químicas e microbiológicas do Córrego do Tanquinho, Ribeirão Preto, SP, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 282-298, abr. 2017. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2017000200282&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2017000200282&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 05 Fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1837>.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. (2001) PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1-9.

JONES, J.G. A. Guide to Methods for Estimating Microbial Numbers and Biomass in Freshwater. Ambleside: **Freshwater Biological Association Scientific Publication** (39), 1979.

LACERDA, L. D. et al. Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: The Castanhão Reservoir, Ceará State. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 2073-2096, Ago. 2018. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652018000502073&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000502073&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 25 Jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820180085>.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo - SP, 2004. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf)>. Acesso em: 05 de jul. de 2018.

LOPES, H. et al. Análise espaço-temporal da Clorofila-A no reservatório de Itaparica por meio de imagens Landsat-TM. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil., doi: online INPE, p. 6628-6635, 2013.

MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 1973-1985, ago. 2018. disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 11 Fev. 2020. Epub Ago. 14, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

PAERL, H. W.; HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. **Environmental microbiology reports**, v. 1, n. 1, p. 27-37, 2009.

ROCHA JÚNIOR, C. A. N. da et al. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 30, 2018.

ROLIM, H. de O. et al. Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil. **Acta Limnol. Bras.**, Rio Claro, v. 31, e26, 2019. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2179-975X2019000100322&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-975X2019000100322&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em: 06 Fev. 2020. Epub Out 21, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s2179-975x12517>.



SILVA, A. E. P. et al. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. **Acta amazônica**, v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008.

SILVA, C. de O. F.; GOVEIA, D. Avaliação da qualidade ambiental de corpos hídricos urbanos utilizando análise multivariada. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, v. 20, n. 3, p. 947-958, set. 2019. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1518-70122019000300947&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1518-70122019000300947&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 25 Jan. 2020. Epub Out 21, 2019. <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v0i0.1832>.

SILVA, D. V. R. da et al. Avaliação da eficiência de um índice de estado trófico na determinação da qualidade da água de reservatórios para abastecimento público. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 627-635, ago. 2018. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522018000400627&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522018000400627&lng=pt&nrm=iso)>.

SOBRAL, et al. Comportamento espacial da Clorofila-A no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, 2016.

STREIT, N. M. et al. Como clorofilas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, junho de 2005. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782005000300043&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 10 de abril de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000300043> using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 10, p. 620, 2018.

TEIXEIRA, F. J. C.; MACHADO, J. Secas no Brasil: a construção de outro modelo de gestão. **Parcerias Estratégicas**, v. 20, n. 41, p. 89-106, 2015.

VIEIRA, V. et al. **A Água e o Desenvolvimento Sustentável no Nordeste**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2000.

VON SPERLING, E.; FERREIRA, A. C. da S.; GOMES, L. N. L. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. **Desalination**, v. 226, n. 1-3, p. 169-174, 2008.

WANG, Xing; GONG, Zhaoning; PU, Ruiliang. Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 10, p. 620, 2018.

## 7 VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A EM UM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO

### Resumo

O semiárido do Piauí é uma região que sofre com a constante escassez de água. Diante disso, o governo tem utilizado da construção de açudes, barragens e reservatórios para atenuar a falta de água. Nesse tipo de estrutura, a afloração de algas é comum, sendo seqüela do processo de eutrofização, principal problema de qualidade da água. O monitoramento da eutrofização deve ser feito afim de evitar a perda da utilização de ambientes aquáticos. Esse monitoramento é comumente realizado por metodologias que envolvem, coletas e análises laboratoriais. Contudo, a grande distribuição espacial dos recursos hídricos e as limitações financeiras dos órgãos públicos tornam esse tipo de monitoramento inviável de ser realizado continuamente. O sensoriamento remoto tem sido utilizado como uma ferramenta alternativa, na prática do monitoramento contínuo, por ser uma tecnologia de baixo custo e possuir ampla escala espacial. O presente trabalho tem como objetivo selecionar e analisar algoritmos de estimativa de clorofila-a para verificar a sua eficiência no semiárido piauiense, em estudo na barragem do Estreito. Foram avaliados seis algoritmos a partir da sua aplicação em imagens do sensor MSI, Sentinel-2. Dados coletados em campo, subsidiaram esta pesquisa. As medidas de acurácia MAE, MAPE e RMSE, foram usadas para verificação dos resultados. A espacialização temporal da clorofila-a na barragem durante o ano 2019, ocorreu a partir do cálculo do TSI, que permitiu verificar o grau de eutrofização do reservatório. Constatou-se, que o último trimestre do ano tem valores de clorofila-a inferiores aos valores do restante do ano.

**Palavras-chave:** Eutrofização, sensoriamento remoto, Sentinel-2, qualidade da água.

### Abstract

The semi-arid region of Piauí is a region that suffers from constant water scarcity. In view of this, the government used the construction of dams, dams and reservoirs to mitigate the lack of water. In this type of structure, an outcrop of algae is common, resulting from the eutrophication process, the main water quality problem. Monitoring of eutrophication must be done to avoid losing the use of aquatic environments. This monitoring is commonly carried out by methods that involve, collection and laboratory analysis. However, a large spatial distribution of water resources and as financial limits of public agencies make this type of monitoring unfeasible to be carried out. Remote sensing was used as an alternative tool, in the practice of continuous monitoring, as it is a low-cost technology with a wide spatial scale. This work aims to select and analyze the chlorophyll estimation algorithm - to verify its efficiency in the Piauí semi-arid region, under study in the Estreito dam. Six algorithms were applied from its application to images from the MSI sensor, Sentinel-2. Data collected in the field, supported this research. As MAE, MAPE and RMSE precision measures, they were used to verify the results. A temporal spatialization of chlorophyll, in the dam during 2019, occurred after the calculation of the TSI, which allowed to verify the degree of eutrophication of the reservoir. It was found that the last quarter of the year had chlorophyll-a values lower than the values for the rest of the year.

**Keywords:** Eutrophication, remote sensing, sentinel-2, water quality.

## 7.1 Introdução

Aproximadamente 50 % do nordeste brasileiro está inserido dentro da região semiárida. Essa região é marcada por apresentar grande diversificação natural, com precipitações médias inferiores a 800 mm, altas temperaturas e elevados índices de evapotranspiração (BRASIL, 2017; SANTOS; CUNHA; RIBEIRO NETO, 2019;) em que os componentes climáticos, são determinantes na variação dos outros elementos que compõem o meio ambiente.

Nesse contexto, a seca é uma das principais complicações derivadas da variabilidade climática na região (CORREIA FILHO et al., 2018; MARENGO et al., 2018). A sazonalidade da ocorrência desse fenômeno, é principalmente, resultado da variabilidade interanual das chuvas, no tempo e espaço (CORREIA FILHO et al., 2018). Marengo, Cunha e Alves (2016) explicam, que além dos déficits de chuvas, o aumento da temperatura, associados a extensos e frequentes períodos de secas, podem aumentar a degradação ambiental.

Toda essa tensão causa o aumento da pressão quanto a disponibilidade de água doce, com qualidade para ser utilizada (GUTIÉRREZ et al., 2014). Por isso, obras de infraestrutura hídricas, como a construção de barragens, açudes e reservatórios (GUTIÉRREZ et al., 2014), foram executadas na tentativa de minimizar, ou até mesmo solucionar os problemas que a falta de água pode causar no abastecimento humano e nos seus demais usos (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). Fatores naturais inerentes ao semiárido contribuem significativamente, para o crescimento da comunidade fitoplanctônica e da concentração de clorofila-a (CHL-a), ocasionando a deterioração da qualidade da água (CICERELLI; GALO, 2015).

A eutrofização é um problema preeminente e sério em corpos d'água superficiais (BARRETO et al., 2013; MOAL et al., 2018). Ela é o resultado do enriquecimento de nutrientes em corpos hídricos, implicando na abundância de algas que são facilmente vistas nos espelhos d'águas (ESTEVES, 2011; LAMPARELLI, 2004; LOPES et al., 2016; MOAL et al., 2018). O monitoramento da eutrofização é de extrema importância, para assegurar e a garantir da água de qualidade (BARRETO et al., 2013).

Gonçalves e Fernandes (2017) pontuam que as metodologias tradicionais de monitoramento da qualidade da água fornecem medições precisas, no entanto, utilizam equipamentos caros, exigindo mão de obra especializada, e por isso, demandam mais recursos financeiros. Além do custo operacional, o monitoramento convencional encontra outra

dificuldade no seu uso em grande escala, pois a grande espacialização dos corpos hídricos, impossibilita o monitoramento de diversos recursos hídricos (BODDULA et al., 2016; GREндаITE et al., 2018).

O sensoriamento remoto, alicerçado em imagens de satélites, é uma importante ferramenta para o auxílio no acompanhamento das condições da qualidade da água, no espaço e no tempo. Sua capacidade em fornecer um monitoramento constante, sinótico e gratuito, se constitui as principais vantagens (BODDULA; RAMASWAMY; MISHRA, 2017). Na literatura, é possível identificar vários sensores de satélites Landsat (KUBIAK; KTLARZ; MAZUR, 2016), Sentinel (GREндаITE et al., 2018; TOMMING et al., 2016), MODIS (CICERELLI; GALO, 2015), MERIS (BRESCIANI et al., 2014; MATTHEWS et al., 2012) utilizados no monitoramento da qualidade da água (MINHOTI et al., 2018; MISHRA; MISHRA, 2012; MOAL et al., 2018).

Diversos autores indicam a CHL-a com um excelente indicador da concentração de biomassa fitoplanctônica nos ambientes aquáticos (GREндаITE et al., 2018). Por isso, existe grande número de algoritmos para estimar a concentração de CHL-a, para aferir o estado trófico de um determinado recurso hídrico. Poddar et al. (2019) ressaltam que a concentração estimada de CHL-a, por meio de sensores remotos, depende sobretudo, dos algoritmos utilizados e das condições regionais do corpo hídrico.

O fato é que a qualidade da água está estreitamente, associada à eutrofização dos recursos hídricos. A aceleração do processo de eutrofização traz consigo preocupações dos mais variados setores da sociedade, pois, além da questão da disponibilidade hídrica e saneamento básico, a eutrofização estagna os processos de desenvolvimento nas regiões onde ela ocorre, inibe diversas práticas econômicas e inviabiliza o uso dos recursos hídricos. Assim, destaca-se aqui a importância de conhecer e monitorar a qualidade da água, uma vez que esses procedimentos são essenciais para a gestão dos recursos hídricos (LOPES et al., 2016).

Assim, o presente trabalho, teve como escopo, a adequação das imagens do satélite Sentinel-2, sensor MSI, para estimar a concentração de CHL-a, a partir de equações semiempíricas existentes na literatura. As equações foram aplicadas na barragem do Estreito, localizada na cidade de Padre Marcos, no semiárido piauiense, e os valores resultantes foram comparados com os dados coletados *in situ* em uma única data.

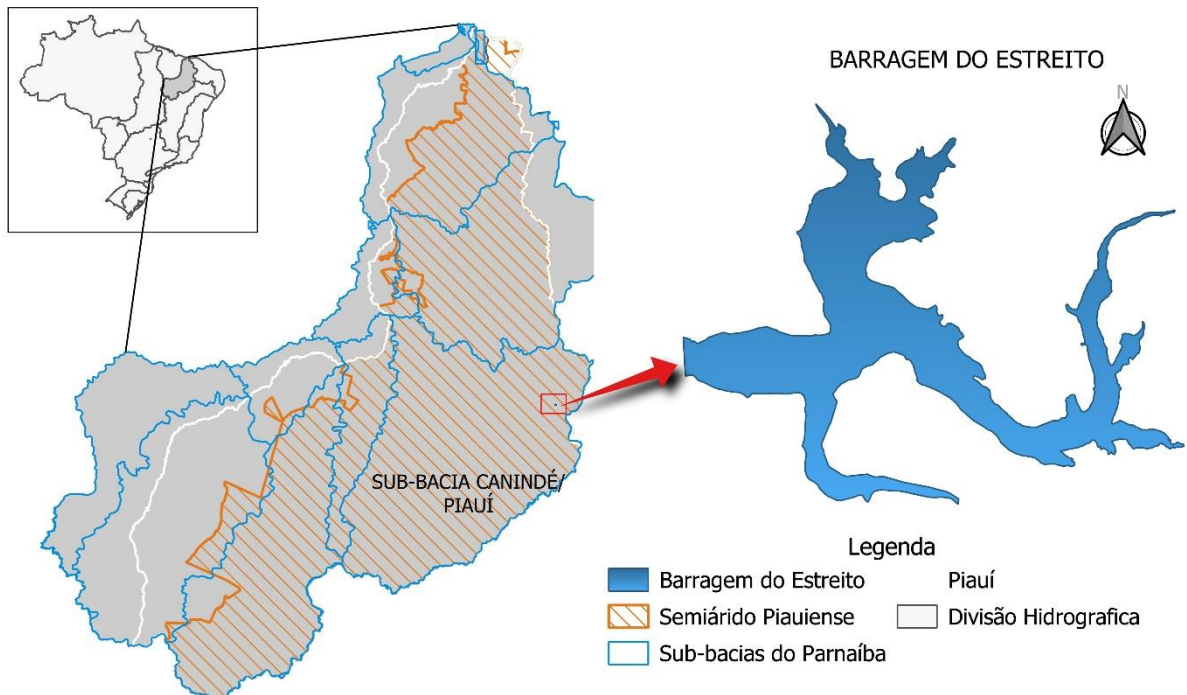
## 7.2 Metodologia

### 7.2.1 Área de estudo

Até meados de 2008, o município de Padre Marcos tinha o abastecimento de água realizado, principalmente, por águas de poços, barrentas e salobras (GP1, 2009). Por consequência dessa situação, foi construída a barragem do Estreito, melhorando e ampliando o sistema de abastecimento de água da região. Com o volume máximo de armazenamento de 23,88 milhões de metros cúbicos (SAR, 2019), essa barragem é uma importante fonte hídrica para o sudeste piauiense, beneficiando aproximadamente 52 mil (IBGE, 2019) habitantes, que residem nos nove municípios limítrofes à barragem (GP1, 2009). Atualmente, no entorno da barragem existem poucas residências, contudo, ocorre a prática de diversas atividades, como criação de animais, piscicultura, lazer e turismo (bares, restaurantes e balneários).

A barragem do Estreito, fica localizada na cidade de Padre Marcos, sudeste piauiense, como é mostrado na Figura 34. A barragem faz parte da bacia hidrográfica do Parnaíba, sub-bacia do Rio Canindé-Piauí. Inserida na região semiárida, essa sub-bacia tem como características: baixa capacidade de retenção de água, precipitações escassas e irregulares.

Figura 34 – Localização da área de estudo

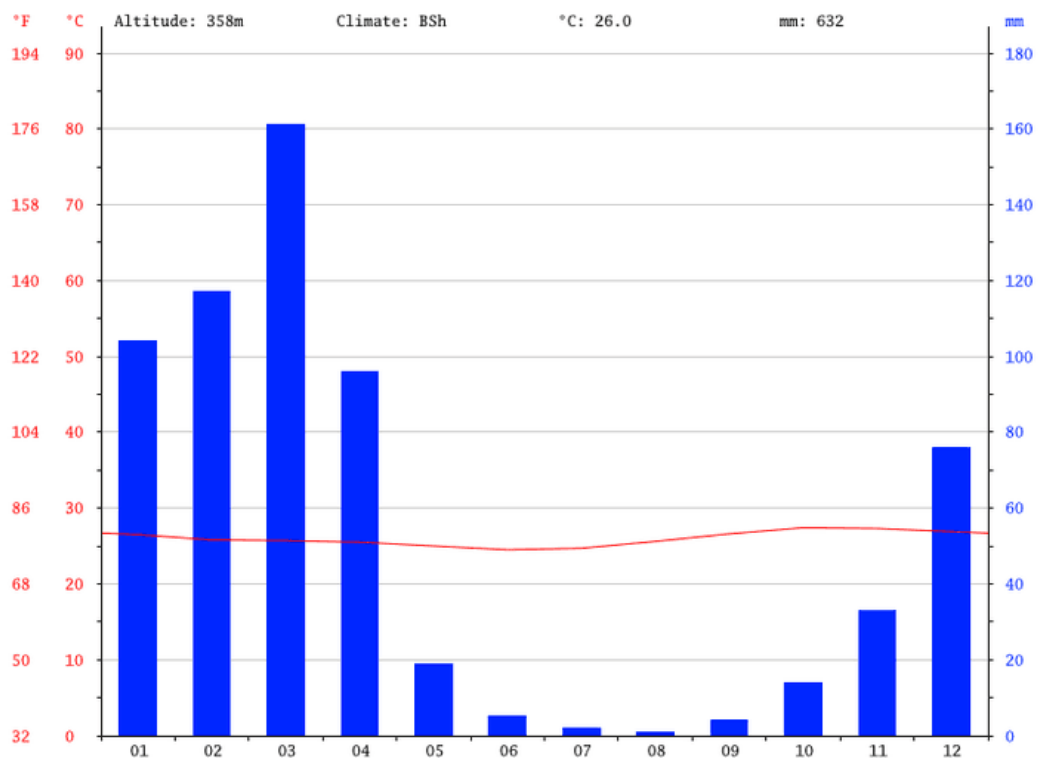


Fonte: Elaborado pelos autores

O município de Padre Marcos tem predominância do clima estepe local (CLIMADATE, s.d.) com a classificação climática de Koppen e Geiger do tipo Bsh. Segundo Ayoade (1996) esse tipo climático é predominantemente seco, com temperaturas médias anuais superiores a 18° C, e com chuvas distribuídas, sazonalmente, na estação seca de verão. Em regiões com clima Bsh, a evapotranspiração média anual, é maior que a precipitação. A temperatura média anual de Padre Marcos, expressa por meio da linha vermelha da Figura 35, é 26° C, com mínima de 24° C e máxima de 28° C, amplitude térmica de 2,9° C.

Ainda, com base na Figura 35, é possível observar à irregularidade pluviométrica da região, o período seco engloba os meses entre maio e novembro, já o período chuvoso varia entre o mês de dezembro até abril. As precipitações em Padre Marcos chegam a atingir valores médios anuais de 632 mm. O mês de agosto apresenta menor precipitação média 1 mm, enquanto, o mês de março tem média de 161 mm de precipitação, variação de 160 mm (CLIMADATE, s.d.).

Figura 35 – Temperatura e precipitação média em Padre Marcos



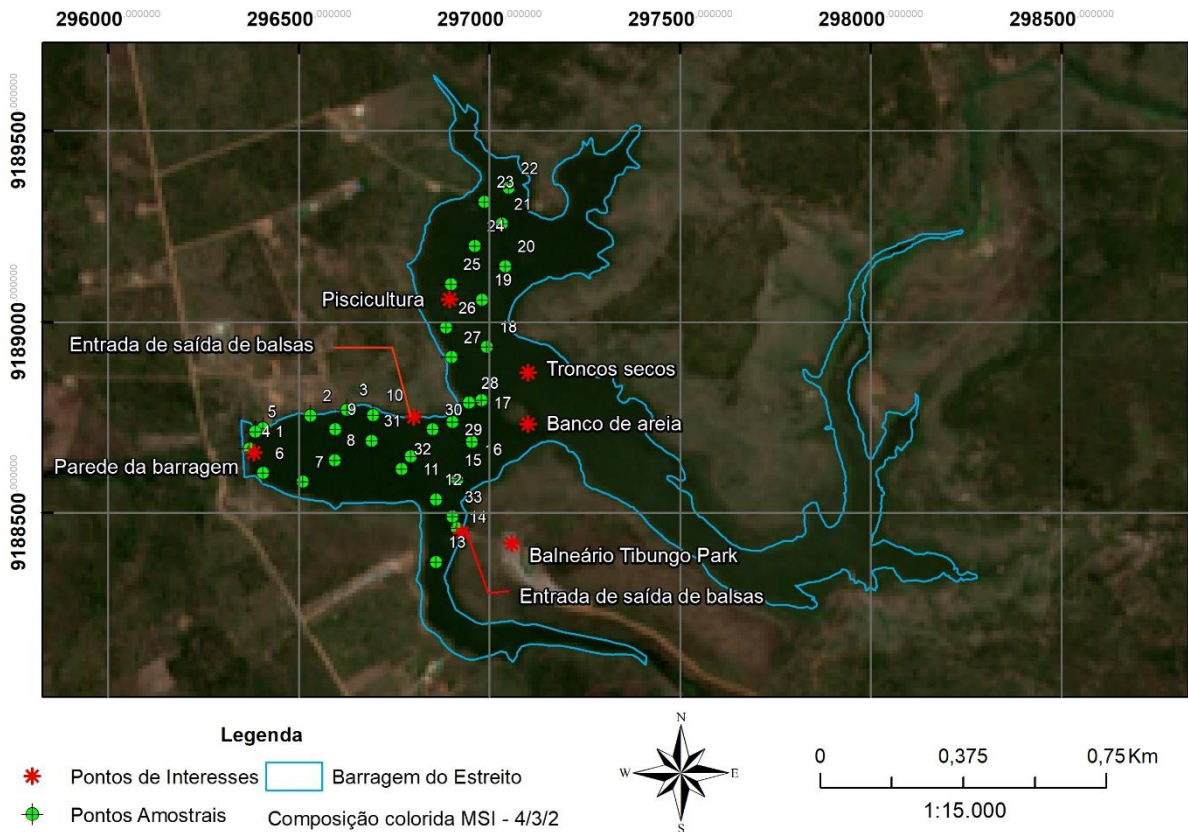
Fonte: Climadate (s.d)

**7.2.2 Medição da clorofila-a in situ**

Foram coletadas amostras de água, superficialmente (0,3 m), zona eufótica, em trinta e três estações distribuídas ao longo da barragem do Estreito (Figura 36), no dia 21 de setembro de 2019, período seco na região. Os pontos amostrais foram concentrados nas áreas próximas a parede da barragem, balneário e tanques de piscicultura. As demais regiões do reservatório, encontravam-se inavegáveis, devido à grande quantidade de troncos secos.

Os procedimentos metodológicos de coleta das amostras seguiram as recomendações descritas por Brandão et al. (2011). Foram utilizados frascos de vidro revestidos com papel alumínio para evitar o processo de interação entre a luz solar com as amostras. Os recipientes foram conservados em ambiente resfriado até a chegada ao laboratório, onde foram realizados os demais procedimentos.

Figura 36 – Localização dos pontos amostrais



Fonte: Elaborado pelos autores

Foram filtrados 100 ml de cada amostra, a vácuo, utilizando, membranas filtrantes com poros de 45 µm e diâmetro de 45 mm, em ambiente com luminosidade reduzida. Seguiu-se a

metodologia para a determinação da concentração da CHL-a proposta por Jones (1979), sem maceração. Os papéis filtros contendo as amostras de CHL-a foram imersos em 7 ml de metanol 100%, colocados em banho maria, após iniciar o processo de ebulição contou-se 2 minutos, retirando o material do banho maria, para que ele retornasse a temperatura ambiente. Em seguida, nos recipientes em que houve a evaporação do metanol, foram adicionados solvente até a marca de 7 ml. A centrifugação do material ocorreu durante 5 minutos à 2500 rpm.

As verificações espectroscópicas foram realizadas nos comprimentos de onda de 665 nm e 750 nm, utilizando como branco, cubetas espectrofotométricas de quartzo de 1cm com metanol 100%. Por fim, foram calculadas as concentrações de CHL-a, através da diferença das absorvâncias multiplicadas pelo coeficiente de extração específico do metanol 100%, vezes o volume de 7 ml do extrato. O resultado dessa operação foi dividido pelo volume total filtrado 100 ml, conforme fórmula descrita por Jones (1979).

### 7.2.3 *Imagens de satélite*

As imagens utilizadas nessa pesquisa são oriundas do sensor *Multi-Spectral Instrument* (MSI), obtidas em nível de processamento 1C, adquiridas gratuitamente no endereço eletrônico do Serviço Geológico Americano (USGS), em data próxima à coleta de dados *in situ*. O sensor MSI a bordo da constelação de satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B foram lançados respectivamente, em 2015 e 2017, pela Agência Espacial Europeia (ESA).

Os satélites Sentinel-2 imageam uma faixa territorial de 290 km (USGS, 2018), com 13 bandas espectrais, resoluções espaciais de 10, 20 e 60 metros com resolução temporal de até 5 dias. Esses satélites têm resolução radiométrica de 12 bits e comprimento de onda que abrange 443 a 2190 nm (GRENDALTE et al., 2018).

Devido à influência dos fatores atmosféricos na refletância da água, foi necessária a correção das informações 1C, referentes à reflectância ortorretificada do topo da atmosfera (TOA) para o nível 2A compatível com o nível de refletância da superfície da física da Terra (BOA). A correção atmosférica foi realizada no aplicativo *Atmospy* desenvolvido pelo LABISA, a partir do algoritmo 6S (VERMON et al., 1997). As informações usadas na correção atmosférica foram extraídas do arquivo metadados de cada imagem. É válido salientar, que devido à inexistência de dados de reflectância *in situ*, o desempenho da correção atmosférica não foi validado.



Na Tabela 12, é apresentado um resumo dos algoritmos testados nesse estudo. A sua escolha levou em consideração a diversidade de contextos, sensores, locais de aplicações e o seu bom coeficiente de determinação ( $R^2$ ), possibilitando assim, observar como esses algoritmos se comportam em diferentes cenários. Além disso, a tabela descreve as equações de cada algoritmo analisado, o seu  $R^2$  e as bandas espectrais correspondentes ao sensor Sentinel-2. É importante ressaltar, que as faixas espectrais utilizadas no seu desenvolvimento desses algoritmos são diferentes das faixas espectrais do sensor MSI. Assim foi realizada adequação desses valores utilizando as bandas espectrais com valores mais próximos aos valores originais de cada algoritmo.

Tabela 12 – Especificações dos algoritmos analisados

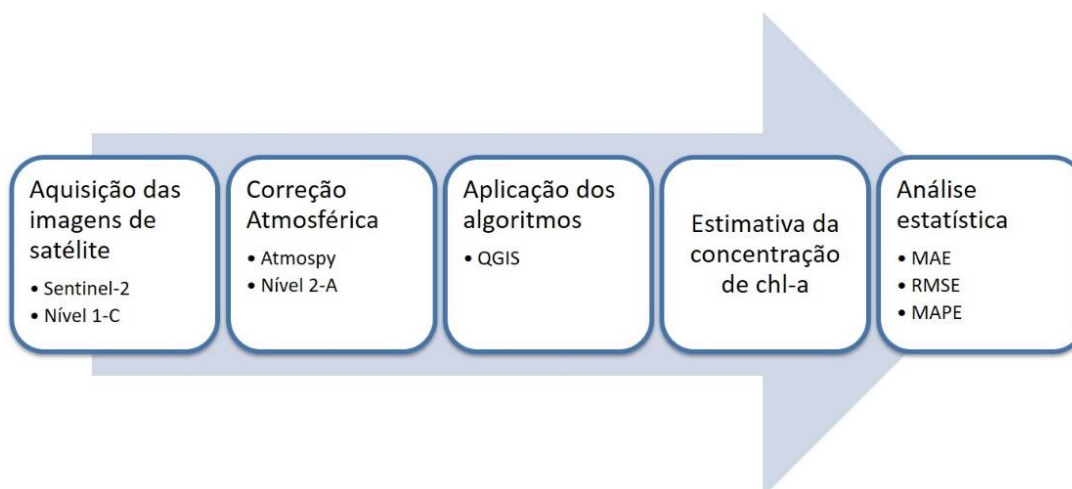
Ident.	Autores	Sensores	Local de Aplicação	Equações	Precisão $R^2$	Bandas Sentinel
Ch1	DUAN et al. (2007)	Multiespectral	China	$93.67 \times \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right) - 90.40$	0,69	B4, B5
Ch2	MOSES et al. (2009)	MERIS	Rússia	$232.29 \times [(R_{665}^{-1}) \times (R_{708}^{-1})] \times R_{753} + 23.174$	0,95	B4, B5, B6
Ch3				$61.324 \times ((R_{665}^{-1}) \times R_{708}) - 37.94$	0,97	B4, B5
Ch4	MISHRA; MISHRA (2012)	MERIS	EUA	$14.039 + 86.115 \times \left(\frac{R_{708} - R_{665}}{R_{708} + R_{665}}\right) + 194.325 \times \left(\frac{R_{708} - R_{665}}{R_{708} + R_{665}}\right)^2$	0,93	B4, B5
Ch5	BRESCIANI et al. (2014)	MERIS e ASAR	Klaipeda	$86.96 \times \left(\frac{R_{708}}{R_{664}}\right) - 67.8$	0,93	B4, B5
Ch6	TOMMING et al. (2016)	Multiespectral	Estônia	$2231 \times R_{705} - \left(\frac{R_{665} - R_{740}}{2}\right) + 12.7$	0,80	B4, B5, B6

Fonte: Elaborado pelos autores

A eficiência dos modelos foi testada com o uso de métodos estatísticos, verificando os dados de CHL-a estimados em relação aos dados coletados *in situ*. Para isso foram utilizadas as medidas de acurácia: *mean absolute error* (MAE) para medir a magnitude do erro a partir da diferença absoluta entre o previsto e o medido, *root mean square error* (RMSE) para verificar a diferença entre os valores previstos e os valores medidos *in situ* e o *mean absolute percentage error* (MAPE) usado para avaliar a precisão da estimativa das concentrações.

Na Figura 37, são ilustradas as etapas metodológicas realizadas a partir de dados de sensoriamento remoto para a realização do estudo, contemplando desde a aquisição das imagens culminando na análise estatísticas, etapa final do estudo.

Figura 37 – Etapas metodológicas do sensoriamento remoto



Fonte: Elaborado pelos autores

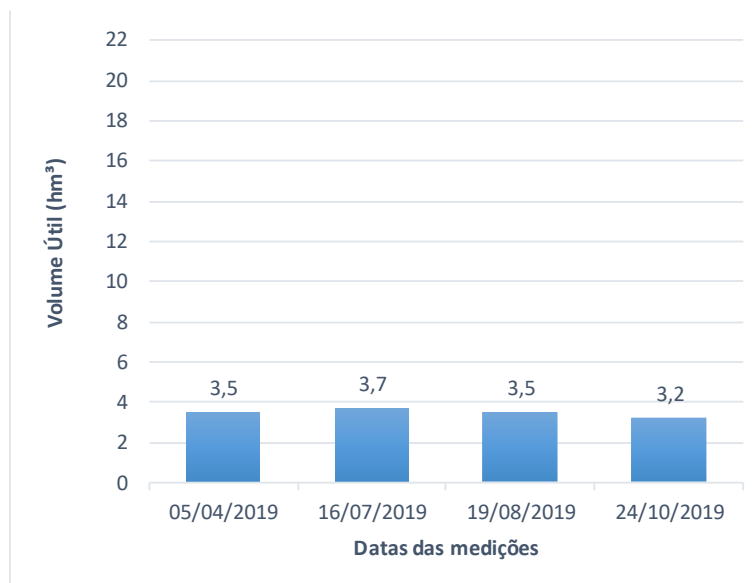
Após a exploração estatística, o algoritmo que apresentou valores mais compatíveis com a realidade local, ou seja, com os dados coletados in loco, foi utilizado para a análise da variação temporal da CHL-a na barragem do Estreito, durante o ano de 2019. A espacialização dos resultados foi realizada por meio do *Trophic State Index* (TSI), proposto por Carlson (1977) e modificado por Lamparelli (2004) para determinar o grau de trofia em corpos hídricos e avaliar de forma prática a qualidade da água.

### 7.3 Resultados e discussão

Como pôde ser observado, o nordeste brasileiro, além da variabilidade climática natural, também possui várias sub-regiões, onde predomina uma grande diversificação de vegetação, relevo, solo, água e de aspectos socioeconômicos (MARENGO et al., 2018). Essas condições ambientais têm reflexos diretos nos volumes dos reservatórios na região (ROCHA JÚNIOR et al., 2018).

Conforme dados volumétricos registrados pelo sistema de acompanhamento de reservatórios da ANA, em 2019, fica evidenciada a disponibilidade hídrica nesse reservatório, que estava abaixo dos 20% (Figura 38). O volume reduzido do reservatório, causa prejuízos para a população, pois além da quantidade de água ser pequena, um baixo nível de água proporciona a aceleração do processo de eutrofização (ESTEVES, 2011).

Figura 38 – Volume útil da barragem do Estreito durante o ano de 2019



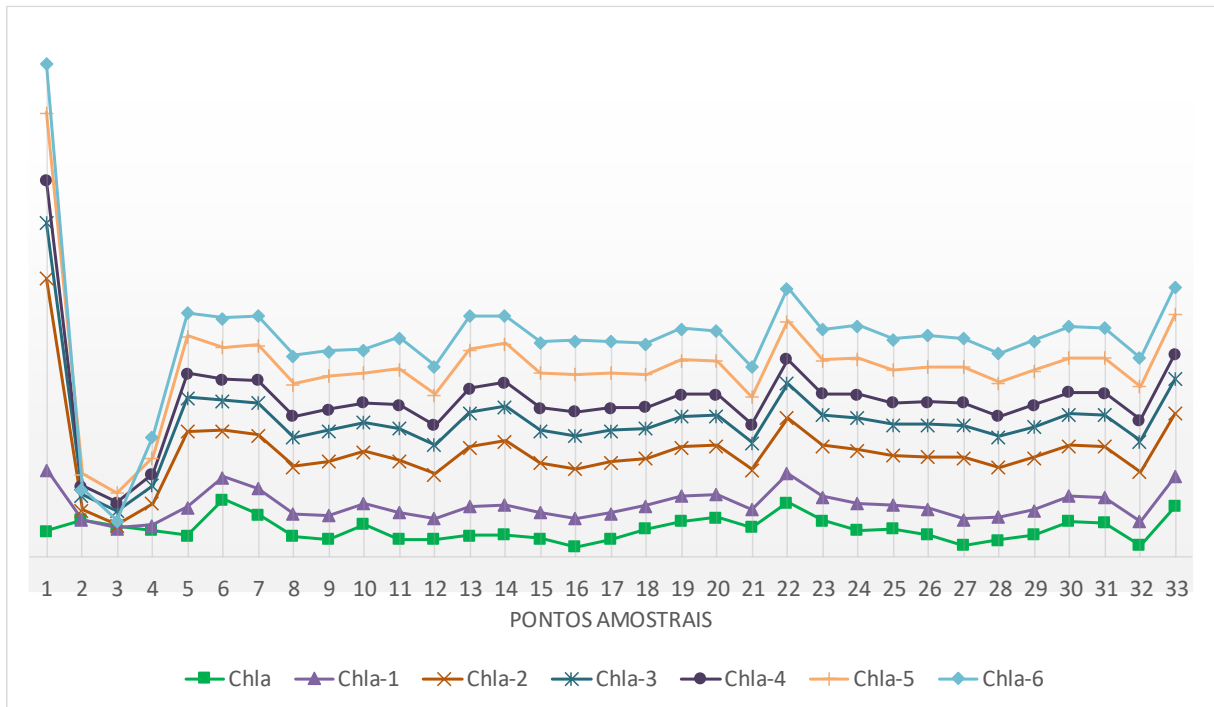
Fonte: ANA (s.d).

Devido a importância que a água tem, trabalhos desenvolvidos utilizando dados de sensoriamento remoto têm sido realizados com a finalidade de estimar a concentração de CHL-a. Nessa conjuntura, o sensor MSI se destaca pelas suas especificações. Elas permitem a sua ampla utilização no monitoramento e mapeamento de ambientes aquáticos (GRENDAITE et al.; WATABANE et al., 2018).

As faixas espectrais do MSI abrangem os comprimentos de onda responsáveis por identificar a CHL-a em ambientes aquáticos. Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) explicam que a CHL-a absorve na região do vermelho 645 nm (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012), com picos de reflexão entre 700 e 720 nm (TOMING et al., 2016), comprimentos de ondas que são atribuídos as bandas espectrais 4 (665 nm), 5 (705 nm) e 6 (740nm) do sensor MSI. Os algoritmos testados nesse trabalho basearam-se em equações que utilizam os comprimentos de onda entre 665 nm à 740 nm, correspondentes as faixas de bandas espectrais 4, 5 e 6 do sensor MSI.

Na Figura 39, são mostrados os resultados de cada algoritmo em um gráfico de empilhamento, em que é possível observar o comportamento semelhante em todos os algoritmos, com picos máximos de concentração de CHL-a foram observados nos pontos E1 e mínimos no E3.

Figura 39 – Comportamento dos algoritmos na barragem do Estreito



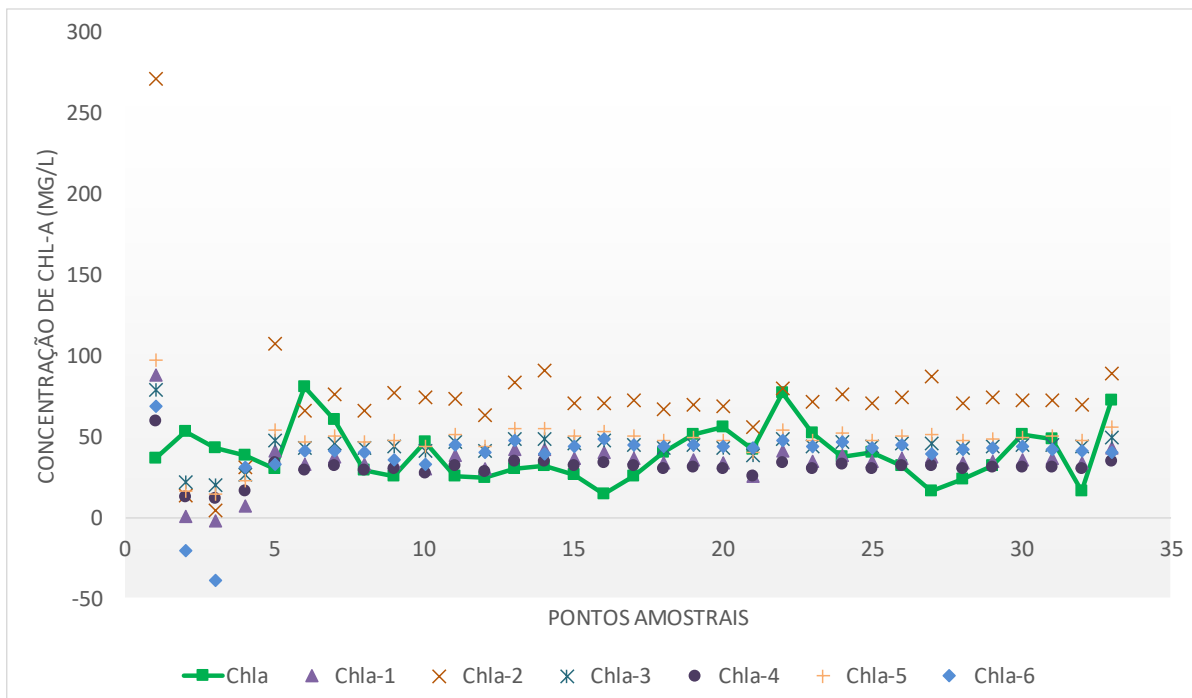
Fonte: Elaborados pelos autores

A linha destacada em verde representa a concentração de chla coletada *in situ*. O comportamento da chla *in situ* se mostrou semelhante aos comportamentos dos algoritmos testados. Entretanto, em todos os algoritmos os pontos E1, E2 e E3 retornaram valores superiores aos valores *in situ*.

Na Figura 40, são apresentados os resultados comparativos, das concentrações de chla *in situ* na Barragem do Estreito e dos algoritmos testados (Tabela 12). Nela é possível observar, que os pontos E6, E22 e E33 foram os que obtiveram maiores concentrações de CHL-a. Já os pontos E16, E27 e E32 são os que apresentaram as menores concentrações de CHL-a. Realizando o comparativo entre os valores máximos e mínimos da concentração da chla *in situ* e o estimado através dos algoritmos, observou-se que diferentemente do que aconteceu com os dados coletados *in situ*, em todos os algoritmos as menores concentrações de CHL-a acontecem nos pontos E2 ao E4 e a maiores concentrações no ponto E1,

Sobre o padrão das curvas, o algoritmo Chl2, se destaca por ter valores superestimados, o que o diferenciou dos demais algoritmos. Já o algoritmo Chl6, por sua vez, obteve concentrações de CHL-a semelhante aos demais algoritmos, superestimando os valores somente no ponto E1 e subestimando nos pontos E2 e E3.

Figura 40 – Gráfico comparativo entre os valores estimados pelos algoritmos e a concentração de CHL-a amostrada *in situ*



Fonte: Elaborado pelos autores

A disparidade dos resultados nos pontos E1, E2 e E3 pode ser em consequência da localização dos pontos mais próxima às margens do reservatório. Tradicionalmente, pontos mais próximos as margens têm influência da zona litorânea, área de transição entre o ambiente terrestre e aquático (ESTEVES, 2011). Assim, essa mesma interferência pode causar distúrbios na capacidade de detecção dos alvos através do sensoriamento remoto, pois, podem existir plantas ou resquícios delas, que afetam a resposta espectral e consequentemente os resultados estimados por algoritmos (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

No geral, os algoritmos Ch11, Ch13, Ch14 e Ch15, de duas bandas (vermelha e vermelho próximo) tiveram o mesmo comportamento, mudando somente a amplitude dos valores de abrangência, o que é reflexo da heterogeneidade dos locais de criação de cada algoritmo. Percebe-se também que o algoritmo Ch14 foi o que se mostrou mais próximo dos valores coletados *in situ*.

Os algoritmos aqui estudados foram desenvolvidos para regiões de clima temperado (China, Reino Unido, Rússia, Klaipeda e Estônia), enquanto a região estudada apresenta clima

semiárido. Aplicabilidade dos algoritmos desenvolvidos para outras regiões climáticas pode apresentar consequências na eficiência dos algoritmos durante a concentração de CHL-a (FERREIRA et al., 2017; GREINDAITE et al., 2018).

A Tabela 13 mostra o erro médio absoluto (MAE), o erro médio quadrático (RMSE) e a porcentagem do erro médio absoluto relativo (MAPE %), calculados para cada um dos modelos de concentração de CHL-a testados. Camelo et al. (2016) sugerem essas medidas estatísticas como forma de avaliar a precisão dos modelos de estimativas.

Tabela 13 – Medidas de acurácia dos modelos de estimativa da concentração de clorofila-a

Autores	Algoritmos	MEAN		
		ABSOLUTE ERROS (MAE)	RMSE	MAPE
Duan et al. (2007)	Chl1	18.54	23.25	50%
Moses et al. (2009) A	Chl2	41.56	56.66	142%
Moses et al. (2009) B	Chl3	17.29	20.03	56%
Mishra e Mishra (2012)	Chl4	16.19	20.91	40%
Bresciani et al. (2014)	Chl5	19.54	23.48	67%
Tomming et al. (2016)	Chl6	19.15	26.22	57%

Fonte: Elaborado pelos autores

Nos modelos avaliados, o MAE oscilou entre 16,19 (Chl4) a 41,56 (Chl2) mostrando que, o modelo Chl2 tem maiores erros absolutos em relação aos dados *in situ*, enquanto o Chl4 para esse parâmetro estatístico tem o menor erro absoluto. A acurácia dos modelos foi medida por meio da associação dos resultados do MAE, RMSE e MAPE. Conforme Camelo et al., 2016, quanto mais próximo de zero for o RMSE, melhor será o ajuste das amostras. A partir disso, é presumível que o melhor algoritmo para extrair a concentração de CHL-a na barragem do Estreito é o Chl3 e o menos eficiente o Chl2. Analisando o MAPE, foi verificado a extrapolação nos resultados do Chl2 (142%), enquanto o Chl4 só errou 40% da sua predição.

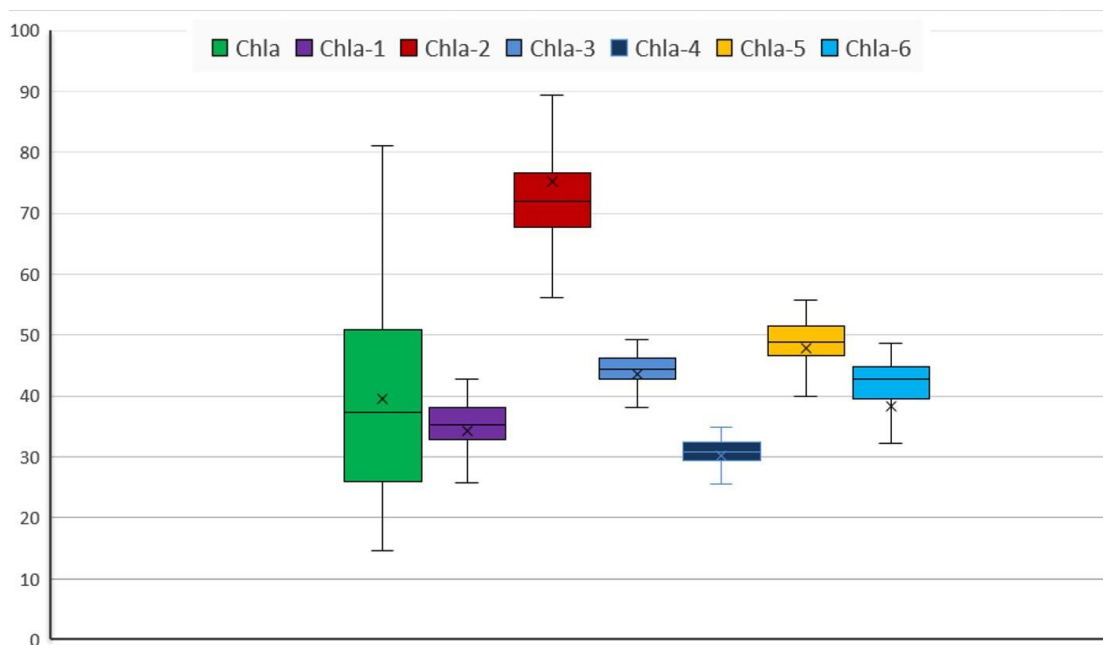
Para auxiliar na análise estatística, na Figura 41 são representados graficamente os modelos de concentração de CHL-a por meio do diagrama de caixas. Nele foi possível fazer comparações entre os valores máximos, médios e mínimos, analisando as perspectivas da concentração de CHL-a. O diagrama de caixa chl4 da concentração de clorofila medida *in situ* (cor verde) apresentou grande variabilidade, indicando a ausência de valores discrepantes

dentro do conjunto amostral. O limite inferior desse conjunto de dados foi de 14,56 mg/L, com mediana de 37,31mg/L e limite superior de 80,99 mg/L, sem a presença de *outliers*.

O conjunto de dados representados pelo chla-1, obtiveram resultados com pouca variabilidade, em que seus limites mínimos e máximos, foram, respectivamente 29,56 e 42,77 mg/L, com cinco *outliers*, que indicam que alguns resultados se apresentaram muito distantes dos demais da série. É possível verificar que o chla-1, tem valores compatíveis com os presentes na série CHL-a, entretanto, seus valores têm pequena amplitude.

Comparando a Figura 40 com a Figura 41, é constatado que os resultados da concentração de clorofila-a são superestimados pelo algoritmo chl-2. A diferença é tão grande, que o limite inferior do chla-2 é superior ao terceiro quartil da chla. Outro aspecto relevante, mostrado pela Figura 41, é que os algoritmos chl-3, chl-4, chl-5 e chl-6 apresentam valores bem semelhantes e com poucos *outliers*.

Figura 41 – *Boxplot* da concentração de CHL-a



Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo Chl-4 elaborado por Mishra e Mishra (2012), melhor entre os modelos avaliados, foi utilizado para especializar a concentração de CHL-a durante o ano de 2019 em seis épocas distintas (Figura 42) utilizando o TSI.

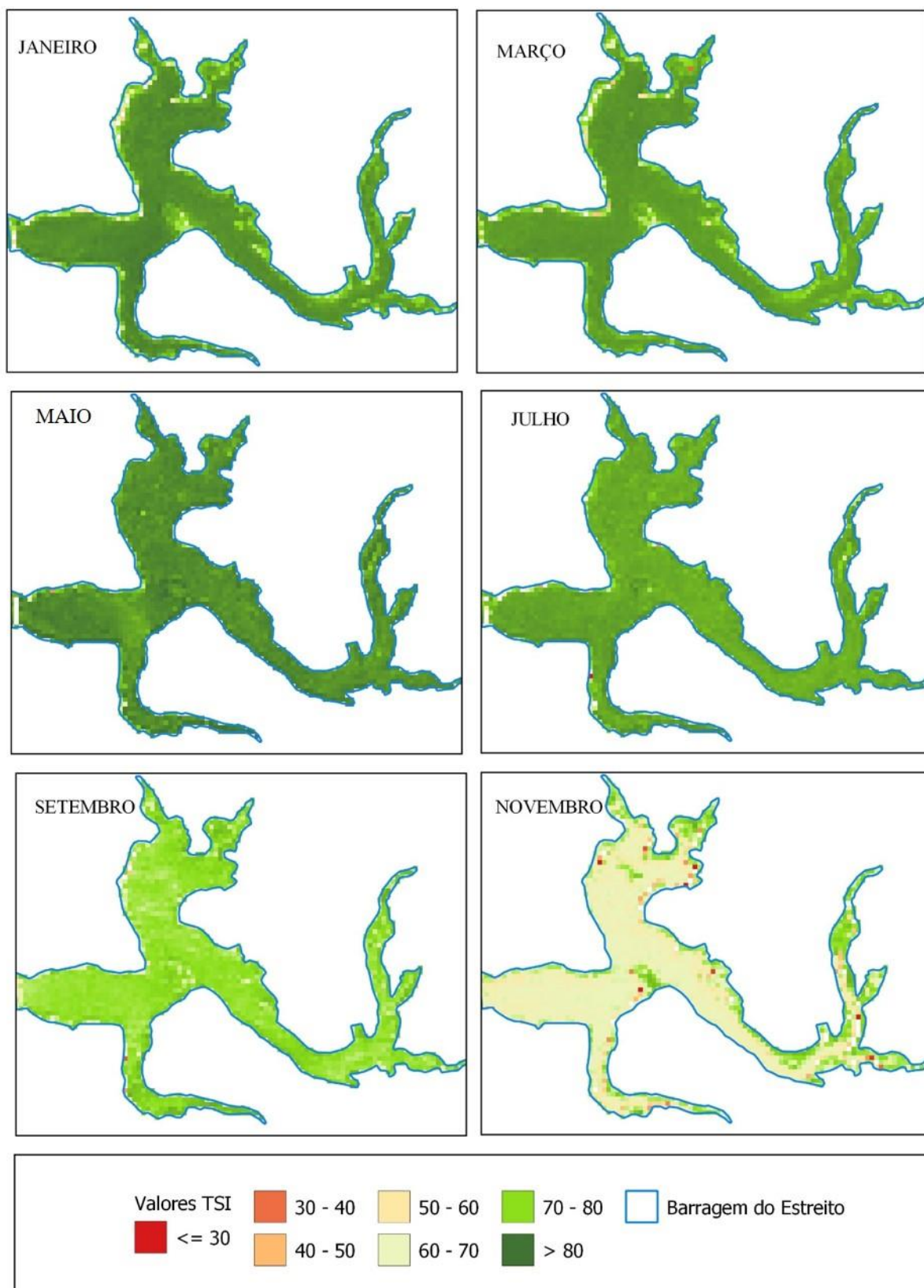
No primeiro trimestre (janeiro a março) de 2019, a barragem do Estreito apresentou altas de concentrações de CHL-a. O TSI desse trimestre foi superior a 80 mg/L em quase toda a totalidade da barragem. Durante o mês de abril, a barragem exibiu o mesmo comportamento anterior, indicando um possível processo de eutrofização recorrente. Conforme Rocha Júnior et al. (2018) o longo período de seca na região, associado a redução do volume do reservatório (Figura 38) explicam o aumento de nutrientes na água, e a eutrofização prolongada durante os seis primeiros meses do ano.

A partir de julho, é possível observar que a intensidade do processo de eutrofização passa a ser menor, quando comparada ao mês de abril. Chuvas esporádicas na região podem ter influenciado na redução quantitativa de CHL-a na barragem. Em setembro, essa redução ficou mais explícita. O TSI desse período, reduziu sua escala de valores para a faixa de 70 a 80 mg/L. Diferentemente do esperado, o período mais quente da região não foi o mesmo período referente as maiores concentrações de CHL-a na barragem do Estreito.

A provável explicação para a eutrofização dessa barragem, diz respeito às altas temperaturas da região e o baixo volume de água durante todo o ano, como foi verificado na Figura 38. Rocha Júnior et al. (2018) explicam, que o volume de água é inversamente proporcional ao risco de eutrofização, ou seja, quanto menor o volume de um reservatório, maior é a sua probabilidade de eutrofização.



Figura 42 – Variação temporal do TSI na barragem do Estreito



Fonte: Elaborado pelos autores

## 7.4 Conclusões

Nesse estudo, pôde-se perceber que a seca pode impactar nos recursos hídricos, afetando sua quantidade e qualidade. Aqui, não se buscou analisar com rigor a concentração de CHL-a medida *in situ*, mas sim, comparar os resultados coletados com os resultados provenientes do sensoriamento remoto. Apesar disso, os trinta e três pontos amostrais coletados puderam retratar a realidade local, por estarem próximos aos locais onde a utilização das águas desse reservatório é mais constante.

Os algoritmos analisados apresentaram em sua maioria comportamento semelhante, sobretudo, os algoritmos alicerçados nas faixas espectrais de 665 e 705 nm. Sendo assim, eles são os mais aceitáveis para uma análise exploratória da qualidade da água em ambientes semiáridos.

O fato é, que os algoritmos aqui analisados foram desenvolvidos para outras regiões com características muito particulares e diferentes do semiárido piauiense. É notório a necessidade do desenvolvido um algoritmo próprio, para esse reservatório, e ou, região, levando em considerações as características intrínsecas a ela. Desse modo, os valores estimados pelo algoritmo serão mais condizentes com os valores reais, refletindo e proporcionando um monitoramento contínuo de qualidade.

Assim, foi possível constatar que o sensoriamento remoto vem se tornando cada dia mais utilizado, reflexo dos lançamentos de sensores cada vez mais potentes, para o monitoramento da superfície terrestre. Entre os sensores mais recentes, o satélite Sentinel-2 se mostrou adequado para a obtenção da concentração de CHL-a na barragem do Estreito, semiárido piauiense.

## 7.5 Referências

ANA – **Agência Nacional das Águas. Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR.** S.d. Disponível em <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao?dropDownListEstados=19&dropDownListReservatorios=12175&dataInicial=01%2F01%2F2019&dataFinal=31%2F12%2F2019&button=Buscar>

ANA – **Agência Nacional das Águas. Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Sistema de Acompanhamento de Reservatórios - SAR. 2019.** Disponível em:< <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>>. Acesso em: 28 set. 2019.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos.** 11ª edição. Bertrand Brasil, 2006.

BARRETO, L. V.; BARROS, F. M.; BONOMO, P.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. da S. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer-Goiânia**, v. 9, n. 16, p. 2167, 2013.

BODDULA, V.; RAMASWAMY, L.; MISHRA, D. A Spatio-Temporal Mining Approach for Enhancing Satellite Data Availability: A Case Study on Blue Green Algae. In: **2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)**. IEEE, 2017. p. 216-223.

BODDULA, V.; RAMASWAMY, L.; PASUMARTHI, R.; MISHRA, D. Data Driven Analysis of Algal Bloom Activity for Effective Water Sustainability. In: **2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-SocialCom-SustainCom)**, IEEE, 2016. p. 424-430.

BRANDÃO, C. J. et al. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: *CETESB*, 2011.

BRASIL. **Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro**. N ° 115/2017 da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. Recife. 2017

CAMELO, H. N.; LUCIO, P. S.; LEAL JÚNIOR, J. B. V.; CARVALHO, P. C. M. Métodos de previsão de séries temporais e modelagem híbrida ambos aplicados em médias mensais de velocidade do vento para regiões do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 565-574, 2017.

CARLSON, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**. 22(2): 361-369.

CICERELLI, R. E.; GALO, M. de L. B. T. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 259-265, 2015.

CLIMADATE-DATA.ORG. **Clima Padre Marcos**. S.d. Disponível em <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/piaui/padre-marcos-312137/>

CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTOS, T. V. dos.; DIOGO, A. M.; AMORIM, R. F. C. de. Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHLSA product. **Big Earth Data**, v. 3, n. 4, p. 315-337, 2019.

DUAN, H. et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. **Environmental monitoring and assessment**, v. 129, n. 1-3, p. 295-308, 2007.

ESTEVEES, F. de A. **Fundamentos de Limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2011, 790 p.

GONÇALVES, V. D.; FERNANDES, C. V. S. Variabilidade espaço-temporal de parâmetros de qualidade da água ao longo de seção de monitoramento do rio Iguçu. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 533-553, 2017.

GP1. **Piauí: Barragem do Estreito terá mais 25% de armazenamento.** 2009. Disponível em: <<https://www.gp1.com.br/noticias/piaui-barragem-do-estreiro-tera-mais-25-de-armazenamento-62283.html>>. Acesso em: 01 abr. 2019.

GRENDAITĖ, D.; STONEVICIUS, E.; KAROSIENE, J.; SAVADOVA, K.; KASPEROVICIENE, J. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. **Geologija. Geografija**, v. 4, n. 1, 2018.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; NYS, E. de.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Comitê de Estatísticas Sociais.** S.d. Disponível em: <https://ces.ibge.gov.br/apresentacao/portarias/200-comite-de-estatisticas-sociais/base-de-dados/1147-contagem-da-populacao.html>

JONES, J.G. A. Guide to Methods for Estimating Microbial Numbers and Biomass in Freshwater. Ambleside: **Freshwater Biological Association Scientific Publication.** v. 39, 1979.

KUBIAK, K. A.; KOTLARZ, J.; MAZUR, A. M. **Monitoring Cyanobacteria Blooms in Freshwater Lakes using Remote Sensing Methods.** **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 25, n. 1, 2016.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo - SP, 2004. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/.../TeseLamparelli2004.pdf)>. Acesso em: 05 de jul. de 2018.

LOPES, F. B.; NOVO, E. M. L. de M.; BARBOSA, C. C. F.; ANDRADE, E. M. de.; FERREIRA, R. D. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 1973-1985. Ago. 2018. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 15 jan.2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49-54, 2016.

MATTHEWS, M. W.; BERNARD, S.; ROBERTSON, L. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 637-652, 2012.

MINHONI, R. T. de A.; PINHEIRO, M. P. M. A.; FILGUEIRAS, R.; ZIMBACK, C. R. L. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de macrófitas aquáticas no reservatório de barra Bonita, SP. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 330, 2018.

MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394-406, 2012.

MOAL, M. L. et al.; ODOUX, C. G.; MÉNESGUEN, A. M.; SOUCHON, Y.; ÉTRILLARD; C. LEVAIN, A.; MOATAR, F.; PANNARD, A.; SOUCHU, P.; LEFEBVRE, G. P. Eutrophication: A new wine in an old bottle? **Science of the total environment**, v. 651, p. 1-11, 2019.

MOSES, W. J. et al. Satellite estimation of chlorophyll-A concentration using the red and NIR bands of MERIS —The Azov sea case study. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 4, p. 845-849, 2009.

PODDAR, S.; CHACKO, N.; SWAIN, D. Estimation of Chlorophyll-a in northern coastal Bay of Bengal using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI sensors. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 598, 2019.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2ª ed. Revisada e ampliada. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ROCHA JÚNIOR, C. A. N. da; COSTA, M. R. A. da.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliense**, Rio Claro, v. 30, e106, 2018. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2179-975X2018000100802&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-975X2018000100802&lng=en&nrm=iso)>. <https://doi.org/10.1590/s2179-975x2117>.

SANTOS, S. R. Q. dos; CUNHA, A. P. M. do A.; RIBEIRO NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

TOMMING, K.; KUTSER, T.; LAAS, A.; SEPP, M.; PAAVEL, B.; NOGES, T. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016.

USGS. **Missions Sentinel-2**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M. & MORCRETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. **IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens.** v.35: p. 675-686, 1997.

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

## 8 MONITORING WATER QUALITY IN RESERVOIRS IN THE SEMI-ARID REGION OF PIAUÍ: A REMOTE SENSING APPROACH

### ABSTRACT

This work was developed to execute an elaborate algorithm to estimate the concentration of chlorophyll-a (CHL-a), and special special results through a series of time space, for Barreiras, Bocaina, Estreito and Piaus reservoirs, without semi-washing. Piauí during the years 2017 to 2019. CHL data - collected in situ and data from the Sentinel-2 satellite were used to develop four linear regression models. Equation 4 was the one that improved performance ( $R^2 = 0.95$ ), and was used to estimate the concentration of CHL in the four reservoirs during the study period. In addition, time series were studied using the Bfast algorithm and time series, using the QGIS software, in order to detect seasonal changes and trends. It was found that in many months of the year, there is a large amount of clouds in the images, making their use unfeasible. The results show that remote sensing images are highly influenced by climatic factors, or show the need for periodic monitoring of CHL-a. Remote sensing has demonstrated an important fact in monitoring CHL-a. As for the concentration of CHL-a, it was found that most of the reservoirs have high levels of CHL-a, but that in periods prior to the year this concentration is reduced, with a seasonal rate being applied. Among the reservoirs studied, the Estreito was the one that stood out for presenting the best CHL values - during the period studied, the Bocaina reservoir was identified as the reservoir with the worst trophic state, that is, the maximum level of CHL-a.

**Keywords:** chlorophyll-a, eutrophication, Sentinel-2, linear regression.

### Monitoramento da qualidade da água em reservatórios do semiárido piauiense: abordagem por sensoriamento remoto

### RESUMO

Esse trabalho foi desenvolvido visando-se elaborar algoritmo de estimativa de concentração de clorofila-a (CHL-a), e especializar seus resultados por meio de uma série espaço-temporal, para reservatórios Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus, localizados no semiárido piauiense durante os anos de 2017 a 2019. Dados de CHL-a coletados *in situ* e dados provenientes do satélite Sentinel-2 foram utilizados para a elaboração de quatro modelos de regressões linear. A equação 4 foi a que obteve melhor desempenho ( $R^2 = 0,95$ ), ela foi utilizada para estimar a concentração de CHL-a nos quatro reservatórios durante o período de estudo. Além disso, foram estudadas séries temporais através do algoritmo Bfast e séries espaço-temporais, usando o software QGIS, com o propósito de detectar mudanças sazonais e tendências. Verificou-se que em muitos meses do ano, existia uma grande quantidade de nuvens nas imagens, tornando a sua utilização inviável. Os resultados apontam que as imagens de sensoriamento remoto sofrem grande influência de fatores climáticos, o que mostra a necessidade do monitoramento periódico da CHL-a. O sensoriamento remoto mostrou-se de fato uma importante ferramenta no monitoramento da CHL-a. Quanto a concentração de CHL-a, verificou-se que a maioria dos reservatórios tem níveis elevados de CHL-a, mas que em determinadas épocas do ano essa concentração é reduzida, indicando uma tendência sazonal. Entre os reservatórios estudados, o do Estreito foi o que se destacou por apresentar valores melhores de CHL-a durante o período estudado, já o reservatório Bocaina foi identificado como o reservatório com o pior estado trófico, ou seja, elevado nível de concentração de CHL-a.

**Palavras-chave:** clorofila-a, eutrofização, Sentinel-2, regressão linear.

## 8.1 Introdução

Os reservatórios de água são ambientes artificiais com características de transição entre rios e lagos, por serem criados a partir do represamento de águas de rios (CAIRO et al., 2020; FRASQUET et al., 2019). Assis et al. (2017) citam como principais finalidades de um reservatório: a regularização de vazões, abastecimento doméstico e animal, geração de energia e controle de cheias. No estudo de revisão bibliográfica, elaborado por Nyenje et al. (2010), foi mostrado o percentual de lagos e reservatórios eutrofizados no mundo, 54% na Ásia, 53% na Europa, 48% América do Norte, 41% na América do Sul, e 28% na África.

No semiárido do brasileiro, os reservatórios foram implantados como uma das alternativas utilizadas no combate à seca (MARENGO et al., 2018). Araújo e Bronstert et al. (2015) apresentam um importante reconhecimento da importância dos reservatórios no enfrentamento a seca no semiárido. Conforme descrito por Coelho (2017), existe no semiárido brasileiro uma grande rede de reservatórios superficiais, de pequeno (<10 hm<sup>3</sup>) e médio (10 – 50 hm<sup>3</sup>) porte. No estado do Piauí, existem 25 reservatórios de água, catalogados e monitorados pela Agência Nacional das Águas (ANA), esses reservatórios encontram-se localizados na região do semiárido piauiense, e têm como principal finalidade o abastecimento de água e regularização de vazões.

Para Datsenko et al. (1999), os reservatórios são ambientes limnológicos mais propícios a eutrofização, por serem construídos em áreas extensas, que armazenam águas por um longo período. Além disso, as características locais (temperatura, solo, evaporação, precipitação), contribuem para que esses reservatórios sofram com as altas taxas de evaporação e efeitos de déficit hídrico (BRAGA et al., 2015). O somatório desses fatores intensifica o processo de fotossíntese e a biodegradação desses sistemas aquáticos impactando na qualidade da água (DATSENKO et al., 1999).

No geral, os ecossistemas aquáticos mundiais têm sofrido danos devido à eutrofização antropogênica (MILLETE et al., 2019). Moal et al. (2019) destacam que a eutrofização é o mais comum e recorrente problema relacionado à qualidade da água, em que o seu desenvolvimento ocorre de forma natural ou derivado de ações antrópicas.

Quando desenvolvida de forma natural, a eutrofização é resultado das alterações climáticas que interferem nas características limnológicas dos ambientes aquáticos (LOPES et al., 2016), promovendo o crescimento e desenvolvimento de algas (CHENG et al., 2019). Já a eutrofização artificial ou antropogênica ocorre em decorrência do lançamento de efluentes domésticos e industriais oriundos de áreas urbanas (PAERL et al., 2011). A união da eutrofização natural com a eutrofização antropogênica afeta os ecossistemas aquáticos

originando impactos diretos na qualidade da água, que podem ser mensurados por meio da quantificação da concentração da clorofila-a (CHL-a) (BODDULA et al., 2016; HA et al., 2017; MILLETE et al., 2019; WANG; GONG; PU, 2018).

O monitoramento da qualidade da água, global ou local, é de grande necessidade (TOMING ET AL et al., 2016) para a manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas e gestão dos recursos hídricos (LOPES et al., 2016). A falta da qualidade da água ameaça os usos desses ecossistemas apresentando reflexos nas atividades desenvolvidas, principalmente, na pesca, irrigação, recreação, e até na saúde humana (BODDULA et al., 2016; CHEN et al., 2018; SHI et al., 2019). Tais efeitos, são particularmente mais graves quando ocorrem nos reservatórios que são utilizados como fonte de água potável (HE et al., 2016).

O gerenciamento e monitoramento da qualidade da água é realizado, principalmente, a partir da coleta pontual *in situ*, com posteriores análises laboratoriais e cálculo da concentração de nutrientes (LIMA et al., 2019). Essa metodologia é apontada por diversos autores como de elevado custo financeiro, dispendiosa de tempo, limitada a dados locais (ANSPER; ALIKAS, 2019; BODDULA et al., 2016; GONÇALVES; FERNANDES, 2017, SHI et al., 2019; TOMING et al., 2016; PAGE et al., 2017). Somada à essas dificuldades, a dimensão espacial dos corpos hídricos também é um empecilho para a monitoramento tradicional de forma constante (BODDULA et al., 2016). Frasquet et al. (2019) destacam o exemplo do programa *Water Framework Directive* (quadro diretivo da água) da comissão européia, como um programa de monitoramento que tem dificuldades em diagnosticar seu status de qualidade e a eficácia das medidas de restauração, por conta da utilização da metodologia tradicional.

Pelas dificuldades encontradas em utilizar o monitoramento tradicional para a realização do acompanhamento da qualidade da água, no que tange a concentração de CHL-a, o sensoriamento remoto vem sendo amplamente utilizado como alternativa para o monitoramento das águas (CHEN et al., 2019; FERREIRA et al., 2017; FRASQUET et al., 2019; GONÇALVES; FERNANDES, 2017; GRENDALTE et al., 2018; PAGE et al., 2017; TOMING et al., 2016).

O sensoriamento remoto apresenta vantagens quando comparado aos métodos tradicionais de monitoramento. A aquisição simultânea de dados, a alta cobertura temporal e espacial são características que qualificam o sensoriamento remoto para o monitoramento da CHL-a (SHI et al., 2019; MATTHEWS et al., 2012). Um dos mais promissores satélites é o Sentinel-2, lançado em 2015, que fornece adequadas resoluções espacial (10, 20, 60m), temporal (de até 5 dias), espectral (13 bandas) e radiométrica (12 bits). O seu sensor MSI tem



um conjunto de características que contribuem para o monitoramento de ambientes aquáticos (FERREIRA et al., 2017).

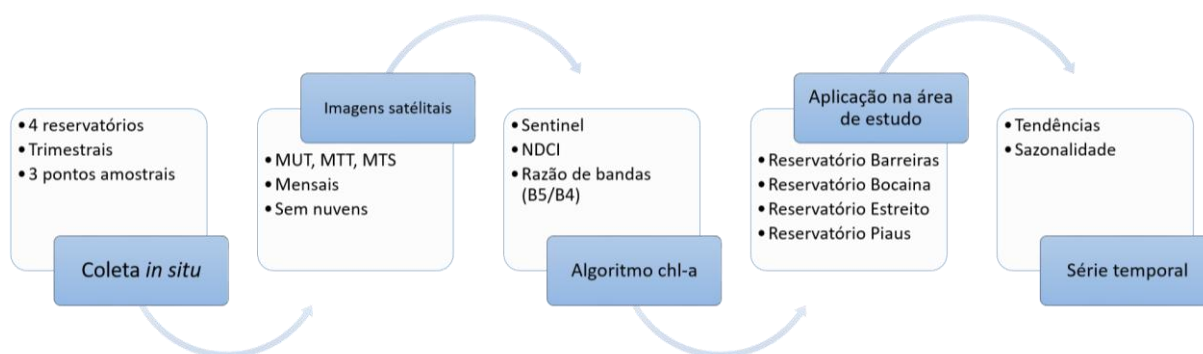
Frasquet et al. (2019) explicam que o sensoriamento remoto é uma alternativa complementar ao monitoramento tradicional, utilizado para ter uma visão sinóptica da qualidade da água nos ambientes aquáticos. Pelas características citadas anteriormente, nos últimos anos muitos algoritmos foram elaborados com o objetivo de mensurar a concentração de CHL-a em reservatórios a partir de informações do sensoriamento remoto. Entretanto, é importante ressaltar que não existe um algoritmo único que retrate todas as realidades (MOSES et al., 2009).

Nesse contexto, sabe-se que é cada vez mais importante o monitoramento da qualidade da água nos corpos hídricos, sobretudo em regiões que tem carência de informações, como é o caso do semiárido piauiense. Assim, com base na problemática exposta anteriormente, esse trabalho tem como finalidade principal elaborar de um algoritmo para obter a concentração de CHL-a, e a partir desse algoritmo, desenvolver uma série espaço-temporal, de 2017 a 2019, nos reservatórios Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus, que são utilizados para o abastecimento de água no semiárido piauiense. Wang et al. (2014) destacam a importância de compreender a variação espaço-temporal da CHL-a desses reservatórios, uma vez que permite identificar padrões e tendências da ocorrência desse fenômeno.

## 8.2 Material e métodos

A elaboração de um algoritmo para a estimativa da clorofila-a em reservatórios do semiárido piauiense ocorreu a partir dos procedimentos metodológicos conforme as etapas mostradas na Figura 43: (i) Foram realizadas coletas trimestrais nos reservatórios Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus, durante o ano de 2019. Essas coletas, foram realizadas superficialmente a 30 cm de profundidade. Ao todo, foram coletadas 78 amostras de água, 48 localizadas na zona litorânea dos reservatórios e 33 distribuídas ao longo do reservatório Estreito. (ii) Imagens de satélites foram adquiridas mensalmente, por meio do *United States Geological Survey* (USGS). (iii) Para a calibração e de validação dos algoritmos semiempíricos utilizando dados coletados *in situ* e a relação de faixas espectrais específica CHL-a, foram utilizados dados do Sentinel-2 MSI (*Multispectral Instrument*). (iv) Foi efetivada a aplicação do algoritmo semiempírico nas áreas de estudos e validação dos dados, comparando-se com os valores resultantes com os valores em *in situ*. (v) Procedeu-se a elaboração de série temporal mensal, de 2017 a 2019, utilizando a ferramenta *Bfast* para a análise de frequências, tendências e sazonalidade dos valores de CHL-a em cada reservatório.

Figura 43 – Etapas metodológicas para a construção da pesquisa



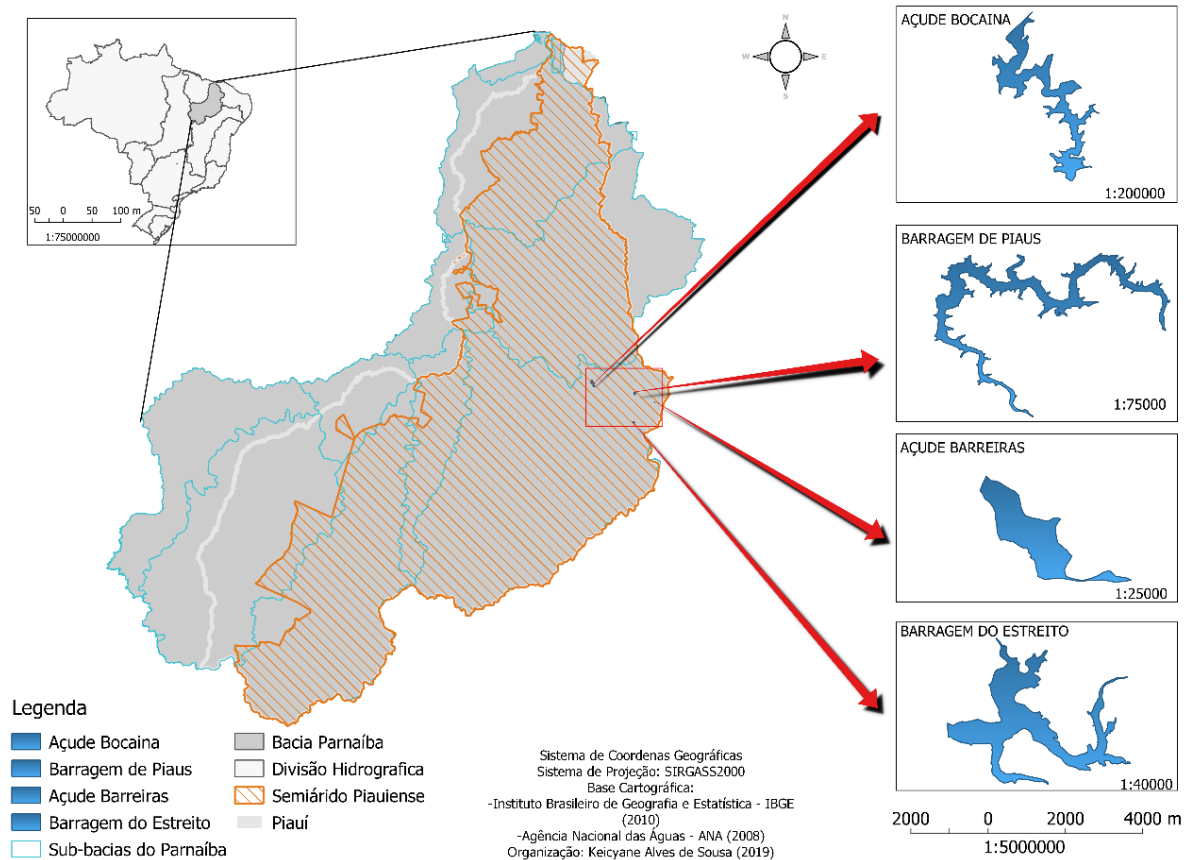
Fonte: Elaborado pelos autores

### 8.2.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido em quatro reservatórios localizados na bacia hidrográfica do Parnaíba, na região semiárida do estado do Piauí (nordeste do Brasil), conforme Figura 44. O clima é classificado como BSh (clima semiárido quente), com pluviosidade média de cerca de 600 mm/ano (PFALTZGRAFF, 2008). Sparacino et al. (manuscrito não publicado) constataram que cerca de 68% da precipitação anual da região, ocorre entre os meses de março e dezembro, assim na maior parte do ano há escassez de precipitação.

O reservatório Barreiras está localizado na cidade de Fronteiras ( $7^{\circ}5'42.86''S$ ,  $40^{\circ}35'11.09''O$ ), possui um volume máximo de  $106,51 \text{ hm}^3$ . O outro reservatório, Bocaina, localizado na cidade de mesmo nome ( $6^{\circ}54'42.20''S$ ,  $41^{\circ}18'31.47''O$ ), tem  $106 \text{ hm}^3$  de volume. O reservatório Estreito, de acordo com o SAR (s.d.), fica inserido na cidade de Padre Marcos, contudo a sua localização geográfica ( $7^{\circ}20'11.22''S$ ,  $40^{\circ}50'21.79''O$ ), está dentro dos limites territoriais da cidade de Francisco Macedo, e sua capacidade de armazenamento é de  $23,89 \text{ hm}^3$ , menor entre os reservatórios estudados. Já o reservatório Piaus tem capacidade de  $104,51 \text{ hm}^3$  fica situado na cidade de São Julião ( $6^{\circ}59'20.49''S$ ,  $40^{\circ}50'9.67''O$ ). Todos os reservatórios estão distantes aproximadamente 350 km da cidade de Teresina, capital do estado e local onde o órgão fiscalizador está inserido.

Figura 44 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores

Segundo dados da Agência Nacional das Águas (ANA), todos os reservatórios considerados na área de estudo têm usos múltiplos como pesca, agricultura irrigada, recreação, mas o mais importante é o abastecimento de água (demanda de água para a população), sendo todos fiscalizados pela Secretária de Meio Ambiente do Estado do Piauí (SEMAR).

### 8.2.2 Concentração de clorofila-a *in situ*

A coleta *in situ* foi realizada superficialmente (30 cm de profundidade), seguindo os padrões descritos por Brandão et al. (2011). Ao todo foram coletados 78 pontos nos quatro reservatórios estudados (Barreiras, Bocaina, Estreito e Piaus). Como pode ser observado na Tabela 14, os pontos foram coletados trimestralmente, sendo no mínimo três pontos por reservatório.

Tabela 14 – Histórico das coletas: data, reservatório e quantidade de pontos

Coleta	Data da Coleta	Reservatório	Quantidade de Pontos
1	30/03/2019	Barreiras	3
		Piaus	3
	31/03/2019	Estreito	3
		Bocaina	3
2	29/06/2019	Estreito	33
	30/06/2019	Bocaina	3
		Piaus	3
		Barreiras	3
3	29/09/2019	Estreito	3
		Piaus	3
		Barreiras	3
	30/09/2019	Bocaina	3
4	16/12/2019	Estreito	3
		Piaus	3
		Barreiras	3
	17/12/2019	Bocaina	3
<b>Total</b>			<b>78</b>

Fonte: Elaborado pelos autores

No mês de junho, foram coletados 33 pontos no reservatório do Estreito pela disponibilidade de um morador local em ceder um barco para a coleta, porém, nos demais reservatórios, e demais datas, isso não foi possível, restringindo as amostragens a zona litorânea dos reservatórios. Esteves (2011) explica que a zona litorânea é uma região de transição dentro do ambiente aquático, ela fica localizada entre os ecossistemas terrestres e lacustres.

As amostras foram mantidas refrigeradas durante todo o processo antes da filtração. Membranas filtrantes de 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de porosidade foram utilizadas para a filtração a vácuo (pressão de 0,25 atm) das amostras de água. O material filtrado foi identificado e armazenado em ambiente refrigerado até o momento da extração da CHL-a.

O método utilizado para a extração da CHL-a foi o espectrofotométrico a quente, sem maceração, com metanol 100%, proposto por Jones (1979). Em seguida, as amostras foram centrifugadas por cinco minutos, em 2500 rpm. A leitura da absorvência do extrato, foi realizada nos comprimentos de onda de 665 nm e 750nm. Por fim, foi realizado o cálculo da concentração da CHL-a a partir da equação 1.

Equação 1 – Fórmula para o cálculo da concentração de CHL-a.

$$Chla (\mu g/L) = \frac{[(Abs_{665} - Abs_{750}) \times 13 \times Vol. extrato (ml)]}{Volume filtrado (L)}$$

Em que o valor de Abs 665 e Abs 750 correspondem, respectivamente, as absorvâncias dos extratos nos comprimentos de onda de 665 nm e 750 nm. A concentração final da CHL-a, é o resultado da diferença das absorvâncias multiplicado pelo coeficiente de extinção da clorofila-a em metanol e pelo volume do extrato (7 ml), dividido pelo o volume da amostra filtrada (0,1 L).

### 8.2.3 *Aquisição e processo das imagens de satélite*

As imagens do satélite Sentinel-2 sensor MSI foram coletadas no portal eletrônico do USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>), abrangendo intervalo de tempo de 2017 a 2019, nos quadrantes MTS, MTT e MUT. A escolha das imagens foi feita com a menor quantidade de nuvem possível, pois uma grande quantidade de nuvens pode ocasionar empecilhos no monitoramento da concentração de CHL-a (BODDULA et al., 2016). As imagens foram adquiridas em nível de processamento 1C, no qual os valores dos pixels representam a reflectância no topo da atmosfera (TOA).

Para minimizar a influência que as partículas atmosféricas causam na radiação eletromagnética transmitida pelos alvos (PATRA et al., 2016), foi realizado o processo de correção atmosférica, utilizando o software *Sentinel Snap Desktop*. Esse software é amplamente utilizado (ANSFER; ALIKAS, 2019; FERREIRA et al., 2017; FRASQUET et al., 2019) por ser próprio para as imagens Sentinel, permitindo a conversão da reflectância TOA para BOA (reflectância de superfície terrestre), nível 2A.

Imagens adquiridas do sensor MSI, foram utilizadas para a elaboração do algoritmo de CHL-a. Ao todo, foram usadas um conjunto de dezesseis imagens, com datas iguais ou próximas as datas da amostragem local.

### 8.2.4 *Modelos de regressão linear para estimativa de CHL-a*

Os espectros de absorção de clorofila-a normalmente apresentam uma atenuação de menor para maiores comprimentos de onda com absorção crescente na região do infravermelho próximo (PRASAD et al., 2019). Page et al. (2017) explicam que o pico de reflectância da CHL-a é de 708 nm e tendo ainda forte absorção na faixa do vermelho (665 nm). Assim, neste

estudo, os valores de refletância das imagens Sentinel-2 MSI, foram extraídos em cada ponto de coleta, nas bandas espectrais B4 e B5 por seus respectivos comprimentos de onda na faixa do vermelho (665 nm) e infravermelho próximo (705 nm).

Estudos anteriores têm sugerido diferentes combinações de bandas (por exemplo, proporções, multiplicação e média) (ANSPER; ALIKAS, 2019; LOPES et al., 2016; PAGE et al., 2017; PATRA et al., 2016). Nesse estudo, foi utilizada a razão entre as bandas do infravermelho próximo (B5) e vermelho (B4) (DALL'OLMO; GITELSON, 2005), e o índice de clorofila com diferença normatizada (NDCI) elaborado por Mishra e Mishra (2012) para a estimativa de CHL-a em águas turbidas. A formulação dessas relações é descrita na Tabela 15.

Tabela 15 – Relações entre bandas espectrais utilizadas no estudo

Modelos	Relação de Bandas	Autores
X1	$\frac{(R709 - R665)}{(R709 + R665)}$	Mishra e Mishra (2012)
X2	$\frac{R709}{R665}$	Dall'Olmo e Gitelson (2005)

Fonte: Elaborado pelos autores

Foi realizada a correlação entre os valores de cada relação de bandas e os valores de concentração de CHL-a medidos *in situ*. A partir dessas relações, foram desenvolvidos modelos de previsão utilizando a regressão linear simples, no qual, as relações X1 e X2 são usadas como variável explicativa para a concentração de CHL-a. Ao todo foram elaboradas quatro equações, a partir de dois conjuntos de dados de todos os reservatórios (n = 31 e n = 21) e das relações X1 e X2.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para ilustrar a relação entre os valores da concentração de CHL-a *in situ* e os valores resultantes das equações elaborada, assim como no trabalho desenvolvido por Prasad et al. (2019). Também foram utilizados outros parâmetros estatísticos, o erro absoluto (MAE), erro médio quadrático (RMSE), percentual do erro médio (MPE), percentual absoluto do erro médio (MAPE), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), comuns em diversos trabalhos (FERREIRA et al., 2017; PATRA et al., 2016; PRASAD et al., 2019). A validação dos resultados das equações foi realizada com todos os 78 pontos coletados.

### 8.2.5 Séries temporais

Para a construção das séries temporais de CHL-a, nos reservatórios estudados foram usados dados mensais da concentração de CHL-a, resultantes de modelo de regressão linear simples. Para a construção da série temporal, 76 imagens foram usadas, entre 2017 e 2019, resultando em uma série temporal com 90 imagens.

No software R, foram usados os pacotes Bfast (*Breaks for Additive Season and Trends*) e tseries, para a análise temporal da CHL-a. Carroll et al. (2019) mostram que o Bfast é uma metodologia muito utilizada para a detecção de tendências e sazonalidades em séries temporais. Partindo dessa percepção, Geng et al. (2019) consideram o Bfast um algoritmo eficaz.

O Bfast permite decompor a série temporal de acordo com tendências, sazonalidades e componentes (VERBESSELT et al., 2010), permitindo detectar mudanças no padrão de CHL-a. Ele é composto por um componente de tendência ( $T_t$ ), periódico ( $S_t$ ) e resíduos ( $e_t$ ), conforme mostrado na Equação 2.

Equação 2 – Fórmula do BFAST.

$$Y_t = T_t + S_t + e_t$$

Para a análise espaço-temporal da CHL-a, foi construída séries temporais no software QGIS, no qual foi possível visualizar a distribuição espaço-temporal da CHL-a nos reservatórios a partir de todo o conjunto de imagens coletadas. Um gradiente de cores foi usado para identificar os intervalos quantitativos da CHL-a. A divisão dos intervalos, considerou o valor máximo admissível de 30µg/L CHL-a para águas de classe II, conforme a resolução Conama n° 357/2005.

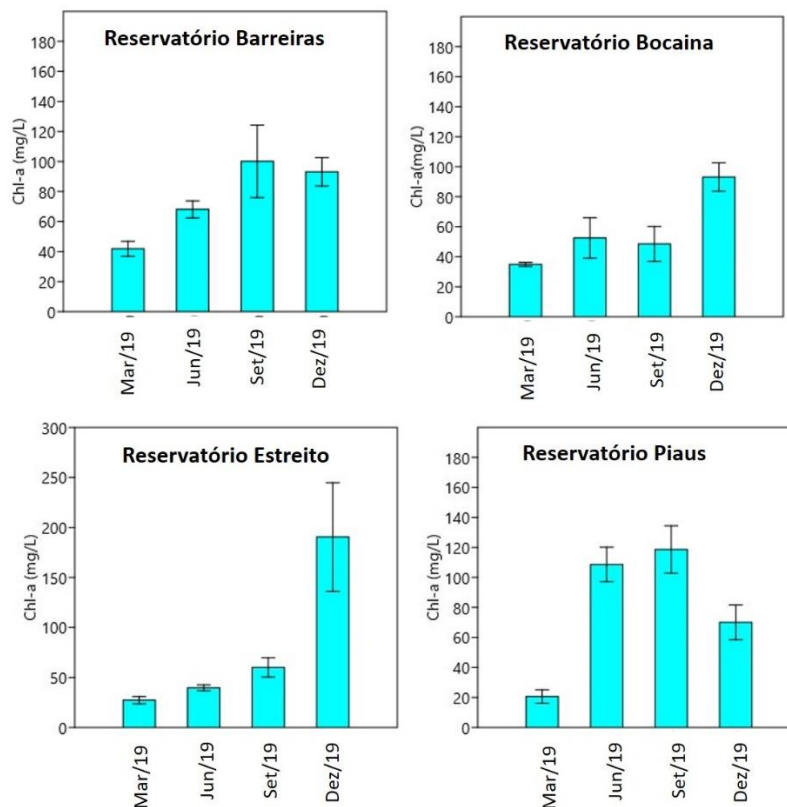
## 8.3 Resultados e discussão

Embora a análise da CHL-a *in situ* não seja o objetivo desse estudo, ela é necessária para o entendimento da variação da concentração de CHL-a ao longo do tempo. Na Figura 45, são apresentados gráficos que permitem ter um panorama da concentração de CHL-a nos reservatórios estudados. Conforme discutido por Esteves (2011) os resultados aqui apresentados sofrem influência da região litorânea dos reservatórios, podendo superestimar a real concentração de CHL-a.

No geral, os reservatórios mantiveram concentrações de CHL-a, acima do limite de até 30 mg/L, estipulado pelo Conama, para águas doces de classe II. O reservatório Piau foi o que apresentou os maiores níveis de CHL-a. Em todos os reservatórios no mês de março ocorreram

os menores resultados de CHL-a, e valores médios mais altos foram observados nas coletas realizadas no mês de dezembro.

Figura 45 – Gráfico com as concentrações médias de CHL-a medidas in situ



No reservatório Barreiras, observa-se uma tendência no aumento dos níveis de CHL-a ao longo dos meses de março a setembro, com pequena diminuição no mês de dezembro. No mês de março, a concentração da CHL-a ficou em média de 41 mg/L. Já o mês de setembro, foi o que apresentou as maiores concentrações, cerca de 100 mg/L, entretanto, com uma grande variação nessa concentração. O reservatório Bocaina, no mês de dezembro apresentou um pico nos valores de CHL-a, com resultados próximos a 100 mg/L. Nos demais meses amostrados, a CHL-a ficou com valores entre 30 a 60 mg/L. O reservatório Estreito mostrou uma tendência do aumento da quantidade de CHL-a, com pico máximo no mês de dezembro, tornando notável a grande diferença quantitativa entre os meses de março e dezembro. A variação da CHL-a em dezembro foi significativa, com valor médio próximo a 200 mg/L, como é mostrado no gráfico. Já o reservatório Piaus, assim como os demais reservatórios, expressou os menores valores médio de CHL-a no mês de março.

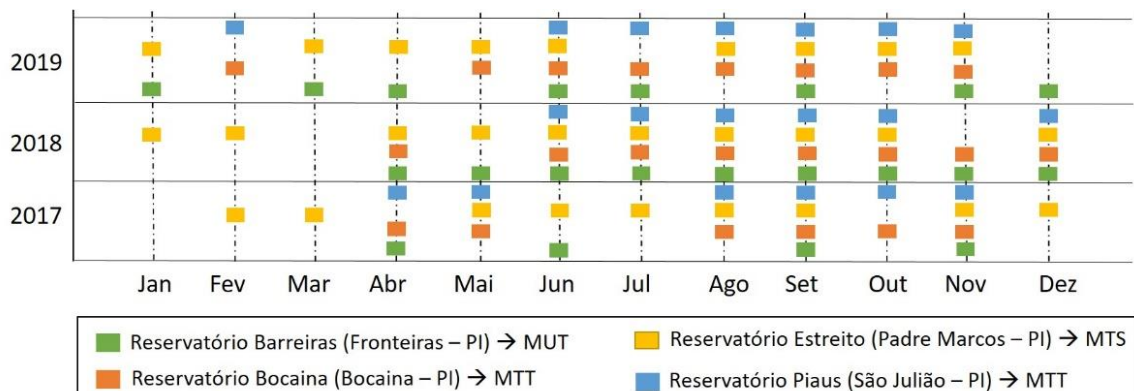
Toming et al. (2016) constataram que imagens do sensor MSI são ideais para o monitoramento da CHL-a, tendo em vista sua resolução temporal de cinco dias, entretanto, no



presente estudo foi observado que apesar da pequena resolução temporal, as condições climáticas locais afetam a qualidade das imagens passíveis de utilização. Embora, o uso da correção atmosférica Sen2cor seja um procedimento importante fator para utilização dessas imagens, Toming et al. (2016) relatam que esse algoritmo não foi desenvolvido para correções atmosféricas em ambientes aquáticos, porém, ele é uma importante opção no processo correção atmosférica de imagens Sentinel-2.

Com base na Figura 46, na qual é mostrada a frequência temporal das imagens utilizadas, é constatado na referida imagem que em alguns períodos do ano (janeiro a março), as imagens do Sentinel-2 não estavam aptas para a utilização nesse estudo devido à grande quantidade de nuvens. Anspér e Aliska (2019) citam que as mudanças na massa de ar e das condições da luz solar, criam barreiras na utilização do sensoriamento remoto passivo afetando a qualidade e quantidade de dados úteis.

Figura 46 – Distribuição da série espaço-temporal da CHL-a



A partir das imagens coletadas, bandas espectrais foram selecionadas para a confecção dos modelos de concentração de CHL-a. Na Tabela 16, são mostrados os quatros modelos de regressão linear simples, elaborados a partir da relação de bandas descritas na Tabela 15. Os modelos diferem entre si, pelas relações de bandas usadas e pela quantidade de dados.

O modelo R1, foi elaborado inicialmente, com 31 dados, apresentando erro padrão de 9,11 e coeficiente de determinação de 0,83. O modelo R2, utilizou os mesmos dados de R1, porém aplicando a relação de bandas X2, entretanto, o seu erro padrão foi maior que do modelo anterior e o seu coeficiente de determinação menor. Nos modelos R3 e R4 valores que não apresentavam correlação significativa no conjunto dos 31 dados, foram retirados para melhor ajuste do modelo, resultando em apenas 21 pontos amostrais. Com isso, ambos modelos X1 e X2 foram testados para esse novo conjunto de dados. Esses novos modelos, chamados de R3 e

R4, obtiveram melhor desempenho que os modelos R1 e R2, com erros padrões inferiores e com coeficientes de determinação de 0,95.

A seleção do melhor modelo para a espacialização da CHL-a foi baseado em três parâmetros estatísticos principais, o mínimo de RMSE, MAE e mais alto R2 foram avaliados para comparação entre as equações. Assim, as equações R3 e R4, se mostraram melhores para descrever o fenômeno estudado. Por apresentar RMSE de 5,17, a equação R4 foi considerada a melhor equação para a espacialização da CHL-a.

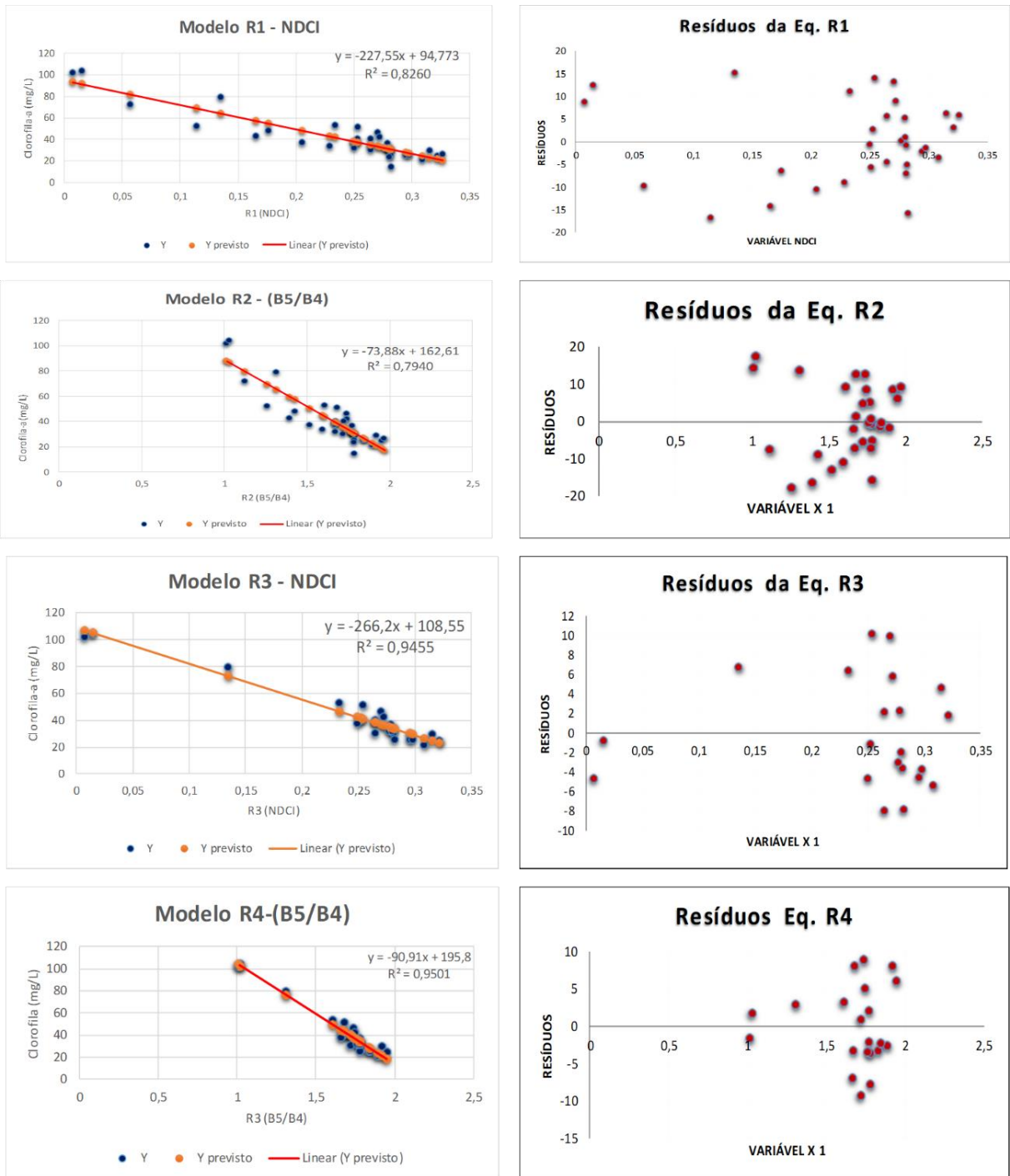
Tabela 16 – Análise estatística do conjunto de dados.

Modelos	Relação de Bandas	Quant. Dados (n)	Erro Padrão	Erro médio absoluto (MAE)	RMSE	Porcentagem erro médio (MPE)	MAPE	R de Person	R <sup>2</sup>
R1	$\frac{(R709 - R665)}{(R709 + R665)}$	31	9,11	7,33	8,81	25%	20%	0,91	0,83
R2	$\frac{R709}{R665}$	31	9,91	7,95	9,59	39%	21%	0,89	0,79
R3	$\frac{(R709 - R665)}{(R709 + R665)}$	21	5,68	4,71	5,40	-15%	13%	0,97	0,95
R4	$\frac{R709}{R665}$	21	5,44	4,44	5,17	-3%	13%	0,97	0,95

Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 47 são mostradas as retas de cada regressão linear. Os resíduos de cada equação foram comparados com os dados coletados *in situ*. Os coeficientes de regressão linear e o ajuste da reta, indicaram que as regressões aqui elaboradas, são perfeitas, porém negativas. Valores menores resultantes das relações X1 e X2 estão associados, as maiores concentrações de CHL-a coletadas *in situ*.

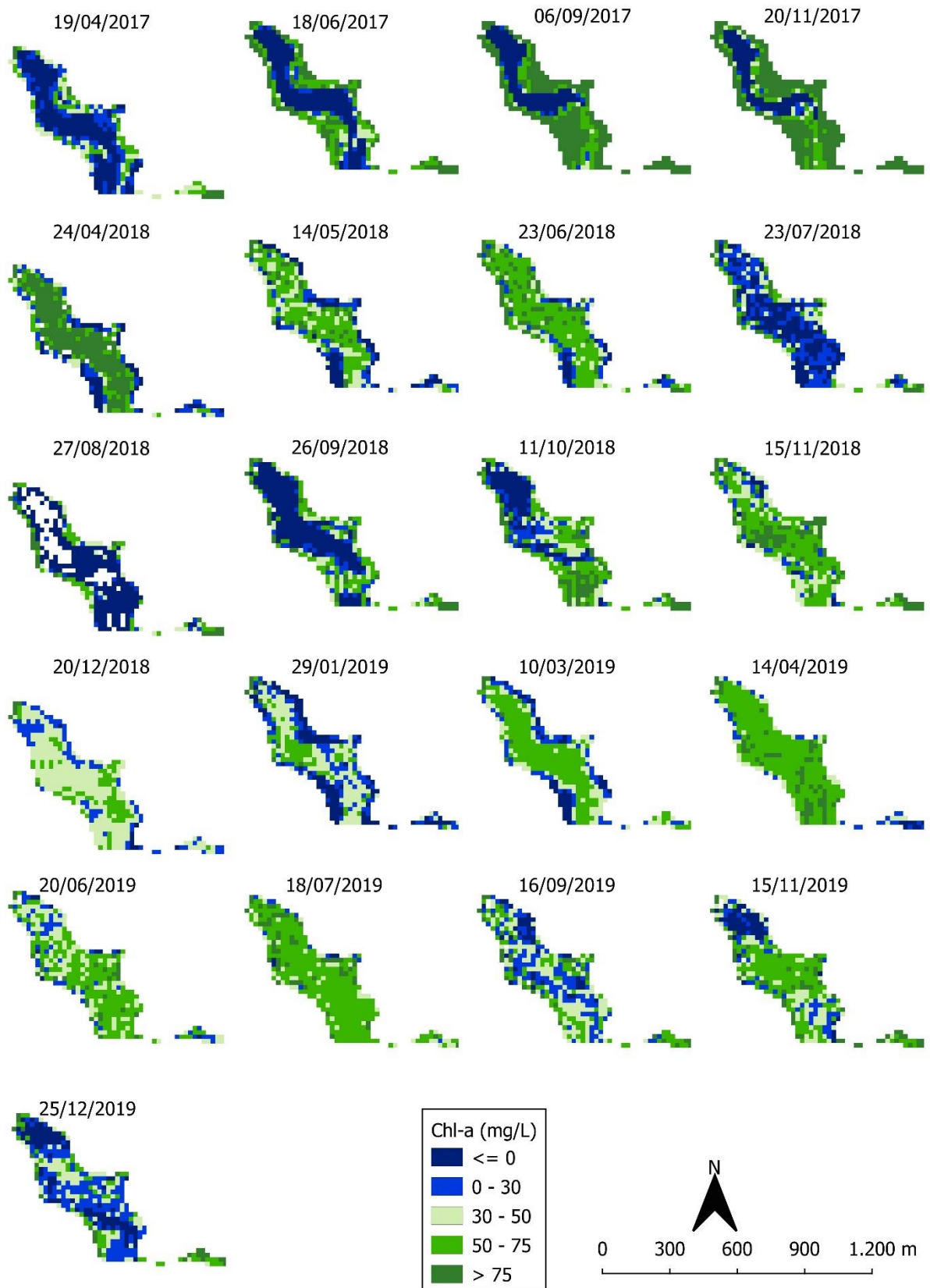
Figura 47 – Modelos de regressão linear



Abaixo são mostradas figuras com as concentrações de CHL-a em cada reservatório estudado. Os níveis de CHL-a foram classificados de menores que 0 mg/L, indicam ausência de CHL-a, 0-30 mg/L evidenciando que nesses trechos a quantidade de CHL-a estar em conformidade com a resolução Conama N° 357/2005, e as demais classes com valores são acima do exigido para águas de classe II, 50-75 mg/L e maiores que 75 mg/L.

Na Figura 48, são especializados os resultados da CHL-a no reservatório Barreiras. É possível afirmar com base nessa imagem, que durante o ano de 2017, apesar da pequena quantidade de imagens disponíveis, o nível de CHL-a era menor do que aos demais anos subsequentes. Ao observar ao longo dos anos estudados, foi verificado que em abril de 2017 o reservatório estava em conformidade com a resolução Conama, mas que nesse mesmo período de 2018 a quantidade de CHL-a havia se elevado, passando a se enquadrar na quinta classe ( $> 75$  mg/L), e no mês de abril de 2019, a quantidade de CHL-a sofreu redução passando a se enquadrar na quarta classe com valores entre 50 a 75 mg/L. Além disso, há uma sazonalidade, na variação da CHL-a, em determinados períodos do ano, existe um aumento na qualidade da água e outros períodos uma diminuição dessa qualidade, esse fenômeno ocorreu de maneira cíclica no reservatório Barreiras.

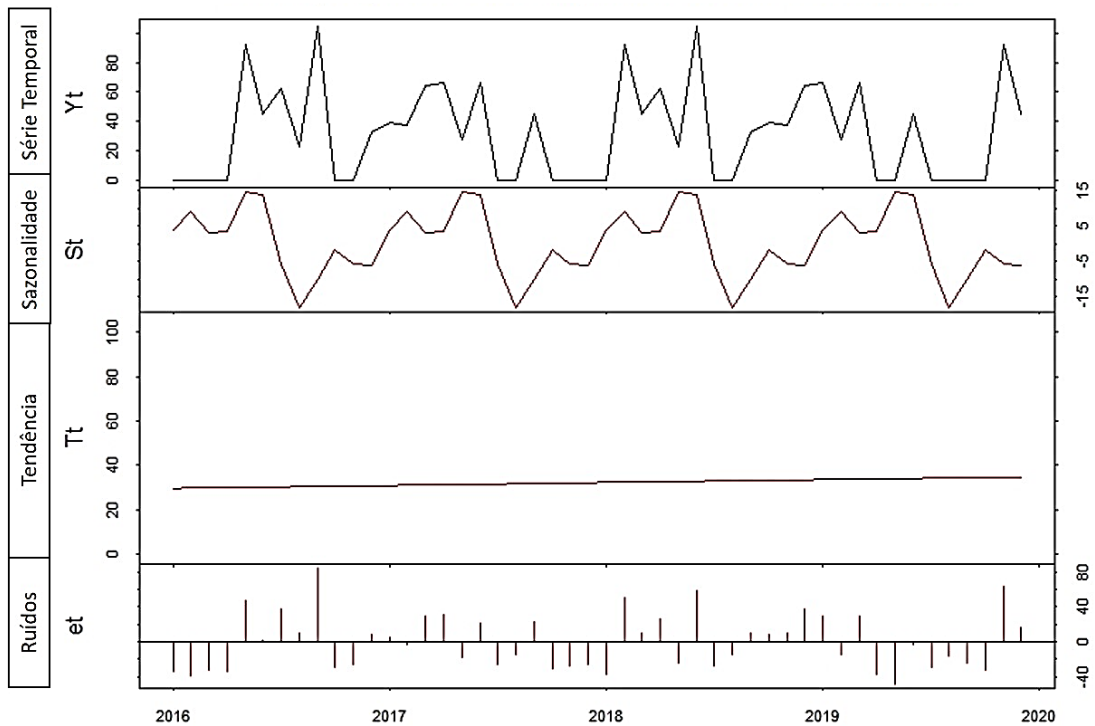
Figura 48 – Série espaço-temporal da CHL-a no reservatório Barreiras



Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 49, é apresentada a série temporal do reservatório Barreiras (yt). Nele é perceptível que existem meses do ano que têm mais concentração de CHL-a do que outros meses, mostrando um padrão sazonal (st), de diferentes magnitudes, abrupto e cíclico. Wu et al. (2020) destacam no seu trabalho essa característica do Bfast em detectar distúrbios efêmeros. Além disso, é possível afirmar que existe uma leve tendência (tt) no aumento dos valores de CHL-a. Os ruídos representados pelas barras na Figura 49, foram mais significativos nos picos de CHL-a, tendendo a se agrupar em determinadas épocas do ano, quando alterados por fatores climáticos (CARROLL et al., 2019).

Figura 49 – Série temporal do reservatório Barreiras: sazonalidade, tendência e ruídos

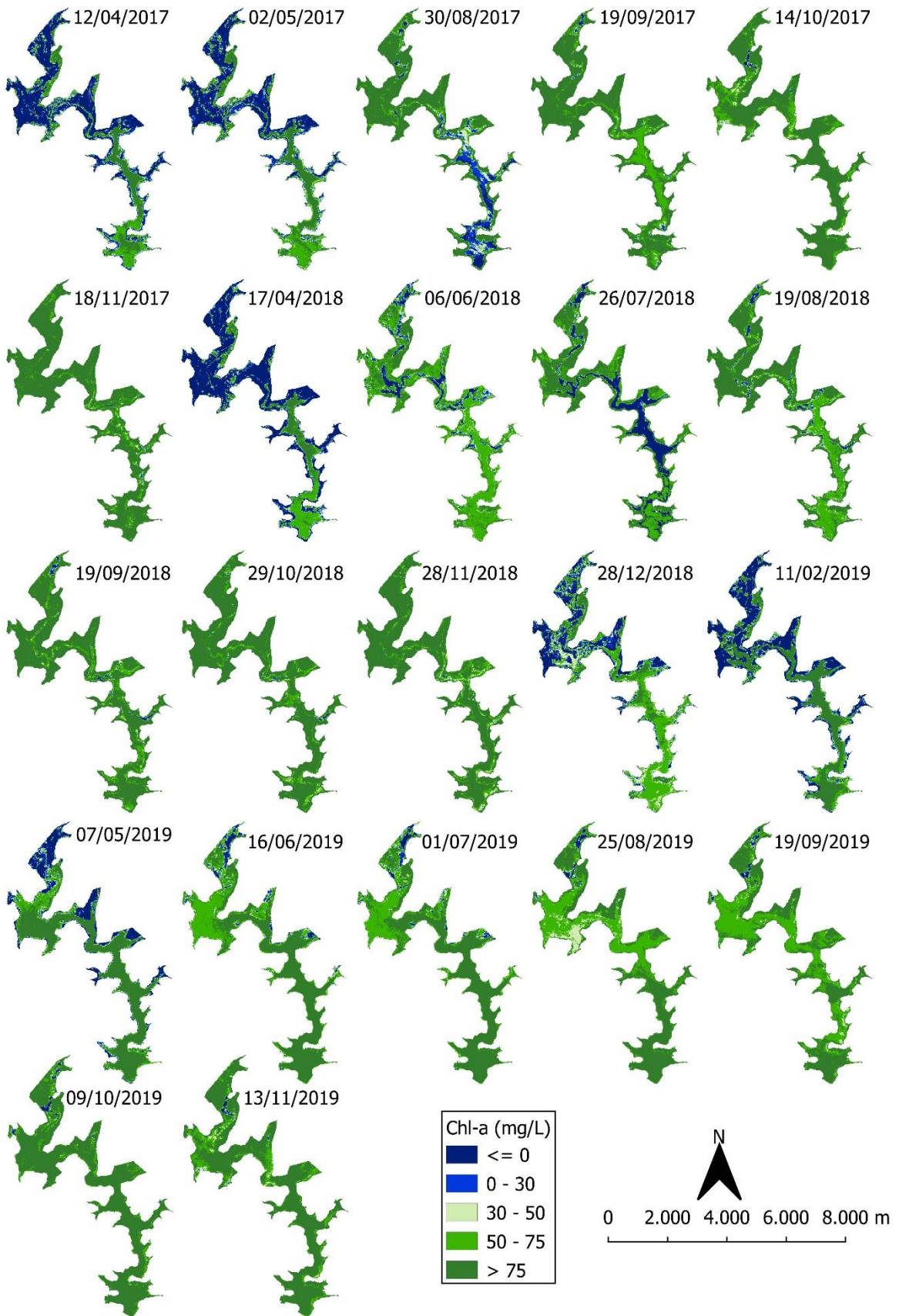


Fonte: Elaborado pelos autores

Encontra-se apresentada na Figura 50 a situação do reservatório Bocaina. Observa-se que no período de maio a agosto de 2017, a qualidade da água estava em melhores condições, entretanto esse cenário começa a se modificar mais rapidamente a partir de junho de 2018, com o aumento das concentrações de CHL-a, principalmente em áreas mais próximas da parede do reservatório. Millete et al. (2019) mencionam, o aumento sistemático e a longo prazo dos valores de CHL-a, como indicativos de eutrofização (ANSPER e ALISKA, 2019). Avaliando a Figura 50 torna possível pressupor que o reservatório de Bocaina estava eutrofizado durante o ano de 2019.



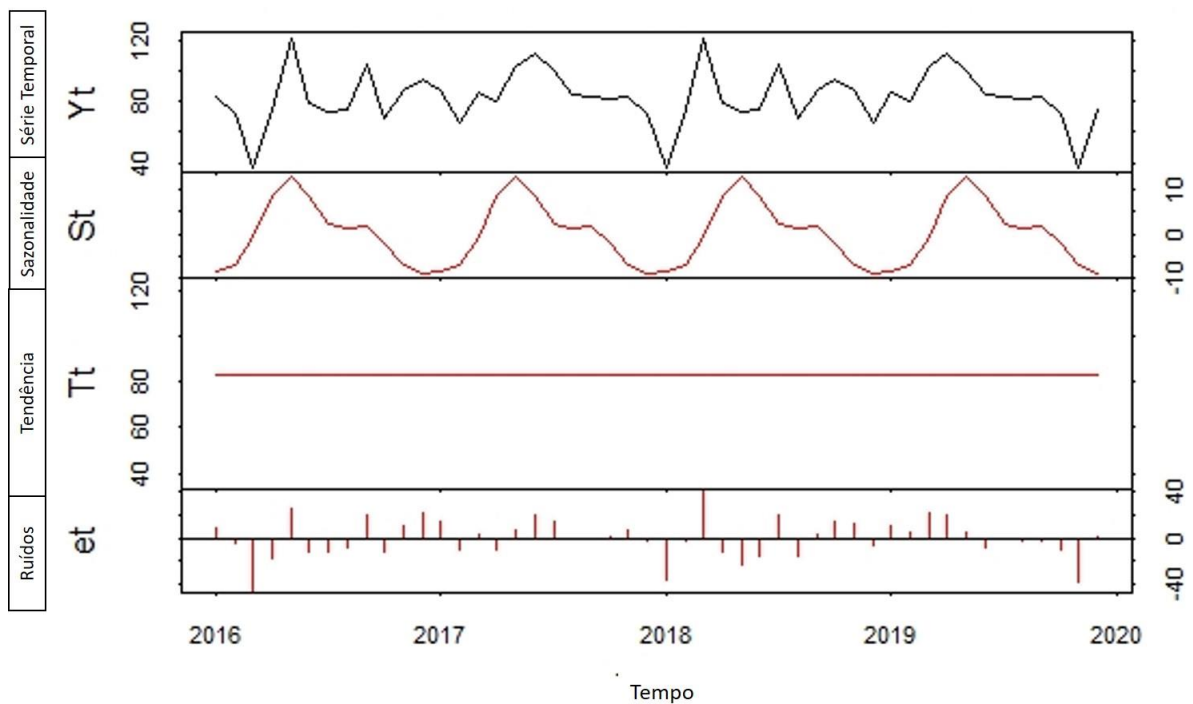
Figura 50 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no reservatório Bocaina



Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição temporal da CHL-a no reservatório Bocaina mostrada na Figura 51, indicou que existem picos de baixa e de altas concentrações de CHL-a. Quanto a sazonalidade, ela foi mais bem distribuída ao longo do tempo não apresentando interrupções bruscas ou distúrbios em curto prazo como foi o caso do reservatório Barreiras. Entretanto, no último trimestre do ano, percebe-se a diminuição nos valores de CHL-a, que volta a ser elevado o primeiro trimestre do ano seguinte. Wu et al. (2020) ressaltam que mudanças no padrão de sazonalidade não indicam que as mesmas tendências de mudanças ocorrerão nos anos subjacentes. Entretanto, o reservatório Bocaina tem uma tendência linear com valores médios de CHL-a em torno de 80 mg/L, o que aponta uma similaridade nos padrões desse reservatório, que ocorrem de dois em dois anos. Os ruídos negativos, que de modo geral, ocorrem com mais frequência, estão tendendo a minimizar os valores de CHL-a, chegando a níveis próximos a zero.

Figura 51 – Distribuição temporal da CHL-a no reservatório Bocaina



Fonte: Elaborado pelos autores

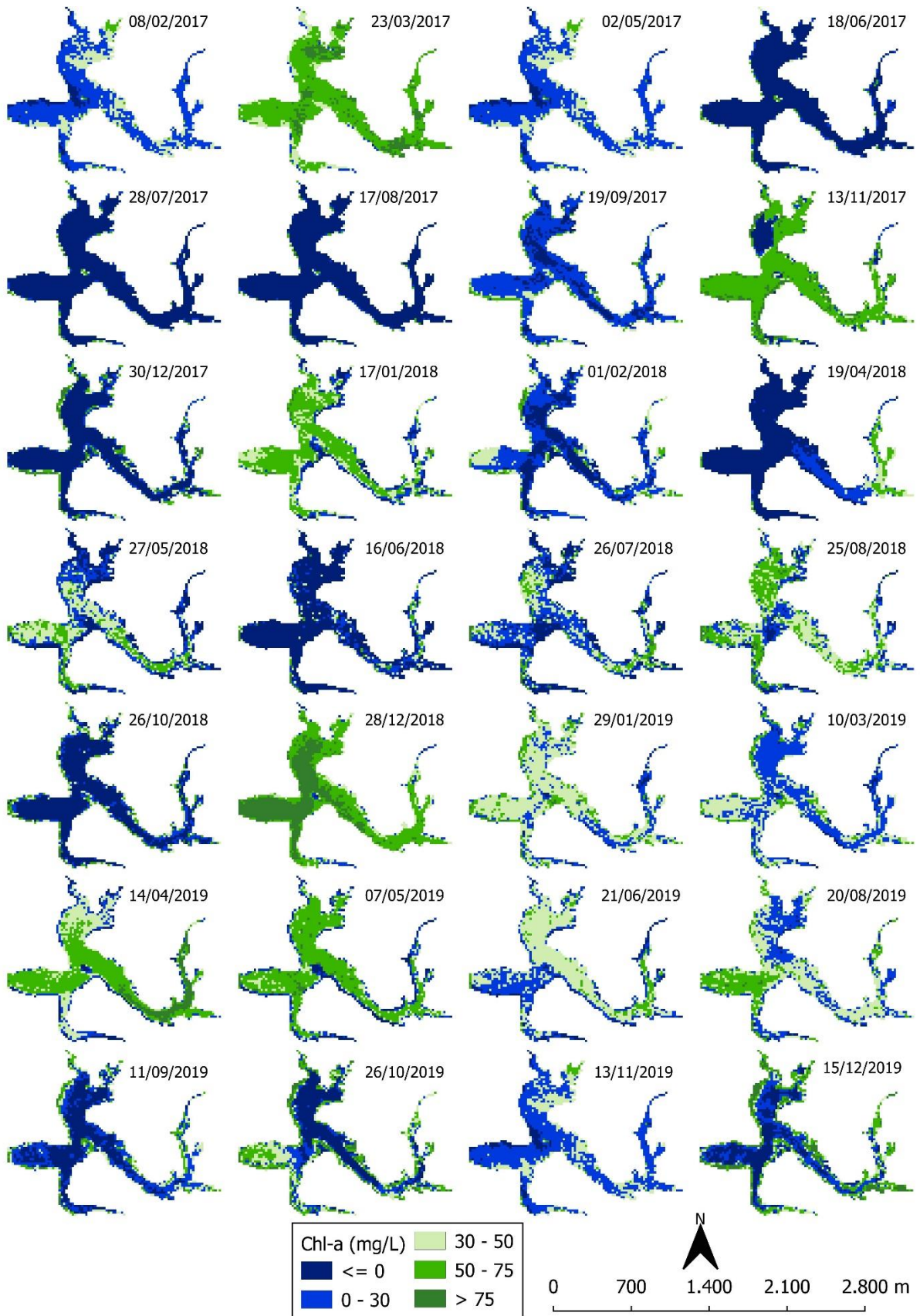
Na Figura 52, as imagens mostram a distribuição espaço-temporal da CHL-a no reservatório do Estreito. A partir dela, é comprovado que dos nove meses analisados durante o ano de 2017, apenas dois estavam com concentrações de CHL-a entre 50 e 75 mg/L,



mostrando que nesse ano a qualidade da água desse reservatório estava apta para o uso da população.

Em 2018, esse panorama foi brevemente modificado, com a redução dos níveis de CHL-a em alguns meses e o aumento em outros meses. Esse processo de mudança entre um mês e outro ocorreu de forma rápida como pode ser observado nas datas de 30/12/2017, 17/01/2018 e 01/02/2018. No geral, as águas do reservatório do Estreito estão disponíveis para uso por um maior prazo de tempo.

Figura 52 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no Reservatório do Estreito



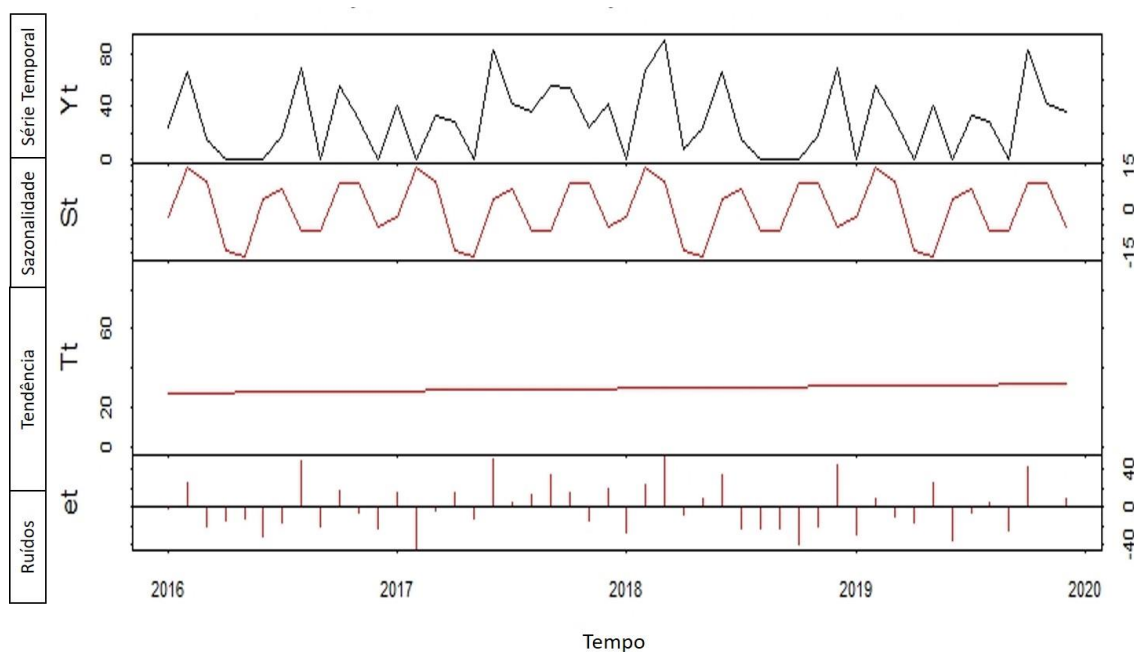
Fonte: Elaborado pelos autores

A série temporal da Figura 53 mostra que o maior valor de CHL-a no reservatório Estreito foi superior a 80 mg/L, e que o menor foi de 0 mg/L, revelando que em algumas épocas do ano o reservatório pode ter suas águas comprometidas e que em outros momentos essas águas sofrem um processo de renovação e com isso têm uma melhoria na sua qualidade.

Analisando a sazonalidade dos processos, houve a prevalência de boas condições da água no segundo trimestres de cada ano. Picos de concentração de CHL-a são identificados nos primeiros meses dos anos estudados.

Existe uma inclinação na reta da tendência, expondo o crescimento de aproximadamente de 10 mg/L de CHL-a, desde 2017 a 2019. É evidente que essa reta de crescimento ao longo do tempo sofre variações, positivas e negativas, essas variações são representadas pelos ruídos, que no caso desse reservatório tem maior quantidade de valores negativos, ocasionando uma diminuição relativa da CHL-a nesses pontos.

Figura 53 – Distribuição temporal da CHL-a da barragem do Estreito

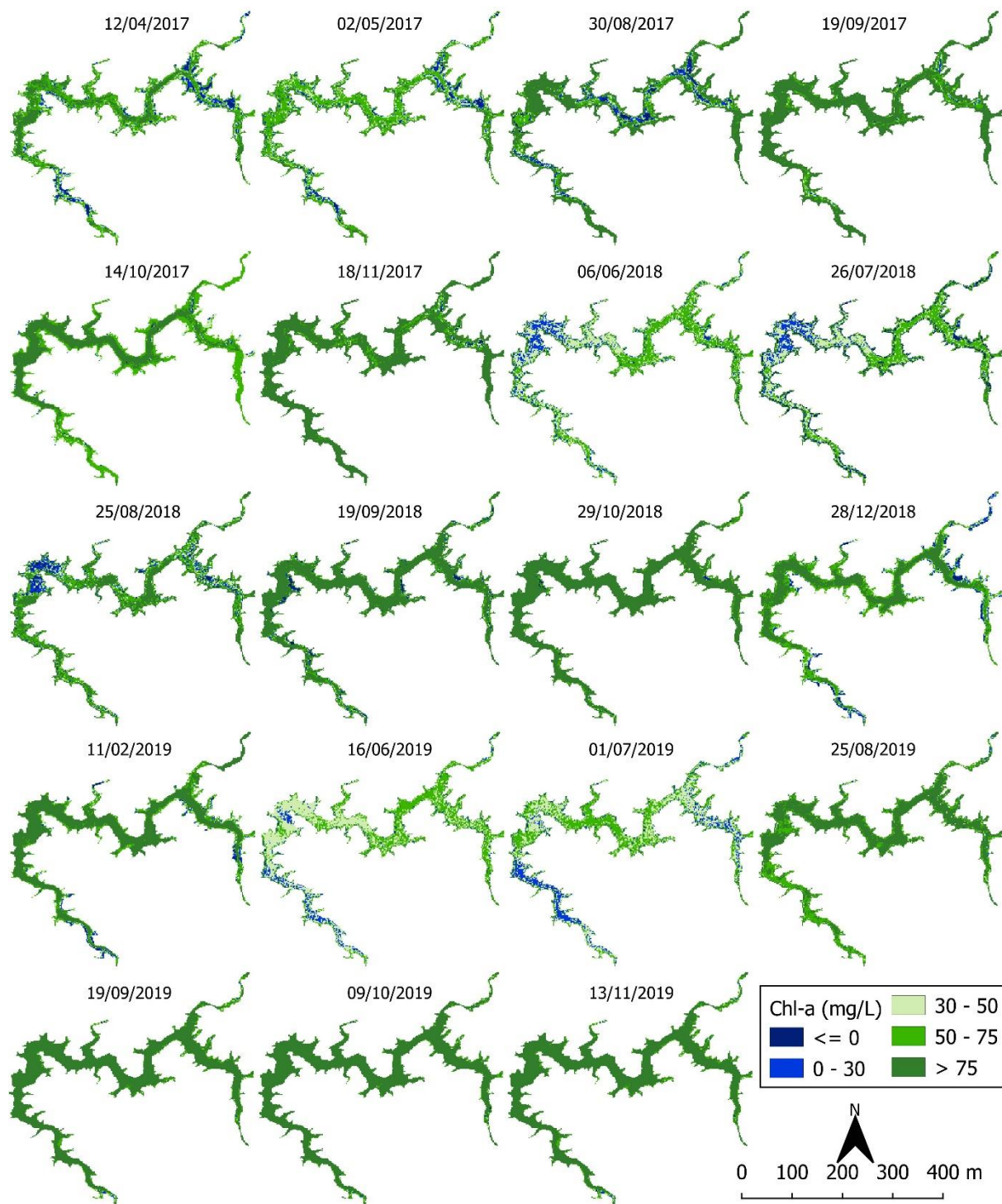


Fonte: Elaborado pelos autores

A condição da qualidade da água no reservatório de Piau é mostrada na Figura 54. De modo global, o reservatório tem altas concentrações de CHL-a. São raros os meses no quais ocorrem diminuição na quantidade de CHL-a, e conseqüentemente, melhoria na qualidade da água. O primeiro semestre de 2017, por exemplo, tem níveis de CHL-a que variam de 50 a 75 mg/L, enquanto no último semestre de 2019, tem valores superiores a 75 mg/L. Nos meses de

junho e julho de 2018 e 2019, exibem relativa melhoria na qualidade da água. É possível inferir com isso, que em junho e julho de 2017, a qualidade da água poderia apresentar o mesmo comportamento, se existissem imagens em condições adequadas para a realização dessa análise.

Figura 54 – Distribuição espaço-temporal da CHL-a no reservatório Piau

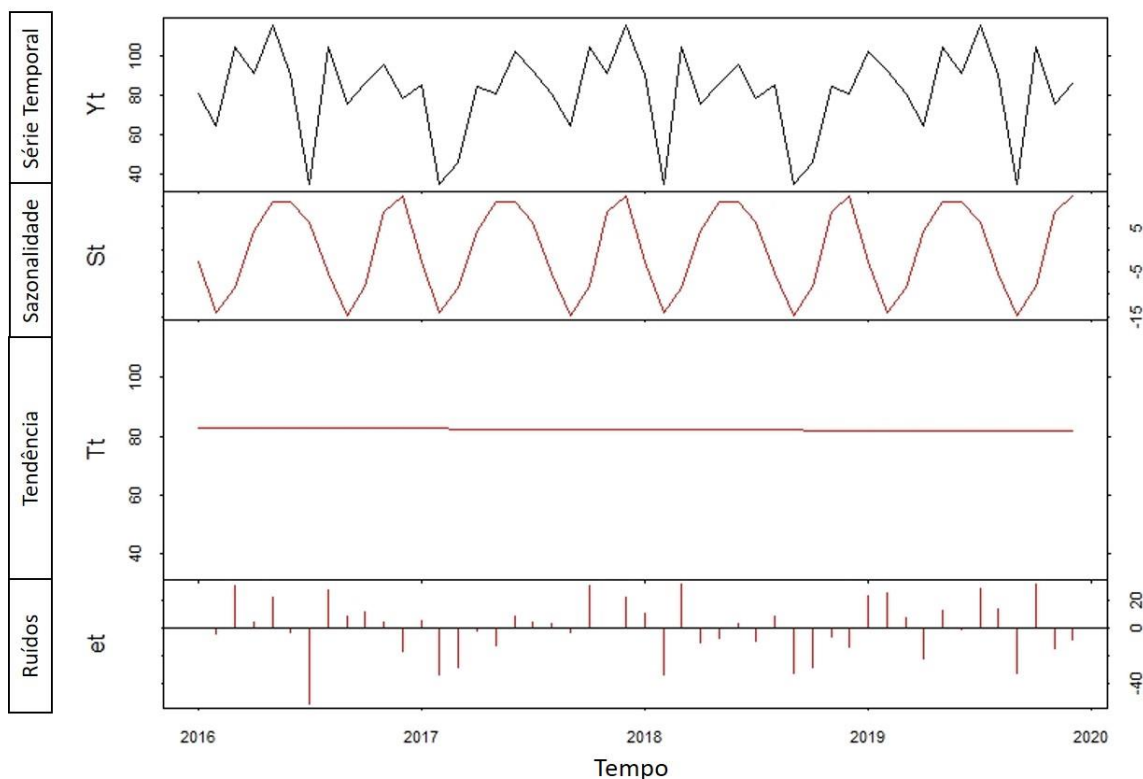


Fonte: Elaborados pelos autores



Como revelado na série espaço-temporal do reservatório Piaus na Figura 55, fica notório o caráter sazonal da diminuição de CHL-a nos meses de junho e julho dos anos estudados. É relevante destacar a tendência linear no padrão dos valores de CHL-a, mostrando que os mesmos valores ocorrem com frequência nas mesmas épocas do ano.

Figura 55 – Série temporal de CHL-a no reservatório Piaus



Na falta de pessoal e condições adequadas para o monitoramento *in situ*, o sensoriamento remoto mostrou ter resultados satisfatórios para a obtenção de informações sobre a qualidade da água (ANSPER e ALISKA., 2019). Carroll et al. (2019) explicam que apesar da grande quantidade de informações que os produtos de sensoriamento remoto fornecem, muitas vezes, séries temporais não são realizadas na sua totalidade. O principal fator que dificulta esse acompanhamento em uma menor escala de tempo é a presença de nuvens.

Nos reservatórios estudados, foi possível notar que eles se encontram em estado de eutrofização na maior parte do tempo, tal fato fica nítido, devido as altas concentrações de CHL-a, variável utilizada para indicar eutrofização (ANSPER e ALISKA, 2019; MILLETE et al., 2019) que deveria ser menor ou igual a 30 mg/L, conforme o Conama. Apesar disso, Tomming et al. (2016) são prudentes, afirmando que eventos não rotineiros, como chuvas fortes, podem mudar os parâmetros da qualidade da água de forma rápida. Assim, em datas que têm ausência

de imagens, pode sim, haver fenômenos que causam uma abrupta mudança na qualidade da água.

#### 8.4 Considerações finais

Existem na literatura uma abundância de estudos que testam ferramentas e metodologias de sensoriamento remoto aplicado no estudo do processo de eutrofização, não existindo o consenso sobre qual metodologia e sensores têm melhor desempenho ou são mais utilizados. Imagens de satélites gratuitos, como Landsat, MODIS e Sentinel são usadas regularmente, por suas características espaciais, espectrais e temporais. Menores resoluções temporais e menores resoluções espaciais, não significa melhores dados, existem fatores ambientais que interferem diretamente nos resultados dos estudos.

Foi possível elaborar uma equação semiempírica que representasse a realidade do semiárido piauiense. O uso de dados híbridos, coletados *in situ* e de sensoriamento remoto, permitiu estipular de maneira rápida e com baixo custo, a concentração de CHL-a em diferentes ambientes aquáticos ao longo de três anos consecutivos, o que provavelmente não seria viável por meio da utilização de métodos tradicionais de monitoramento.

Um maior número de pontos amostrais coletados *in situ*, nem sempre reflete em um algoritmo semiempírico mais eficaz, os locais de amostragem dentro dos reservatórios, podem alterar os valores reais da concentração de clorofila-a. Os dados quando coletados mensalmente, podem representar melhor os fenômenos que ocorrem durante o ano, exprimindo com mais precisão as variações anuais.

O algoritmo Bfast se mostrou um importante meio no conhecimento dos padrões em cada reservatório estudado, suas possibilidades de análises serviram para aprofundar e comprovar os resultados mostrados pela imagens espaço-temporais.

Por fim, esse estudo se mostrou importante, uma vez que, é uma forma de conhecer, aplicar e explicar o processo de eutrofização em reservatórios a partir da utilização do sensoriamento remoto. Além disso, o algoritmo aqui elaborado pode ser testado em outras áreas de estudo, possibilitando a obtenção de informações sobre corpos aquáticos que não têm o devido acompanhamento por órgãos de fiscalização.

## 8.5 Referências

- ANSPER, A.; ALIKAS, K. Retrieval of chlorophyll a from sentinel-2 MSI data for the European Union water framework directive reporting purposes. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 64, 2019.
- ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. **Water International**, v. 41, p. 213-230, 2015.
- ASSIS, A. P. et al. **Barragens de terra e enrocamento**. UNB, Publicação interna. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/3550>>. Acessado em: out. 2017.
- BODDULA, V. et al. Data driven analysis of Algal Bloom activity for effective Water Sustainability. In: **2016 IEEE - International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-SocialCom-SustainCom)**. IEEE, 2016. p. 424-430.
- BRAGA, G. G. et al. Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2015.
- BRANDÃO, C. J. et al. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. **São Paulo: CETESB**, 2011.
- CAIRO, C. et al. Hybrid Chlorophyll-a Algorithm for Assessing Trophic States of a Tropical Brazilian Reservoir Based on MSI/Sentinel-2 Data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 40, 2020.
- CARROLL, Katie A. et al. An Evaluation and Comparison of Four Dense Time Series Change Detection Methods Using Simulated Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2779, 2019.
- CHEN, L. et al. Spatial-temporal distribution and limiting factor variation of algal growth: three-dimensional simulation to enhance drinking water reservoir management. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 7417-7432, 2018.
- CHENG, C. et al. Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake considering spatial and temporal variations. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 2, p. 84, 2019.
- COELHO, C. F. **Eutrofização em pequenos reservatórios semiárido: saneamento rural, aspectos limnológicos e sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução de N° 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Acesso em: 05 jan. 2019.
- DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. **Applied Optics**, v. 44, n. 3, p. 412-422, 2005.

DATSENKO, I. S.; SANTAELLA, S. T.; ARAÚJO, J. C. de. Peculiaridades do processo de eutrofização dos açudes da região semi-árida. In: **Congresso Brasileiro de Saneamento e Engenharia Ambiental**, 20, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1999.

ESTEVES, F. de A. Fundamentos de Limnologia. 3ª edição. **Interciência, Rio de Janeiro**, 2011.

FERREIRA, R. M. P. et al. Aplicação do sensor MSI/Sentinel-2 na estimativa de componentes óticamente ativos em lagos de planície de inundação amazônica. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18.(SBSR), 2017, Santos. Anais**, p. 3687-3694.

FRASQUET, M. T. S. et al. Sentinel 2 Analysis of Turbidity Patterns in a Coastal Lagoon. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 2926, 2019.

GONÇALVES, V. D.; FERNANDES, C. V. S. Variabilidade Espaço-Temporal de Parâmetros de Qualidade da Água ao Longo de seção de Monitoramento do Rio Iguaçu. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 533-553, 2017.

GRENDAITĖ, D. et al. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. **Geologija. Geografija**, v. 4, n. 1, 2018.

HA, N. T. T. et al. Selecting the best band ratio to estimate chlorophyll-a concentration in a tropical freshwater lake using sentinel 2a images from a case study of lake ba be (northern vietnam). **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 9, p. 290, 2017.

HE, X. et al. Toxic cyanobacteria and drinking water: impacts, detection, and treatment. **Harmful algae**, v. 54, p. 174-193, 2016.

JONES, J. G. A guide to methods for estimating microbial numbers and biomass in fresh water. **Freshwater Biological Assoc.**, 39, 1979.

LOPES, F. B. et al. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016.

MARENCO, José A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000501973&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em: 30 mar. 2020. Epub ago. 14, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MATTHEWS, M. W. et al. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 637-652, 2012.

MILLETTE, N. C. et al. Using spatial variability in the rate of change of chlorophyll a to improve water quality management in a subtropical oligotrophic estuary. **Estuaries and Coasts**, v. 42, n. 7, p. 1792-1803, 2019.



MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394-406, 2012.

MOAL, M. L. et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle?. **Science of the total environment**, v. 651, p. 1-11, 2019.

MOSES, W. J. et al. Satellite estimation of chlorophyll-a - concentration using the red and NIR bands of MERIS - The Azov Sea case study. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 4, p. 845-849, 2009.

NYENJE, P. M. et al. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa-A review. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 3, p. 447-455, 2010.

PAERL, H. W. et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy. **water research**, v. 45, n. 5, p. 1973-1983, 2011.

PAGE, B. P.; KUMAR, A; MISHRA, D. R. A novel cross-satellite based assessment of the spatio-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 66, p. 69-81, 2018.

PATRA, P. P. et al. Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states in Nalban Lake of East Kolkata Wetland, India from Landsat 8 OLI data. **Spatial Information Research**, v. 25, n. 1, p. 75-87, 2017.

PFALTZGRAFF, P. A. dos S. **Geodiversidade do estado do Piauí**. CPRM - 2008.

PRASAD, S.; et al. Assessing the efficacy of Landsat-8 OLI imagery derived models for remotely estimating chlorophyll-a concentration in the Upper Ganga River, India. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 2439-2456, 2020.

SAR. **Sistema de acompanhamento de reservatórios**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/nordeste-e-semiarido/piaui>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

SHI, K. et al. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: present knowledge and future challenges. **Science Bulletin**, 2019.

TOMING, K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016.

VERBESSELT, J. et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 106-115, 2010.

WANG, X.; GONG, Zhaoning; PU, Ruiliang. Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 10, p. 620, 2018.

WIEGAND, M. C. et al. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 415-424, 2016.

WU, L. et al. Multi-Type Forest Change Detection Using BFAST and Monthly Landsat Time Series for Monitoring Spatiotemporal Dynamics of Forests in Subtropical Wetland. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 341, 2020.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta um importante conteúdo para a comunidade de recursos hídricos brasileira, mais particularmente a comunidade de Sensoriamento Remoto aplicado à recursos hídricos. Nele, foram abordados aspectos relevantes sobre as legislações que regulam os recursos hídricos, principalmente, aquelas que tratam sobre a qualidade da água. Aqui, a clorofila-a, foi usada como variável chave para a detecção, monitoramento e acompanhamento do processo de eutrofização. Também foram discutidos os impactos que a eutrofização pode causar na vida da população local, trazendo consequências nas atividades econômicas, sociais e ambientais, em uma região que sofre repetitivamente com longos períodos de seca e escassez hídrica.

Pela importância da temática, observou-se a preocupação da comunidade científica mundial no estudo da eutrofização. Nos últimos dez anos, houve um aumento nas pesquisas realizadas em todo o mundo. Nelas, o sensoriamento remoto é usado para quantificar a clorofila-a, e assim, acompanhar o desenvolvimento do processo de eutrofização. Nesse cenário o Brasil, se mostrou atuante, estando entre os dez países que mais produzem conteúdo científico nessa temática.

Atingir as metas estipuladas na resolução Conama n° 357/2005, de acordo com o enquadramento dos corpos hídricos, é uma difícil missão. As características limnológicas de ambientes aquáticos, são naturalmente voláteis. Além de sofrerem influência de fatores externos, o desequilíbrio ambiental colabora para a celeridade das oscilações dos atributos limnológicos. A afirmação que determinado corpo d'água é próprio para uso, deve ser feita com extrema cautela, pois as condições dessas águas mudam constantemente.

O monitoramento dos corpos hídricos, devem ser realizados com periodicidade, devido as rápidas alterações nos padrões limnológicos ocasionadas pelas ações humanas e pelas características climáticas. Por esse motivo, o sensoriamento remoto têm sido objeto de mais estudos no intuito de aprimorar os seus resultados no monitoramento da qualidade da água. Atualmente, existem grandes quantidades de algoritmos desenvolvidos para a estimativa da clorofila-a em ambientes aquáticos, apesar de serem criados para regiões específicas, esses algoritmos puderam ser adaptados para o seminário piauiense. Essa adaptação se mostrou eficaz, apesar de ser menos representativa do que os algoritmos originalmente desenvolvidos.

Modelos de regressão linear simples, criados a partir de dados coletados no próprio semiárido piauiense, obtiveram melhores resultados estatísticos. Séries temporais elaboradas em função desses modelos, possibilitam a verificação de tendências e sazonalidades, auxiliando

aos responsáveis por esses ambientes a anteciparem problemas, e na ocorrência deles, adotar decisões concisas e precisas.

Os procedimentos metodológicos abordados trouxeram questionamentos importantes, não somente sobre as metodologias tradicionais, mas também sobre o sensoriamento remoto na estimativa da clorofila-a. No que tange as metodologias tradicionais, recursos financeiros e técnicos devem ser planejados adequadamente, pois a partir deles, serão definidos importantes questões para a coleta e estimação da clorofila-a. A periodicidade amostral, quantidade de pontos, escolha da metodologia mais adequada, solvente a ser utilizado, são os principais aspectos que devem ser contemplados no planejamento do monitoramento da clorofila-a. A localização dos reservatórios, foi uma dificuldade encontrada durante esse estudo. O difícil acesso, impossibilitou a amostragem pontual mais ampla.

Nas metodologias que utilizam o sensoriamento remoto como alternativa de monitoramento, devem ser observados as características dos sensores utilizados, resoluções espaciais, temporais, radiométrica e espectral fazem diferença na escolha do sensor. Além disso, existem limitações no uso do sensoriamento remoto, a principal dela, encontrada no presente estudo, foi a grande quantidade de nuvens na região dos reservatórios.

A aplicação das metodologias tradicionais ou alternativas do sensoriamento remoto, em reservatórios do nordeste brasileiro é representativa, pois trata-se de uma região que demanda grande atenção dada as suas características, como apresentado nesse estudo. Toda informação, mesmo que pequena, é de grande valia para a análise dos reservatórios piauienses, possibilitando que órgãos ambientais tenham alguma informação sobre a qualidade da água que está sendo utilizada pela população.

De modo geral, o presente estudo mostrou que é possível o monitoramento da dinâmica espaço-temporal da CHL-a nos reservatórios de água inseridos no semiárido piauiense por meio da utilização do sensoriamento remoto, apesar das limitações existentes. Embora não exista um algoritmo único para a estimativa de clorofila-a, a ampliação do monitoramento com mais dados coletados *in situ*, em diferentes reservatórios do estado, e a utilização de sensores com menor resolução temporal e espacial, possa possibilitar um algoritmo único que detecte diferentes eventos do que os apresentados nesse estudo.