



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

RUDNA ANGELICA VIEIRA DO VALE

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA EM TRECHO URBANO DE UM RIO NO
SEMIÁRIDO: ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELAGEM DE ESTIMATIVA**

MOSSORÓ - RN

2025

RUDNA ANGELICA VIEIRA DO VALE

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA EM TRECHO URBANO DE UM RIO NO
SEMIÁRIDO: ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELAGEM DE ESTIMATIVA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho,
Prof. Dr.

Coorientador: Paulo César Moura da Silva,
Prof. Dr.

MOSSORÓ - RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva tese. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

V149f Vale, Rudna Angelica Vieira.
Índice de qualidade de água em trecho urbano
de um rio no semiárido: análise estatística e
modelagem de estimativa / Rudna Angelica Vieira
Vale. - 2025.
98 f. : il.

Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho.
Coorientador: Paulo César Moura Silva.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em --
Selecione um Curso ou Programa--, 2025.

1. Gestão de recursos hídricos . 2. Análise
ACP. 3. Equação Senoidal. 4. Drone . 5. SIG. I.
Lemos Filho, Luis César de Aquino, orient. II.
Silva, Paulo César Moura , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

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

RUDNA ANGELICA VIEIRA DO VALE

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA DE RIO EM TRECHO URBANO NO
SEMIÁRIDO: ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELAGEM DE ESTIMATIVA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Defendida em: 26 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Luis César de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Paulo César Moura da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Steferson Bezerra de Melo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

José Espinola Sobrinho, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Francisco das Chagas da Costa Filho, Prof. Dr. (UFRPE)
Membro Examinador

Daniela da Costa Leite Coelho, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador Suplente

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo à Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA e ao Programa de Pós Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade de cursar Doutorado.

Agradeço ao, hoje meu esposo, Ulysses Araújo, meu amor, pela paciência, carinho e pela ajuda quando precisei.

Agradeço ao meu orientador Luís Cesar de Aquino Lemos Filho, pela continuidade na orientação, parceria que vem desde o mestrado, e também ao meu coorientador Paulo César, pelo auxílio e por apontar novos caminhos na pesquisa.

Agradeço ao professor Steferson Bezerra de Melo pela imensa ajuda na condução da pesquisa em um momento primordial.

Agradeço aos meus colegas e colaboradores nessa pesquisa Vandérbio Segundo e Alisson Rodrigues que acordaram cedo para decolar com o drone junto comigo. Também à Felipe Ferrera, que de bom grado me ajudou nas coletas de água.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade e contribuição para com meu trabalho, em especial ao professor José Espinola, grande professor da instituição e referência no seu ramo de atuação, e que tive o prazer de ser discente dele.

Agradeço as técnicas Carolina Mendes, Maria Valdete e Paula Neitzke pela atenção e força com as análises de laboratório.

Aos meus amigos também, Francisco Costa Filho, Ana Paula Caldas, Ana Carolina Silveira, pelo incentivo e por estarem presentes quando eu precisei descontraír.

E a todos que, direta ou indiretamente contribuíram, ao longo desses 4 anos para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

A água é um elemento natural essencial a vida no planeta, e é preciso preservá-la, garantindo seu uso racional, sobretudo em regiões semiáridas, pois são áreas que sofrem com restrições de recursos hídricos. Além da escassez de água, bacias hidrográficas localizadas em áreas semiáridas podem ter trechos intermitentes devido à sua baixa taxa de recarga, como também são impactadas por ações antrópicas. Para que se tenha um uso sustentável da água, é primordial se fazer uma gestão eficiente de recursos hídricos, e, uma atividade que dá suporte a essa gestão é o monitoramento periódico dos corpos d'água. Contudo, essa atividade de monitoramento pode ser onerosa, demandar muito tempo para obter resultados, ou até mesmo, tornarem-se inviáveis. Criar alternativas viáveis à atividade de monitoramento convencional se mostra atividade significativa para gestão de recursos hídricos. Perante esse contexto, a pesquisa teve como foco inicial a aplicação da metodologia de análise estatística conhecida como Análise de Componentes Principais (ACP) em nove variáveis do Índice de Qualidade da Água (IQA). Esses índices foram calculados a partir de amostras de água coletadas em um trecho urbano do rio Apodi-Mossoró, localizado na cidade de Mossoró no estado brasileiro do Rio Grande do Norte, ao longo de um período de 15 meses, entre os anos de 2022 e 2023. Aplicando a metodologia ACP foram verificadas as variáveis mais influentes, dentre as que compõem o IQA, apontando o comportamento da qualidade do trecho, como também reduzindo e selecionando as variáveis a serem consideradas como prioritárias no momento de realizar as análises. Em segundo lugar foi proposto uma metodologia de simples acesso, utilizando geotecnologias com Drone Mavic Air 2, para retratar pontos de coletas das amostras e Sistema de Informações Geográficas (SIG) com os softwares Agisoft Metashape e Qgis 3.28.14 para tratamento das imagens, e delimitar a área de ocupação de macrófitas aquáticas. De posse desses dados, foi proposta uma equação do tipo senoidal que correlaciona a área de ocupação das macrófitas no rio em estudo com o IQA determinado em laboratório.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos, monitoramento, análise ACP, equação senoidal, Drone, SIG.

ABSTRACT

Water is an essential natural element for life on the planet, and it is crucial to preserve it and ensure its rational use, especially in semi-arid regions, which face significant water resource constraints. In addition to scarcity, watersheds located in semi-arid areas may have intermittent stretches due to low recharge rates and are also affected by negative impacts of anthropogenic activities. For sustainable water use, efficient water resource management is essential, and periodic monitoring of water bodies plays a critical role in supporting this management. However, monitoring activities can be costly, time-consuming, and, in some cases, unfeasible. Developing viable alternatives to traditional monitoring methods is a significant step toward improving water resource management. The research initially focused on applying the statistical analysis methodology known as Principal Component Analysis (PCA) to nine variables of the Water Quality Index (WQI). These indices were calculated from water samples collected in an urban stretch of the Apodi-Mossoró River, located in the city of Mossoró, RN, over 15 months between 2022 and 2023. By applying PCA, the most influential variables within the WQI components were identified, allowing for an assessment of water quality behavior in the studied stretch and streamlining the selection of priority variables for future analyses. In addition, a simple and accessible methodology was proposed using geotechnologies such as a Mavic Air 2 Drone to map sampling points, and GIS software like Agisoft Metashape and QGIS 3.28.14 to process images and delineate the area occupied by aquatic macrophytes. Based on this data, a sinusoidal equation was proposed to correlate the macrophyte occupation area in the river with the WQI determined in the laboratory.

Keywords: Water resource management. Monitoring. PCA analysis. Sinusoidal equation. Drone. GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Delimitação territorial da cidade de Mossoró, estado brasileiro do Rio Grande do Norte.	16
Figura 2: Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró	17
Figura 3: Ponto de descarga de esgoto localizado na ponte do centro da cidade de Mossoró.	18
Figura 4: Classificação da forma biológica das macrófitas.....	24
Figura 5: Sequência de atividades executadas na pesquisa.....	44
Figura 6: Mapa de localização do município de Mossoró – RN, Brasil, mostrando os pontos de coleta.....	45
Figura 7: Localização dos pontos de coletas de amostra de água do trecho urbano do rio Apodi-Mossoró, em Mossoró – RN.	46
Figura 8: Curvas Médias de variação da Qualidade das Águas	50
Figura 9: (A) Visualização aérea do ponto P1 do mês de Agosto de 2023 / (B) do ponto P3 do mês de Agosto de 2023 / (C) do ponto P2 do mês de Agosto de 2023 / (D) Vista in loco das macrófitas no ponto P2 de Agosto de 2022.....	57
Figura 10: Resumo da análise ACP. Itens (A) (C) (E) mostra a correlação em pares de componentes. Itens (B) (D) (F) mostra o agrupamento de casos da correlação por pares.	61
Figura 11: Resumo das etapas da pesquisa.	75
Figura 12: Mapa de localização do município de Mossoró – RN, mostrando os pontos de coleta.	76
Figura 13: Localização espacial dos pontos de coleta de água e áreas de atuação do Drone.	77
Figura 14: Drone Mavic Air 2 utilizado na pesquisa. (A) Vista frontal do drone. (B) Vista superior do drone.	78
Figura 15: Curvas Médias de variação da Qualidade das Águas para os 9 parâmetros.....	81
Figura 16: Imagens de aerofotogrametria por drone, no período de estudo. (A) P1 jun/2023; (B) P2 jun/2023; (C) P2 ago/2023; (D)(E)(F), respectivamente, P1, P2 e P3 em set/2023; (G)(H)(I), respectivamente, P1, P2 e P3 em out/2023; (J)(L)(M), respectivamente, P1, P2 e P3 em nov/2023.	86
Figura 17: Gráfico gerado pela equação senoidal do IQA empírico.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Instrumentos jurídicos relacionados a política de águas no Brasil.	20
Quadro 2: Resumo de pesquisas sobre contexto histórico de políticas públicas aplicadas a questão hídrica no semiárido nordestino brasileiro.	21
Quadro 3: Características para classificação dos drones.	27
Quadro 4: Exemplos de equações de modelagem ambiental.	31
Quadro 5: Resumo de metodologias utilizadas para determinar os indicadores de IQA.....	48
Quadro 6: Resumo dos resultados de IQA do trecho analisado para o período de estudo.	52
Quadro 7: Valores dos parâmetros do IQA das amostras de água para o período estudado. .	54
Quadro 8: Resumo dos resultados de IQA do PAA para o período de 2008 a 2016.	58
Quadro 9: Resumo de metodologias utilizadas para determinar os indicadores de IQA.....	80
Quadro 10: Resumo da qualidade da água durante o período de estudo.	84
Quadro 11: Modelagem da equação de IQA empírico.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação dos pontos de coleta de amostra de água de trecho urbano do rio Apodi-Mossoró em Mossoró-RN.	46
Tabela 2: Variáveis que compõem o IQA adaptado pela metodologia da CETESB	48
Tabela 3: Categorização da qualidade da água segundo IQA.	49
Tabela 4: Estatística descritiva dos parâmetros do IQA das amostras de água para o período estudado.	59
Tabela 5: Matriz de correlação dos parâmetros analisados do IQA das amostras de água dentro do período de estudo.	60
Tabela 6: Localização dos pontos de coleta de amostra de água de trecho urbano do rio Apodi-Mossoró da pesquisa.	77
Tabela 7: Parâmetros que compõem o IQA pela metodologia CETESB.	80
Tabela 8: Categorização da qualidade da água segundo IQA.	82
Tabela 9: Área de ocupação das macrófitas nos pontos analisados, correlacionado com IQA.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP – Análises de Componentes Principais
ANA – Agência Nacional de Águas
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
Cd – Cádmio
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cu – Cobre
IBGE – Instituto Nacional de Geografia e Estatística
IQA – Índice de Qualidade de Água
ME – Micro Empresa
MEI – Micro Empreendedor Individual
NSF – National Sanitation Foundation
PIB – Produto Interno Bruto
RN – Rio Grande do Norte
RPA – Aeronaves Remotamente Tripuladas
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
SIGERN – Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3	ARTIGO 1: QUALIDADE DA ÁGUA DE UM TRECHO URBANO DO RIO APODI-MOSSORÓ POR MEIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA ...	40
	RESUMO.....	40
	WATER QUALITY BEHAVIOR IN AN URBAN STRETCH OF THE APODI-MOSSORÓ RIVER THROUGH MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS.....	41
	ABSTRACT	41
1.	INTRODUÇÃO	42
2.	MATERIAL E MÉTODO	44
2.1	Área de estudo	44
2.2	Período de coleta e dados do estudo.....	47
2.3	Determinação de Índice de Qualidade de Água – IQA.....	47
2.4	Análise estatística	51
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
3.1	Índice de Qualidade de Água - IQA do trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró	52
3.2	Análise estatística do resultado de IQA.....	59
4.	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS	68
4	ARTIGO 2: APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS PARA AJUSTE DE UMA EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA DO IQA EM TRECHO URBANO DE UM RIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	71
	RESUMO.....	71
	APPLICATION OF GEOTECHNOLOGIES TO ADJUST A WATER QUALITY INDEX ESTIMATION EQUATION IN AN URBAN STRETCH OF A RIVER IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION.	72
	ABSTRACT	72
1	INTRODUÇÃO	73
2	MATERIAL E MÉTODO	75

2.1	Área de estudo	75
2.2	Período de estudo, precipitação, coleta de amostras água e obtenção das imagens..	77
2.2.1	Obtenção das imagens da área de macrófitas	78
2.3	Determinação do IQA em laboratório e tratamento das imagens	79
2.3.1	Determinação de parâmetros e cálculo de IQA	79
2.3.2	Tratamento da Imagens	82
2.4	Equação senoidal indicativa do IQA	82
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS	95
5	ANEXOS	98

1 INTRODUÇÃO GERAL

A escassez de água potável é um obstáculo que cresce com o passar dos anos. Além dessa conjuntura, a atividade antrópica afeta negativamente a qualidade da água dos mananciais terrestres.

Em regiões áridas e semiáridas essa situação é agravada devido a características ambientais próprias do clima, como baixos índices de chuvas, rios naturalmente menos volumosos, e altas temperaturas na maior parte do ano, que resulta em altas taxas de evapotranspiração.

Em trechos urbanos, as ações antrópicas são mais intensificadas no curso das bacias hidrográficas.

Com esse cenário posto, o monitoramento da qualidade de água é atividade basilar, que subsidia o gerenciamento de recursos hídricos.

O Índice de Qualidade de Água – IQA é um dos recursos mais utilizado para monitorar a qualidade da água, principalmente de mananciais superficiais. Mas, em muitas circunstâncias, o levantamento do IQA é inviabilizado.

A partir dessa dificuldade de determinar o IQA na forma tradicional, é oportuno produzir alternativas de execução acessível para indicar a qualidade da água e o IQA.

Ao utilizar dispositivos e instrumentos que estão disponíveis à execução de estudos como as aeronaves remotamente pilotadas, comumente denominadas de drones, softwares de geoprocessamento e metodologias matemáticas de modelagem, é possível criar alternativas viáveis para execução dessa atividade.

Sendo assim, com base nessa conjuntura, o objetivo da pesquisa foi de analisar a qualidade da água de trecho urbano da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, que atravessa a cidade de Mossoró, para isso, foi dividida em dois artigos. O primeiro deles propõe utilizar técnicas estatísticas para determinar, dentre os parâmetros que compõem o IQA, aqueles que mais influenciam na qualidade da água do trecho em questão, demonstrando o comportamento de trecho urbano de um rio localizado em um clima semiárido. Já o segundo artigo objetiva propor uma metodologia alternativa, com base matemática, para determinar o IQA do trecho observado do rio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Água é um elemento natural renovável essencial a vida no planeta, e, apesar desse fato, a quantidade e qualidade de água adequadas ao consumo estão cada dia mais insuficientes (SOUZA et al., 2022), mesmo assim, os mananciais de água potável sofrem impactos negativos oriundos das ações antrópicas, além de ter sua distribuição desordenada. As fontes de água têm várias atribuições tais como abastecimento público, irrigação, dessedentação de animais, geração de energia elétrica e recreação (SILVA; SOARES; CORTEZ, 2022).

A escassez de água é resultado de um conjunto de fatores de cunhos geográfico, político, ambiental e econômico, associados às formas desiguais de apropriação e uso desses recursos, e não se restringe apenas a quantidade e qualidade, mas também à distribuição, acesso e uso, tornando esse problema mais complexo (LIMA; SILVA; SAMPAIO, 2011).

O Brasil abriga o maior sistema fluvial do mundo (SILVA et al., 2024), possuindo aproximadamente 12% da água doce, com 200 mil microbacias que estão distribuídas em 12 regiões hidrográficas (OLIVEIRA et al., 2023). A zona semiárida do nordeste brasileiro caracteriza-se por ter uma das maiores densidades demográficas entre as regiões do planeta que apresentam características ambientais semelhantes (DUARTE, 2002).

A região semiárida brasileira abrange 1427 municípios nos estados do Sergipe, Alagoas, Bahia, Pernambuco, Piauí, Paraíba, Ceará, Rio Grande do Norte, Minas Gerais e Espírito Santo, totalizando 982.563 km² (SUDENE, 2021). É caracterizada por baixos índices pluviométricos, temperaturas elevadas durante todo ano, baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas evapotranspiração, que normalmente superam os totais pluviométricos, configurando taxas negativas de balanço hídricos, portanto, tornando-se um território vulnerável, podendo chegar a condições extremas, com longos períodos de estiagem (ANA, 2015).

O Nordeste do Brasil apresenta-se como uma região marcada por extremos pluviométricos, fruto da ação conjunta de distintos sistemas atmosféricos e fenômenos oceânicos. Esses últimos interferem diretamente na dinâmica dos sistemas atmosféricos e, como tal, geram anos normais e/ou anômalos. Em anos com anomalias têm-se como resultados as secas, quando ocorrem precipitações abaixo da média histórica, e inundações, quando as anomalias são positivas e superam a média histórica (SANTOS; MENDES; CRUZ, 2024). Essas características possibilitam cenário de escassez hídrica.

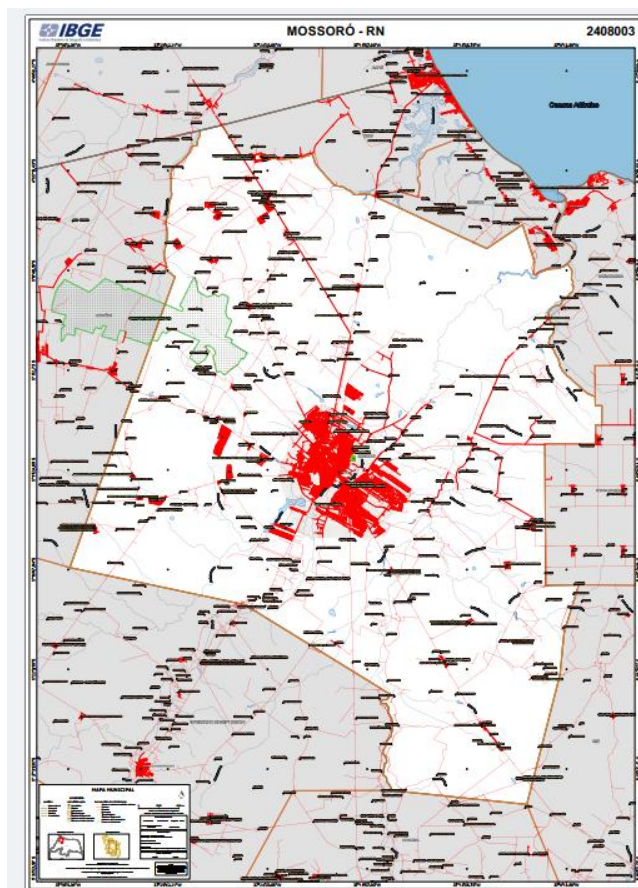
O Rio Grande do Norte, especificamente, é uma região de contrastes, de condições climáticas especiais e socioeconômicas complexas, solos diversificados, variedade

fitogeográficas e que tem 90% do seu território dentro do polígono das secas (LUCENA et al., 2022)

No que se refere à Mossoró, este é um município localizado na Mesorregião Oeste do Rio Grande do Norte. De acordo com IBGE (2024), a cidade de Mossoró tem uma população estimada de 264.577 mil habitantes, segundo Censo de 2022, com densidade demográfica de 126,03 hab/km², tendo 31% da sua população ocupada, com média salarial de 2,2 salários-mínimos, mas 38% da população vive uma renda per capita de até ½ salário mínimo. O Produto Interno Bruto - PIB per capita de Mossoró é de R\$ 26.570,03, e detêm um Índice de Desenvolvimento Humano - IDH, referente ao ano de 2010, de 0,720, considerado alto em um índice que varia de 0,000 a 1,000 (IBGE, 2024).

Tratando do seu território, mostrado na Figura 1, Mossoró tem uma área total de 2.099,334 km², com uma área urbanizada de 73,55 km², categorizada na hierarquia urbana como Capital Regional C (2C). Em 2010 o município tinha 64,6% da sua área urbanizada coberta por esgotamento sanitário e 75,5% das suas vias públicas eram arborizadas (IBGE, 2024).

Figura 1: Delimitação territorial da cidade de Mossoró, estado brasileiro do Rio Grande do Norte.

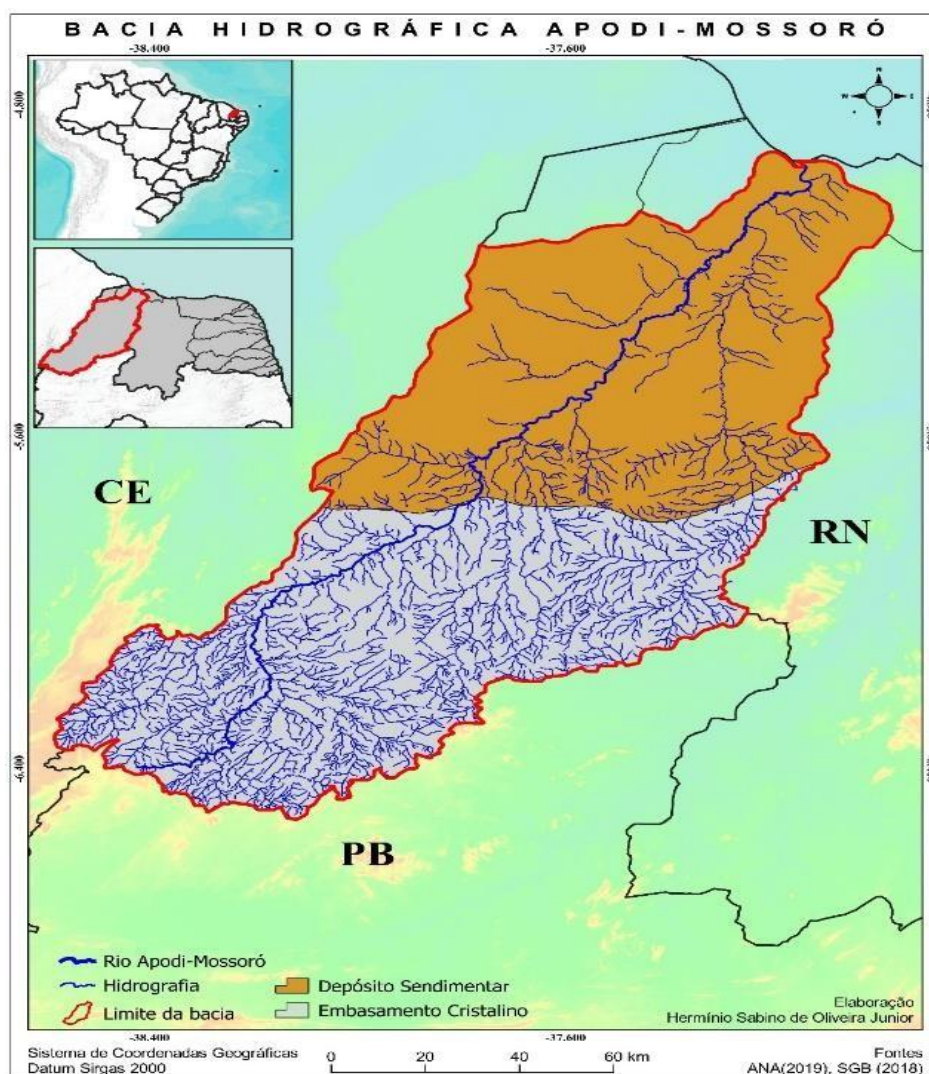


Fonte: IBGE (2024)

Segundo o Data MPE Brasil (2024), no ano de 2022 as atividades econômicas predominantes na cidade de Mossoró se concentram no setor de serviços, seguido de agropecuária e indústria. Esmiuçando o setor empresarial, 84,9% das empresas são constituídas por Micro Empreendedor Individual – MEI e Micro Empresas – ME, tendo as principais atividades no setor de comércio varejista, alimentação e comércio e reparo de veículos, mesmo tendo uma grande redução na taxa de crescimento desses estabelecimentos, no ano de 2024, em relação ao ano de 2023 (SEBRAE, 2024).

A bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró é a segunda maior do estado do Rio Grande do Norte, com extensão de 210km e abrange uma área de 14.276km², correspondendo a 26,8% do território estadual, e atravessa a cidade de Mossoró com uma área de drenagem de 9571km² (SILVA; CAMARGO, 2022). A bacia hidrográfica mencionada é apresentada na Figura 2.

Figura 2: Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró



Fonte: LEMOS FILHO; SOBRINHO; OLIVEIRA JUNIOR (2022).

Quando o curso das bacias hidrográficas, atravessa o trecho urbano, é comum que a atividade antrópica seja mais intensa nas suas margens, a exemplo, corriqueiramente, acontece uma maior descarga de poluição.

Atividades antrópicas mais comuns que afetam as bacias hidrográficas são mineração, pecuária, aumento do transporte de sedimentos devido à erosão do solo, descarte de resíduos industriais, domésticos e agrícolas (LOBATO et al., 2015).

O curso da bacia do Rio Apodi-Mossoró passa por cidades circunvizinhas à cidade de Mossoró, e a montante, existem várias atividades econômicas no entorno do rio, como a produção de gesso e materiais cerâmicos para construção civil, extração de petróleo e atividades agrícolas. Dentro do município de Mossoró as atividades antrópicas que se destacam é o descarte de resíduo doméstico e da atividade de serviços, como exemplo a Figura 3.

Figura 3: Ponto de descarga de esgoto localizado na ponte do centro da cidade de Mossoró.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os recursos hídricos da bacia Apodi-Mossoró são utilizados principalmente para abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação, sendo que nos últimos anos tem-se observado um crescimento da demanda de água para aquicultura. No que se refere a irrigação,

o polo de fruticultura irrigada de Baraúnas e Mossoró é um dos maiores produtores de melão do Estado, utilizando água do aquífero Jandaíra na região da Chapada do Apodi (SILVA; CAMARGO, 2022).

Os cenários de mudanças climáticas se mostram cada vez mais severos, e se apresentam ainda mais intensos para regiões como o semiárido nordestino (TIBÚRCIO et al., 2023). O aumento de 1,1°C na temperatura global demonstra mudanças climáticas que afetam todo o mundo, impactando padrões de precipitação e nos processos hidrológicos (IPCC, 2022; GALVINÍCIO, 2019). Nos últimos anos, o manejo e a preservação de bacias hidrográficas tornaram-se temas relevantes, visto que as consequências da falta de conservação e proteção das fontes de água podem ocasionar contaminação da água subterrânea por organismos patogênicos; maior concentração de metais pesados; carga orgânica (demanda bioquímica de oxigênio) e nitratos nos corpos d'água, conduzindo a um quadro de degradação ambiental (SOUZA; SILVA; DIAS, 2012).

Para fins de gestão dos recursos hídricos, as principais fontes de água são originárias de rios, lagos, mares e subsolo e, a interligação destas redes são denominadas de bacias hidrográficas. A bacia hidrográfica é definida pelas áreas homogêneas e, a morfogênese (moldagem de paisagens e ecossistemas) local interfere na qualidade da água (SILVA et al., 2024).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil deu-se, inicialmente, com o Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934, conhecido como Código das Águas, o qual considera as águas como recursos naturais renováveis. Com isso, observa-se que na época, os recursos hídricos eram utilizados de forma abundante para proporcionar o desenvolvimento industrial e agrícola do país, incentivando, especialmente, a produção de energia elétrica (SOUZA; SILVA; DIAS, 2012). A partir desse fato, surgiram mais instrumentos jurídicos para nortear o monitoramento e uso da água no Brasil, como resumidos por Souza, Silva e Dias (2012), mostrados no Quadro 1:

Quadro 1: Instrumentos jurídicos relacionados a política de águas no Brasil.

Instrumento jurídico	Data de publicação
Decreto Federal 24.643 – Códigos da Águas	10 de julho de 1934
Constituição Federal – art. 21 inciso XIX	05 de outubro de 1988
Lei nº 7.990/89 – Compensação pelo uso dos recursos hídricos	28 de dezembro de 1989
Lei nº 8.001/90 – Altera a Lei nº 7.990/89	13 de março de 1990
Lei 9.433 - Política Nacional de Recursos Hídricos	8 de janeiro de 1997
Decreto 2.612 de 1998 – Dispõe sobre o Conselho Nacional de Recursos Hídricos	3 de junho de 1988
Lei nº 9.984/2000 – Criação da Agência Nacional de Águas	17 de julho de 2000
Resolução nº 58 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – Plano Nacional de Recursos Hídricos	31 de janeiro de 2006
Decreto 11.960 de 2024 – Dispõe sobre o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (atualização de decretos anteriores, inclusive o decreto 2.612)	21 de março de 2024

Fonte: Adaptado de Souza, Silva e Dias (2012)

Especificamente, para o nordeste brasileiro, Aguiar et al. (2019), resume que, as políticas públicas, dentro de um contexto histórico, tem início por volta de 1723, desencadeadas por secas, crises hídricas e intensa desigualdade social, para formular estratégias para maior acesso da população a recursos hídricos, que atendam a demandas dessa população e visando o desenvolvimento rural (AGUIAR et al., 2019). Neste trabalho estão listadas várias pesquisas que delimitam as políticas públicas relacionadas à questão hídrica no semiárido brasileiro, como pode ser observado no Quadro 2:

Quadro 2: Resumo de pesquisas sobre contexto histórico de políticas públicas aplicadas a questão hídrica no semiárido nordestino brasileiro.

Autor	Delimitação histórica	Fases das políticas públicas
ANDREADE, 1970	Escrito em 1970	1 – humanitária; 2 – fase hidráulica (construção de açudes); 3 – diferenciação; 4 - integração do desenvolvimento regional e promoção universitária.
CARVALHO, 1988	Até 1950 de 1950 a 1959 de 1959 a 1964 a partir de 1964	1 – presença governamental; 2 – mudança de padrão; 3 - modernização com reformas; 4 - modernização conservadora, decorrente da implantação do regime militar.
MAGALHÃES; GLANTZ, 1992	De 1877 a 1906 De 1906 a 1945 De 1945 a 1950	Fase de estudos e proposição de soluções; Fase de engenharia, com políticas de construções de açudes; Fase ecológica, com desenvolvimento de práticas agrícolas adaptada as especificidades da região
CAMPOS, 2014	De 1583 a 1848 De 1849 a 1877 De 1877 a 1958 De 1959 a 1991 A partir de 1992	1 - Defrontando-se com as secas; 2 - A busca do conhecimento; 3 - A hidráulica da solução; 4 - A política do desenvolvimento em bases regionais; 5 - O gerenciamento das águas e as políticas sociais;

Fonte: Adaptado de Aguiar et al. (2019).

As obras de engenharias, com a construção de açudes e barragens, têm elos com a regularização de fluxos e com abastecimento, pois períodos de seca podem ser extensos e causar transtornos à população. Essas obras artificiais são uma alternativa que mantém sertanejos em suas terras, tendo facilitado o acesso à água para consumo próprio, para a dessedentação de animais (NOVAIS; CARVALHO JUNIOR; OLIVEIRA, 2022), como também para abastecimentos das cidades da região semiárida.

No Estado do Rio Grande do Norte, o instrumento jurídico que rege a gestão de recursos hídricos é a Lei nº 6.908 de 1º de julho de 1996, e, nos anos seguintes, a partir dessa lei, foram criados o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERN; os comitês de bacias hidrográficas, em específico, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, criado pelo Decreto nº 21.881 de 10 de setembro de 2010, e instalado no ano de 2013 (SILVA et al., 2024); e também a criação da autarquia estadual Instituto de Gestão Águas do Rio Grande do Norte, pela Lei nº 8.086 de 15 de abril de 2002, que é responsável gestão técnica e operacional dos recursos hídricos do Estado (RIO GRANDE DO NORTE, 2024).

Nesse contexto histórico, também foi criado pela Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981, o Conselho Nacional de Ambiente – CONAMA, que contribui com emissão de resoluções que estabelece critérios para avaliação de águas para consumo, e categoriza as águas. A mais proeminente delas é a resolução nº 357 de 17 de março de 2005, a qual “*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.*”. Outra de grande importância é a resolução CONAMA nº 274 de 29 de novembro de 2000, que “*Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras*” (CONAMA, 2024).

Para estabelecer os critérios citados nas resoluções nº 357 e de nº 274 do CONAMA, se faz necessário monitorar os parâmetros que os compõem. O monitoramento dos recursos hídricos é um instrumento de avaliação e gestão da qualidade da água, auxiliando na identificação dos impactos atrelados às atividades antrópicas (SANTOS et al., 2021) e tem por objetivo levantar informações em determinados períodos específicos sobre a qualidade e quantidade de águas subterrâneas e superficiais em todo território brasileiro (ANA, 2007). Essa atividade de monitoramento nos corpos d’água em território nacional, pode ser resumida em determinar parâmetros físico-químicos e biológicos deles.

As principais vantagens dos índices indicativos são a facilidade de comunicação com o público leigo, o status mais amplo do que as variáveis isoladas pelo fato de fundir diversas variáveis em um único valor, mesmo com unidades de medidas diferentes (CETESB, 2022).

O Índice de Qualidade de Água – IQA é uma metodologia convencional e robusta, baseada no uso de parâmetros padronizados para caracterizar e determinar a qualidade da água, principalmente a água superficial (OCHUNGO et al., 2019). É uma ferramenta de medição usada para converter grande volume de dados de avaliação de água em uma única equação, que demonstra a categoria de qualidade de água (SANCHEZ et al., 2007; TYAGI et al., 2013).

O primeiro IQA foi desenvolvido em 1965 por Horton, e em 1970 foi apresentado o IQA proposto pela National Sanitation Foundation (NSF), esse último, passando por adaptações e sendo um dos mais utilizados no Brasil (SANTOS et al., 2021).

No Brasil, alguns estados já adotam o IQA, como principal indicador de qualidade da água para avaliação da qualidade da água bruta, tendo em vista seu uso para o abastecimento público. (ANA, 2024).

A Agência Nacional de Águas – ANA é responsável por monitorar as condições das águas superficiais e subterrâneas do país, por meio do IQA, pois o especifica como principal indicador qualitativo usado no país para avaliar a qualidade da água para o abastecimento público (MATOS et al., 2023).

Desde 1975, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, utiliza o IQA como ferramenta para obter informações básicas de qualidade da água para o público geral. A criação do IQA baseou-se numa pesquisa de opinião junto a especialistas em qualidade de águas, que indicaram as variáveis a serem avaliadas, o peso relativo e a condição com que se apresenta cada parâmetro, segundo uma escala de valores *rating*, então a CETESB adaptou o IQA que incorpora nove variáveis consideradas relevantes para a avaliação da qualidade das águas, tendo como determinante principal a sua utilização para abastecimento público (CETESB, 2022).

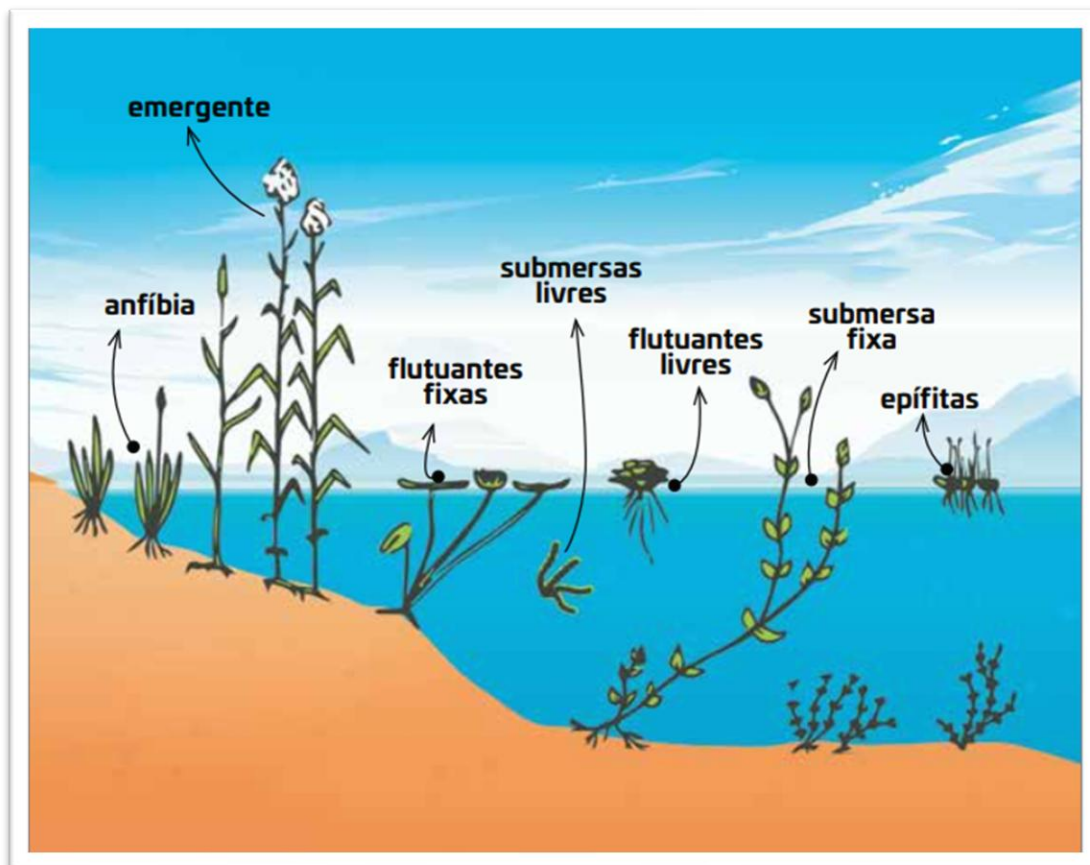
As adaptações produzidas pela CETESB também servem como base para pesquisas, para outras adaptações e para utilização desse IQA por órgãos públicos de outros estados do Brasil. O IQA-CETESB também categoriza o corpo d'água em qualidade ÓTIMA, BOA, REGULAR, RUIM E PÉSSIMA.

Os corpos hídricos podem apresentar alguns indicadores visuais da sua qualidade, um deles é a presença de macrófitas. Macrófitas aquáticas são espécimes de vegetais vistas a olho nu, em que as fases fotossintetizantes ativas são permanentemente ou parcialmente submersas ou flutuantes (IRGANG; GASTAL JUNIOR, 1996), que contribuem para estruturação e dinâmica de ecossistemas aquáticos, vivendo em vários ambientes como água doce, água salobra ou brejos, aproveitando sua capacidade adaptativa (ESTEVES, 1998).

Pedralli (1990) classifica as macrófitas de acordo com sua forma biológica, ilustrado na Figura 4:

- Anfíbia: capaz de viver tanto em área alagada como fora da água, geralmente modificando a morfologia da fase aquática para a terrestre quando o nível da água abaixa;
- Emergente: enraizada no sedimento, com uma parte submersa e outra emersa;
- Flutuante fixa: enraizada no sedimento, possuindo folhas flutuantes;
- Flutuante livre: não enraizada no sedimento, podendo ser levada pela correnteza, pelo vento ou até por animais;
- Submersa fixa: enraizada no sedimento, caules e folhas submersos, geralmente emergindo a flor para fora da água;
- Submersa livre: não enraizada no fundo, totalmente submersa, geralmente emergindo somente as flores;
- Epífia: ocorre sobre outras plantas aquáticas.

Figura 4: Classificação da forma biológica das macrófitas.



Fonte: Cemig (2021).

As macrófitas desempenham importantes funções em ambientes aquáticos, além de funcionarem como indicadoras da qualidade da água, atuando: na ciclagem de nutrientes, removendo nutrientes de ambientes eutrofizados, fornecendo materiais de importância econômica para a sociedade, favorecendo o desenvolvimento da comunidade do perifíton, proporcionando heterogeneidade de *habitat*, protegendo as margens do corpo d'água contra a erosão (XAVIER et al., 2021).

Mas elas também podem causar problemas ambientais devido ao crescimento excessivo, e são considerada plantas daninhas quando ocupam corpos d'água desordenadamente, e é resultado do constante aumento da poluição por esgoto doméstico, fertilizantes agrícolas e efluentes industriais (XAVIER et al., 2021). Carga poluidora como os efluentes sanitários contêm grandes quantidades de matéria orgânica, detergentes e outros poluentes que são fontes de fósforo e/ou nitrogênio, nutrientes limitantes da produtividade primária de ecossistemas aquáticos (RIBEIRO et al., 2019).

Considerando suas funções, plantas aquáticas executam filtração, degradação e assimilação de poluentes minerais e orgânicos (REIDEL et al., 2005). Pesquisas corroboram em mostrar essa capacidade, Módenes et al. (2009) demonstram que, a espécie *egeria densa* remove de forma rápida o Zinco Zn(II) e Módenes et al. (2013) apontam que a espécie de macrófita *E. crassipes* possui boas características absorventes dos metais pesados Cádmio Cd(II), Cobre Cu(II) e Zinco Zn(II). Já Ribeiro et al. (2019) verificam que plantas da espécie *Eichhornia crassipes* são eficientes na remoção de nitrogênio amoniacal (N-amoniacal) provenientes de efluentes sanitários. Reidel et al. (2005) constataam que macrófita do tipo aguapé é efetiva na remoção de nitrogênio amoniacal (N-amoniacal) de efluente oriundos de frigorífico (REIDEL et al., 2005; MÓDENES et al., 2009; MÓDENES et al., 2013; RIBEIRO et al., 2019).

Diante desse cenário, o monitoramento das macrófitas pode dar suporte ao monitoramento da qualidade de água.

A determinação do IQA apesar de ser muito importante para classificar os corpos d'água, ela tem certas limitações, e pode ser muito onerosa, dependendo dos recursos disponibilizados para esse fim. Diante disso, é relevante ter alternativas ao IQA, quando a sua operação for dificultosa. Pesquisas com uso de geotecnologias para determinar parâmetros ambientais, aliados às ferramentas matemáticas de modelagem, tem ganhado relevância no meio científico.

O uso das geotecnologias auxilia no desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental, como também no planejamento de estratégias de conservação e preservação de recursos naturais (OLIVEIRA, 2018).

As geotecnologias são definidas como conjunto de tecnologias voltadas à coleta, ao processamento, à análise e à disponibilização de dados e informações espaciais, traduzidos em ferramentas capazes de incorporar o comportamento espacial de elementos do planeta ao processo de geração de informações sobre eles, através da sua localização, extensão e formato (IBAM, 2015).

Uma das ferramentas da geotecnologia que está em ascensão atualmente, que está sendo muito utilizadas no monitoramento ambiental e nas pesquisas científicas são as aeronave remotamente pilotada, ou comumente chamado drone.

Pelo regulamento da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, drone é o nome popular para Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPA, utilizadas para fins experimentais, comerciais ou institucionais, que não seja usada para fins de recreação e lazer (ANAC, 2024).

Por ser um equipamento relativamente barato, junto com a utilização de softwares, o drone é capaz de gerar dados precisos e eficientes através de seu mapeamento na coleta de imagens (LUZ; GALVÍNCIO, 2019).

A utilização de drones surge como solução eficaz para a coleta de dados e a supervisão de áreas de interesse (DOMINGUES et al., 2023; CHAGAS, 2024), e em algumas localidades do mundo, tornaram-se ferramenta líder para monitoramento de sistemas terrestres, normatização de áreas, mapeamento e mudanças na cobertura de solos, como também tem sido crucial para monitorar e avaliar rios e lagos (SHALARE et al., 2021), também se tornou uma alternativa ao uso de imagens de satélite, pois o seu manuseio é mais simples, é de menor custo, fornece dados em alta resolução, e vira um caminho para solução de problemas de escala, baixa resolução espacial e tempo de aquisição de dados, quando comparado a aquisição de imagens de satélite (SAMPAIO et al., 2020; IVUSHKIN et al., 2019).

A escolha do modelo de drone a ser utilizado vai depender da seleção das suas características e dos objetivos para uso das imagens. Sousa et al. (2024), em sua pesquisa, faz um resumo da classificação de drone, e está apresentado no Quadro 3.

Quadro 3: Características para classificação dos drones.

Classificação de Drone			
Tipo de asa	Autonomia e controle	Tipo de propulsão	Capacidade de carga útil
Asa fixa – semelhantes à aeronaves convencionais, maior alcance e velocidade	Controlados remotamente – pilotados por humanos através de controles remoto	Elétricos – redução quanto ao impacto ambiental e uso eficiente de energia e baixo custo de operação	Possui somente câmera – para captura de imagens e vídeos
Asa rotativa – maior capacidade de decolagem vertical, estabilidade em voos estacionários propiciando manobras precisas	Autônomos – executa tarefas programadas sem intervenção humana, usando sensores e sistema de navegação.	Combustão interna – maior potência e autonomia, utilizados em voos de longos períodos e transporte de cargas	Possui câmeras e sensores – para coleta de outros dados como temperatura e umidade,

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2024)

Concisamente, os dados coletados através do monitoramento por meio de drone possibilita a adoção de medidas de conservação sustentáveis para o semiárido brasileiro, tendo impactos positivos na preservação do meio ambiente na promoção de práticas eficientes de conservação. Em um cenário de trabalho colaborativo entre instituições governamentais, científicas e a sociedade civil, é possível utilizar os drones na preservação e recuperação do meio ambiente (SOUSA et al., 2024).

Os drones utilizam a técnica de fotogrametria para captar as imagens e informações necessárias ao estudo. O termo fotogrametria foi criado em 1855 por um geógrafo chamado Kersten e inserido na literatura internacional em 1893 por Albrecht Meydenbauer (SILVA, 2015). Em 1979 a American Society of Photogrammetry propõe que “*Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio*

ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes” (TOMMASELLI et al., 1999).

Dentro da fotogrametria há subdivisões. Uma dessas subdivisões é a aerofotogrametria que consiste em obter fotos aéreas de terrenos por meio de câmera de precisão montada em uma aeronave (TOMMASELLI et al., 1999).

Com o passar dos anos surge a fotogrametria digital, e no tempo presente a fotogrametria evoluiu com o avanço tecnológico das RPA's, sendo impulsionados com o advento das tecnologias nas áreas de ciência da computação, robótica, engenharia, inteligência artificial, multimídia e geociências (BUENO, 2019; SILVA, 2015).

O conceito de fotogrametria digital foi ampliado para o Sistema Fotogramétrico Digital, que combina a fotogrametria digital com as ciências da computação. Essa integração abrange áreas como processamento de imagens, reconhecimento de padrões e visão computacional, possibilitando a realização de operações que podem ser semi-automáticas, automáticas (com inputs do operador) ou totalmente automáticas (realizadas integralmente pelo computador) (HEIPKE, 2001). As análises fotogramétricas computadorizadas permitem a criação de nuvem de pontos para gerar uma malha 3D de alta resolução, e também é possível obter valores amostrais específicos de uma variável e ter informações contínuas sobre ela em qualquer ponto da superfície (ACOSTA et al., 2017; ROBLES et al., 2016)

Em muitas ocasiões os dados obtidos pelo monitoramento por drone precisam ser processados para que possam ser interpretados. Para essa atividade de processamento dos dados há alternativas de diversas metodologias. Uma das técnicas mais utilizadas é a de geoprocessamento através de Sistemas de Informações Geográficas – SIG.

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta desenvolvida para capturar, armazenar, gerenciar, analisar e apresentar dados espaciais, permitindo que o usuário interprete essas informações dentro de um contexto geográfico (OLIVEIRA; FACHADA; MATOS-CARVALHO, 2024). São softwares utilizados nas mais variadas pesquisas na área ambiental como investigação de uso e ocupação do solo, levantamentos topográficos, estudo de precipitação e outros (PASSOS et al., 2019).

A tecnologia SIG tem sido usada por vários setores que tratam da questão ambiental como importante ferramenta para o planejamento ambiental, pois a avaliação integrada de um grande número de variáveis se torna possível e simplificada com o uso deste sistema; permite a rápida geração de informações intermediárias e finais, além da inclusão de variáveis anteriormente não pensadas, visto que possibilita novas interações a qualquer momento (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006).

Como suporte ao manejo de bacias hidrográficas o uso dos sistemas de informações geográficas (SIG) tem possibilitado o desenvolvimento e a extrapolação de informações úteis ao planejamento de uso do solo, a partir da extração, tratamento, análise e modelagem de dados e informações espaciais (SILVA et al., 2013).

SIG é uma ferramenta de geoprocessamento que permite o armazenamento, a recuperação, a manipulação e a análise espacial de dados, com aplicação em diferentes áreas de estudo.

Atualmente há vários softwares para aplicabilidade SIG, sendo eles alternativas pagas e gratuitas. Dentre as alternativas gratuitas, um que tem grande utilização em pesquisas é o QGIS. Essa ferramenta é uma plataforma SIG que provê visualização, edição e análise de dados georreferenciados lançada em 2002.

Durante as últimas duas décadas, os drones, a fotogrametria e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornaram-se ferramentas de grande relevância em diferentes áreas da nossa sociedade, tendo aplicação muito difundida, que inclui desde atividades recreativas até complexos sistemas de segurança (VILLAR; CANDELARIO; DÍAZ, 2023).

Outra ferramenta importante para delimitar questões ambientais é a modelagem de equação. O uso de equações em estudos na área ambiental é instrumento importante para modelar fenômenos complexos, como o ciclo hidrológico, escoamento superficial, produção de sedimentos e qualidade da água. Esses modelos permitem análises preditivas e ajudam no planejamento e tomada de decisão em uma gestão sustentável.

A modelagem matemática é uma ferramenta de extrema versatilidade no ensino, podendo ser utilizada em diversos níveis do conhecimento, é uma forma de abstração e generalização com finalidade de prever tendências, e também caracterizada por ser um processo dinâmico, que auxilia a transformar situações reais em problemas matemáticos (OLIVEIRA; PIRES, 2020; BASSANEZI, 2014), auxiliando na fundamentação de decisões, o que torna interessante envolver matemática em questões ligadas ao meio ambiente (PENNEREIRO; FERREIRA, 2012).

Modelos matemáticos direcionados para aplicação na qualidade de água são técnicas que possibilitam simular condições reais, dentro de uma faixa de incertezas, e prever as consequências de diferentes ocorrências em relação aos valores observados, permitindo apresentação de propostas alternativas para o gerenciamento de recursos naturais (TUCCI, 1998).

A utilização de modelos gera vantagens na análise do processo hidrológico em bacias hidrográficas (SANTOS, 2009), e as principais delas são: a economia de tempo ao investigar mudanças físicas e antrópicas na bacia, e propicia menores custos (NÓBREGA, 2008).

Modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos tais como: tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos) (LUCAS et al., 2009).

O uso de equações matemáticas é muito difundido em estudos sobre meio ambiente. Estão presentes nos processos dos softwares voltados utilizados na área ambiental, como também em metodologias de modelagem. O próprio IQA se trata de uma equação, como também técnicas voltadas estudos de meio ambiente como SWAT, NDVI, WEPP, EUROSEM, SRD-InVEST, QUAL2E, USLE, PESAGE são modelos matemáticos, demonstrando a sua magnitude. O uso dessas metodologias exemplificadas está resumido no Quadro 4.

Quadro 4: Exemplos de equações de modelagem ambiental.

Equações matemáticas empregadas em estudos sobre Meio Ambiente		
Metodologia	Equação	Área de ação
Soil and Water Assessment Tool - SWAT	$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$	Modelagem hidrológica
Normalized Difference Vegetation Index - NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Modelagem para monitorar vegetação
Water Erosion Prediction Project - WEPP	$D_f = \tau_c \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right);$ $T_8 = C_t \cdot Q_8$	Erosão do Solo
European Soil Erosion Model - EUROSEM	$D_r = k_r \cdot I \cdot (1 - C);$ $D_f = \tau_8 \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_8} \right); \quad T_8 = k_t \cdot \rho_w \cdot V^2$	Erosão de Solo
Quality Evaluation Model - QUAL2E	$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + R$	Modelagem Hídrica
Universal Soil Loss Equation - USLE	$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$	Erosão hídrica em encostas
Peso Agregado de Impacto Ambiental - PESAGE	$I_{total} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot I_i)$	Impacto ambiental
Sediment Retention and Delivery - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs - SRD-InVEST	$RUSLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P;$ $SDR = \frac{Sedimentos_{entregues}}{Sedimentos_{produzidos}};$ $S_{retido} = RUSLE \cdot (1 - SDR)$	Retenção e entrega de sedimentos em Bacias Hidrográficas

Fonte: Adaptado pela autora (2024).

Mais um instrumento importante em pesquisas na esfera ambiental, e especificamente com recursos hídricos, é a análise estatística.

A estatística mostra-se, cada vez mais, como uma poderosa ferramenta para a análise e avaliação de dados, em várias áreas do conhecimento (VICINI, 2005). A complexidade de vários fenômenos requer uma análise de muitas variáveis diferentes, assim percebe-se uma necessidade de procedimentos de análise e interpretação adequados para a extração das informações, principalmente para tomada correta de decisões (BAKKE et al., 2008). Os métodos estatísticos, para analisar variáveis, estão dispostos em dois grupos: um que trata da estatística, que olha as variáveis de maneira isolada – a estatística univariada, e outro que olha as variáveis de forma conjunta – a estatística multivariada (VICINI, 2005).

A Análise de Componentes Principais – ACP é uma técnica amplamente utilizada em análise multivariada para explorar dados multidimensionais. Ela permite compreender a estrutura desses dados, identificar correlações e observar agrupamentos entre as variáveis analisadas. Amplamente aplicada em diversas áreas do conhecimento, a ACP tem ganhado ainda mais destaque atualmente, graças à redução de custos e à maior facilidade na obtenção de dados (KLAŠNJA-MILIĆEVIĆ; IVANOVIĆ; BUDIMAC, 2017).

A técnica ACP permite o agrupamento de amostras e a identificação de grupos similares, permitindo que essas sejam identificadas e interpretadas separadamente, também reduz muitas variáveis originais correlacionadas para um número pequeno de variáveis novas e não correlacionadas (GOTELLI; ELLISON, 2011). A ACP se vale da ideia de que se existe uma correlação diferente de zero entre as variáveis do conjunto de dados é possível determinar uma descrição mais compacta dos dados, e correlação entre variáveis significa redundância nos dados, ou seja, se duas variáveis são perfeitamente correlacionadas, então, uma delas é redundante porque se sabemos X , deduzimos Y (CARVALHO; MACHADO; QUINTANILHA, 2020).

A redução de variáveis, no monitoramento da qualidade da água, diminui o número de análises laboratoriais e leva, conseqüentemente, à economia de tempo e recursos (PASTRO et al., 2020).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da água em um trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró, que corta a cidade de Mossoró, no Rio Grande do Norte. O estudo foi desenvolvido em duas etapas complementares, buscando não apenas diagnosticar a situação atual do rio, mas também propor soluções para o monitoramento contínuo de suas águas.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, G.; MCCLUNG, E.; JIMÉNEZ, G.; GARCÍA, V. H. El empleo de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron) como herramienta de evaluación del patrimonio en riesgo: chinampas arqueológicas de Xochimilco. **Revista Española de Antropología Americana**, v. 47, p. 185-197, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5209/REAA.61978>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 25 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras** – Edição Especial. Brasília: ANA, 2015. 163 p.: il. ISBN 978-85-8210-027-1.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Indicadores e Índice de Qualidade das Águas**. Disponível em: <https://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 29 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Drones**. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>. Acesso em: 28 nov. 2024.

AGUIAR, L. C.; GROSSI, M.; OLIVEIRA, L. G.; ÁVILA, M. L. As políticas públicas no semiárido brasileiro: uma revisão de literatura. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 50, n. 2, p. 9-22, abr./jun. 2019.

ANA. **Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento, 2007. Disponível em: https://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/PANORAMA_DO_ENQUADRAMENTO.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

BAKKE, H. A.; LEITE, A. S. M.; SILVA, L. B. DA. Estatística multivariada: aplicação da análise fatorial na engenharia de produção. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 4, p. 01–14, 2008.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. São Paulo: Contexto, 2014.

BUENO, L. S. Fotogrametria digital: formação técnica, empreendedora, voltada à sustentabilidade ambiental e social na matriz do curso de Engenharia Civil da UNIARP Campus Caçador/SC. **Ignis**, Caçador, v. 8, n. 1, p. 24-42, jan./abr. 2019.

CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Revista Estudos Avançados**, v. 28, n. 82, 2014

CARVALHO, F. S.; MACHADO, C. A. S.; QUINTANILHA, J. A. Ensino de técnica de estatística multivariada para alunos de cursos de Engenharia. **Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico (EDUCITEC)**, v. 6, e133420, 2020.

CARVALHO, O. **As secas e seus impactos**. Em Brasil, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, A questão da água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Agência Nacional de Águas. Brasília: CGEE, 2012

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas, Critérios de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos e Indicador de Controle de Fontes**. 2022. Disponível em: <https://CETESB.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2023/11/Apendice-D-Metodologia-de-Calculo-dos-Indices-de-Qualidade-das-Aguas-2022.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000**. Estabelece os parâmetros ambientais de qualidade das águas para o controle da poluição hídrica no Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, 30 nov. 2000. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2000/res_conama_274_2000_parametrosambientaisqualidadedasaguas.pdf. Acesso em: 03 dez. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Estabelece a classificação das águas doces, salgadas e mistas do território nacional, as condições e os padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 15 nov. 2024.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2006.

DUARTE, R. S. Dois modelos para a convivência do produtor rural com o ambiente do semiárido nordestino. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 33, n. 1, jan./mar. 2002.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª edição. Interciência: Rio de Janeiro – RJ. 1998.

GALVÍNCIO, J. D. Estimativa da temperatura da superfície com imagens obtidas com drones. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 397-406, 2019.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2011.

HEIPKE, C. A review of the state-of-art for topographic application: digital photogrammetric workstations. **GIM Int.** v. 15, n. 3, 2001.

IBGE. **Mossoró: Panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>. Acesso em: 29 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL - IBAM. **Caderno de estudo: Introdução à Geotecnologias**. Rio de Janeiro: IBAM, 2015. 64 p.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. The Sixth Assessment Report: The numbers behind the science**. Geneva, Switzerland, 2022.

IRGANG, B. E.; GASTAL JR., C. V. S. **Macrófitas aquáticas da planície costeira do RS**. Porto Alegre: CPG-Botânica/UFRGS, 1996. 290 p.

IVUSHKIN, K. BARTHOLOMEUS, H.; BREGT, A. K.; PULATOV, A.; FRANCESCHINI, M. H. D.; KRAMER, H.; LOO, E. N.; ROMAN, V. J.; FINKERS, R. UAV based soil salinity assessment of cropland. **Geoderma**, v. 338, p. 502-512, 2019.

KLASŃJA-MILIĆEVIĆ, A.; IVANOVIĆ, M.; BUDIMAC, Z. Data science in education: Big data and learning analytics. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 25, p. 1066–1078, 2017. DOI <https://doi.org/10.1002/cae.21844>.

LIMA, A. E. F.; SILVA, D. R. da; SAMPAIO, J. L. F. As tecnologias sociais como estratégia de convivência com a escassez de água no semiárido cearense. **Conexões: Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 5, n. 3, p. 9-21, nov. 2011.

LOBATO, T. C. HAUSER-DAVIS, R. A.; OLIVEIRA, T. F.; SILVEIRA, A. M. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 674–683, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. D.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 308-322, 2009.

LUCENA, C. Y. S.; SOUZA, J. J. L. de L.; SILVA, B. Q.; REIS, J. S.; LUCENA, R. L. A Serra de Santana no semiárido nordestino: aspectos geográficos e possibilidade de práticas sustentáveis. **Revista Geográfica de América Central**, nº 70(1), p. 17, jan./jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.17>.

LUZ, G.; GALVINCIO, J. D. B. Balanço hídrico superficial da bacia hidrográfica do riacho Milagres-PE, utilizando o SUPeR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 02, p. 1094-1107, 2022.

MATOS, A. S.; SILVA JÚNIOR, N. F.; MEDEIROS, M. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, C. I.; GOULART, S. M. Caracterização da qualidade da água dos afluentes do Córrego Trindade em Itumbiara-GO. **Ifes Ciência**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2023. DOI: 10.36524/ric.v9i1.1798. ISSN 2359-4799.

MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUÍÑONES, F. R.; LAVARDA, F. L.; COLOMBO, A.; BORBA, C. E.; LEICHTWEIS, W. A.; MORA, N. D. Remoção dos metais pesados Cd(II), Cu(II) e Zn(II) pelo processo de biossorção utilizando a macrófita *Eichhornia crassipes*. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 66, n. 3, p. 355-362, jul./set. 2013.

MÓDENES, A. N.; PIETROBELLI, J. M. T. de A.; QUIÑONES, F. R. E.; SUZAKI, P. Y. R.; ALFLEN, V. L.; KLEN, M. R. da S. F. Potencial de biofixação do zinco pela macrófita *Egeria densa*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 465-470, out./dez. 2009.

NÓBREGA, R. S. **Modelagem de impactos do desmatamento nos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Jamari (RO) utilizando dados de superfície e do TRMM**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, 2008.

NOVAIS, R. P.; JUNIOR, A. P. C.; OLIVEIRA, M. A. A perenização de rios pela construção de açudes para o combate à seca no semiárido nordestino. **Geopauta**, Vitória da Conquista, v. 6, 2022, e9401. ISSN 2594-5033.

OCHUNGO, E.; OUMA, G.; OBIERO, J.; ODERO, N. Water quality index for assessment of potability of groundwater resource in Langata Sub County, Nairobi-Kenya. **American Journal of Water Resources**, v. 7, p. 62–75, 2019.

OLIVEIRA, A.; FACHADA, N.; MATOS-CARVALHO, J. P. Data Science for Geographic Information Systems. **IEEE Xplore**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/YEF-ECE62614.2024.10624902>.

OLIVEIRA, D. V.; MATERANO, L. S.; BRITO, J. L. S. Estimativa de índice de qualidade ambiental da cidade de Uberlândia por meio de imagens de satélite. **Revista Cerrados**, v. 16, n. 1, p. 59-74, 2018.

OLIVEIRA, M. F. de; PIRES, L. A. Modelagem matemática na avaliação de impacto ambiental: abordagem metodológica no ensino de cálculo em um curso de engenharia. **Educação Matemática em Revista**, Brasília, v. 25, n. 69, p. 4-13, out./dez. 2020. ISSN 2317-904X.

OLIVEIRA, M. K. T.; MACEDO, R. C. B. S.; REBOUÇAS, C. K. O.; SILVA, K. C. N. Ação antrópica na erosão de solo em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro. **HOLOS**, ano 39, v. 8, e16838, 2023. Doi: <https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2024.50.e868>

PASSOS, E. C. S.; PREISSER, G. B.; REBIOTA, M. S.; MATTOS, E. V. Caracterização de um Sistema Convectivo de Mesoescala por meio de Sistema de Informações Geográficas. **Terrae Didática**, Campinas – SP, v. 15, p. 1-10, 2019.

PASTRO, M. S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, F. R.; FERRAZ, F. T. Estatística multivariada aplicada à análise de qualidade da água em diferentes ambientes de microbacias hidrográficas. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 185-191, mar./abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8047>.

PEDRALLI, G. **Macrófitas aquáticas: técnicas e métodos de estudos**. *Estudos de Biologia*, Curitiba, n. 26, p. 1-24, 1990.

PENEIREIRO, J. C.; FERREIRA, D. H. L. A modelagem matemática aplicada às questões ambientais: uma abordagem didática no estudo da precipitação pluviométrica e da vazão de rios. **Millenium**, v. 42, jan./jun. 2012, p. 27-47.

REIDEL, A.; DAMASCENO, S.; ZENATTI, D. C.; SAMPAIO, S. C.; FEIDEN, A.; QUEIROZ, M. M. F. de. Utilização de efluente de frigorífico, tratado com macrófita aquática, no cultivo de tilápia do Nilo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, suplemento, p. 181-185, 2005.

RIBEIRO, A. L. V.; SANTOS, F. S.; SANTOS, A. M. dos; BRANCO, R. F. Contribuição da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* na remoção de nitrogênio amoniacal de efluentes sanitários. **Revista Gestão Sustentável Ambiental**, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 215-234, jul./set. 2019.

RIO GRANDE DO NORTE. **Lei nº 8.089, de 11 de novembro de 2002**. Institui a Política Estadual de Meio Ambiente e estabelece outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 12 nov. 2002. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/leisestaduais/originais/rio_grande_do_norte-rn/2002/ord-8086-2002-rio_grande_do_norte-rn.pdf?X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAI4GGM64DHHZJ3HAA%2F20241204%2Fsa-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20241204T003905Z&X-Amz-Expires=900&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=705ecff0189b931341184dd1b5227f76051661660d83ef67b6aaab11302f550. Acesso em: 03 dez. 2024.

ROBLES, J. L. M.; DOCAMPO, M. L. G.; SANZ, J. O.; RODRÍGUEZ, S. M.; LAGUNAGA, F. G.; SASTRE, L. S.; ORTIZ SANZ, L. Determinação de biomassa em parcelas de culturas arvenses utilizando câmeras ópticas elevadas utilizando veículos aéreos não tripulados (VANT). In: **CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INVESTIGAÇÃO QUALITATIVA – CIAIQ**, 6., 2016, Porto, Portugal. *Anais...* Porto: CIAIQ, 2016. v. 4.

SAMPAIO, H. S. BOURSHCHEIDT, V.; SARRACINI, L. H.; JORGE, L. A. C.; BETTIOL, G. M.; BERNARDI, A. C. C. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 14, p. 111-124, 2020.

SÁNCHEZ, E.; COLMENAREJO, M. F.; VICENTE, J.; RUBIO, A.; GARCÍA, M. G.; TRAVIESO, L.; BORJA, R. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. **Ecological Indicators**, v. 7, p. 315–328, 2007.

SANTOS, C. L.; XAVIER, M. R. R.; CORREA, D. L.; PEREIRA JUNIOR, A. Aplicação do índice de qualidade da água no rio Ipixuna e avaliação das condições de balneabilidade com a percepção ambiental dos usuários. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 1-20, abr. 2021.

SANTOS, D. M.; LIMA, L. O. J.; MENEZES, W. D. S.; TUPY, G. S.; OLIVEIRA, J. E. S.; OTONI, R. B.; LUCAS, A. A. T. Índices de qualidade de água adaptados aos recursos hídricos no Brasil. **Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2021. ISSN 2318-0358.

SANTOS, F. A.; MENDES, L. M. S.; CRUZ, M. L. B. Abordagem multivariada dos dados populacionais da sub-bacia hidrográfica do rio Piracuruca. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 41, n. 1, 2024. ISSN 0104-5490.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 01-19, set./dez. 2009.

SEBRAE. Mossoró. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/mossoro?selector245id=geo2401107>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SHELARE, S. D.; AGLAWE, K. R.; WAGHMARE, S. N. et al. Advances in water sample collections with a drone – A review. **Materials Today: Proceedings**, 2021. Doi <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.327>

SILVA, D. C. Evolução da fotogrametria no Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 3, n. 2, p. 81-96, jul./dez. 2015. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil. ISSN 2317-4285.

SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. Aspectos econômicos, sociais e ambientais da bacia hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró. In: SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. (Orgs.). **A Bacia do Rio Apodi-Mossoró: aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no semiárido do Rio Grande do Norte**. Mossoró: EDUFERSA, 2022. p. 123-135.

SILVA, J. C.; SOARES, E. A.; CORTEZ, S. A. M. Avaliação da qualidade da água em área de preservação permanente pela obtenção do IQA. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 22988-22997, abr. 2022. DOI: 10.34117/bjdvn4-016.

SILVA, J. O. ; HERMES-SILVA, S.; SILVA, F. O.; LOPES, C. A.; ZANIBONI-FILHO, E. Ichthyoplankton distribution in a fragmented river stretch in a semi-arid Brazilian watershed. **Boletim do Instituto de Pesca**, 2024, v. 50, e868. Doi: <https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2024.50.e868>

SILVA, M. A.; FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, A. H.; LIMA, G. C.; CURI, N. Sistema de informações geográficas no planejamento de uso do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 2, p. 316-323, 2013.

SILVA, M. R. F.; DIAS, N. S.; ARAÚJO, D. E. P.; ALMEIDA, R. D. A importância da gestão de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro: um olhar para a bacia do rio Apodi-Mossoró (RN). **Revista Territorium Terram**, v. 7, n. 11, p. 102-119, 2024.

SOUZA, A. C. M.; SILVA, M. R. F.; DIAS, N. S. Gestão de recursos hídricos: o caso da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró (RN). **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 280-296, 2012.

SOUZA, M. P.; CAVALCANTI, R. C.; OLIVEIRA, K. J.; COSTA, M. M. L.; JUNIOR, O. C.; SILVA, S. M.; CARVALHO, K. S.; VIEIRA, R. B. F.; SILVA, F. G. Avanços e aplicações de drones na gestão de recursos naturais e monitoramento ambiental no semiárido brasileiro. **Revista de Gestão e Secretariado – GeSec**, v. 15, n. 7, p. 1-18, 2024. DOI: <http://doi.org/10.7769/gesec.v15i7.4030>.

SOUZA, N. N.; AMARAL, L. G.; CHIARELOTTO, M.; FUENTES, T. G.; SANTOS, M. A. Análise hidroambiental de nascentes utilizadas para abastecimento humano na zona rural do

município de Baianópolis (Bahia). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 3, p. 202-224, 2022.

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Delimitação do semiárido: relatório final. **Recife**: 2021. 272 p.

TIBÚRCIO, I. M.; SILVEIRA, N. T.; SANTOS, T. O.; MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D. Balanço hídrico e mudanças climáticas no semiárido pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1657-1670, 2023.

TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C. da; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. **Fotogrametria: aplicações a curta distância**. In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Orgs.). *FTC 40 anos, Perfil Científico-Educacional*. Presidente Prudente, SP, 1999. p. 147-159.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 668 p.

TYAGI, S.; DOBHAL, R.; KIMOTHI, P. C.; ADLAKHA, L. K.; SINGH, P.; UNİYAL, D. P. Studies of river water quality using River Bank filtration in Uttarakhand, India. **Water Quality Exposure Health**, v. 5, p. 139–148, 2013.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 215 p. (Monografia - Especialização) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2005.

VILLAR, F. A.; CANDELARIO, S.; DÍAZ, J. Drones, fotogrametría y sistemas de información geográfica. Algunos aportes a la arqueología de contextos industriales. **COMECHINGONIA. Revista de Arqueología**, v. 27, n. 1, 2023.

XAVIER, J. O.; CAMPOS, M. C. S.; RIBEIRO, S. T. M.; MOTA, H. R. **Macrófitas aquáticas: caracterização e importância em reservatórios hidrelétricos**. Belo Horizonte: Cemig, 2021. 96 p.: il. fot. ISBN 978-85-87929-85-3.

3 ARTIGO 1: QUALIDADE DA ÁGUA DE UM TRECHO URBANO DO RIO APODI-MOSSORÓ POR MEIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

RESUMO

As bacias hidrográficas localizadas no semiárido geralmente são caracterizadas por serem pouco volumosas, apresentarem elevada evaporação, baixo índice de recarga, muito por causa da sazonalidade e reduzido nível de chuvas. A bacia do Rio Apodi-Mossoró está situada na região semiárida, o que faz com que a gestão de recursos hídricos seja essencial. O monitoramento da qualidade dos corpos d'água da bacia é atividade importante no gerenciamento de recursos hídricos, direcionando nas tomadas de decisões sobre seus diversos usos. O Índice de Qualidade de Água - IQA é uma metodologia importante para delimitar a qualidade de um corpo d'água. Sendo assim, esse artigo objetivou materializar a pesquisa realizada em trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró, na cidade de Mossoró-RN. Na execução do estudo, foram coletadas amostras de água que perpassa a região central da cidade, uma vez por mês, ao longo de 15 meses, entre julho de 2022 e novembro de 2023. Foram determinados em laboratório, todos os 9 parâmetros do IQA e calculado o índice usando a metodologia elaborada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, e a partir dessas informações, foi aplicada metodologia de estatística multivariadas, com a técnica de Análise de Componentes Principais - ACP, com auxílio do software Statistica 14, para definir os parâmetros que mais influenciam da formação desse índice, apontando o comportamento do trecho em estudo. A ACP apontou que os parâmetros que mais influenciaram no período de estudo foram o pH, sólidos totais e coliformes termotolerantes.

Palavras-chaves: análise ACP, carga poluidora, IQA, monitoramento de bacias

WATER QUALITY BEHAVIOR IN AN URBAN STRETCH OF THE APODI-MOSSORÓ RIVER THROUGH MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS

ABSTRACT

Watersheds located in semi-arid regions are generally characterized by low water volumes, high evaporation rates, and low recharge indices, mainly due to rainfall seasonality and limited precipitation. The Apodi-Mossoró River Basin is situated in a semi-arid area, making water resources management essential. Monitoring the quality of the basin's water bodies is a crucial activity in water resource management, guiding decision-making regarding their various uses. The Water Quality Index (WQI) is an important methodology for assessing the quality of a water body. Accordingly, this study aimed to present the results of research conducted in an urban stretch of the Apodi-Mossoró River, within the city of Mossoró-RN. For the execution of this study, water samples were collected monthly over a 15-month period—from July 2022 to November 2023—in the central region of the city. All nine parameters of the WQI were analyzed in the laboratory, and the index was calculated using the methodology developed by the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB). Based on these results, a multivariate statistical analysis was applied using the Principal Component Analysis (PCA) technique, with the aid of Statistica 14 software, to identify the parameters that most influenced the index, characterizing the behavior of the studied river segment. The PCA indicated that the most influential parameters during the study period were pH, total solids, and thermotolerant coliforms..

Keywords: PCA analysis. Pollutant load. WQI. Watershed monitoring.

1. INTRODUÇÃO

A água potável é um recurso natural que, gradativamente, vem se tornando mais escasso. Muito desse fato se deve a atividade antrópica, que acarreta impactos negativos ao meio ambiente e aos corpos hídricos, degradando a qualidade das águas.

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural de águas oriundas da chuva, que provocam escoamento superficial, convergindo-os a um único ponto de saída (exutório), e pode ser considerada uma unidade básica para estudos ecológicos e econômicos, portanto, tornando-se prioritária na gestão de recursos hídricos (LIMA, 2008; SILVEIRA, 2015; LOPES et al., 2020).

Os avanços das mudanças climáticas atingem mais intensamente as regiões semiáridas, pois, o aumento de 1,1°C na temperatura global interfere no padrão de precipitação, e o manejo e preservação de bacias hidrográficas, por meio de gestão eficiente, se torna tema relevante para conservação dos diversos usos dos corpos d'água (TIBURCIO, 2023; IPCC, 2022; GALVÍNCIO, 2019; SOUZA; SILVA; DIAS, 2012).

A bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, tem grande destaque no Rio Grande do Norte - RN, sendo a segunda maior bacia do estado, abrangendo uma área de 14.276 km², o que equivale a 26,8% do território estadual. Suas águas são destinadas, prioritariamente, para abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação. Além disso, atravessa a cidade de Mossoró, com uma área de drenagem de 9.571 km² (SILVA; CAMARGO, 2022).

O município de Mossoró é o segundo maior do RN, considerado a capital da Região Oeste, sendo classificado, segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, como Capital Regional C, com população estimada, pelo censo 2022, de 278.034 mil habitantes. A economia tem seu maior ramo o setor de serviços, com concentração em atividade de comércio varejista, de alimentação e de reparo de veículos (IBGE, 2024; SEBRAE, 2024).

Na gestão de recursos hídricos, a atividade de monitoramento da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, está a tomada de decisão (VALE, 2020). Nesse cenário, o Índice de Qualidade de Água – IQA é um recurso muito utilizado para determinar a qualidade do corpo d'água. O IQA é uma metodologia consolidada, baseada em parâmetros padronizados para avaliar e determinar a qualidade da água, especialmente a superficial, adotada pela Agência Nacional de Águas – ANA como principal recurso para avaliação da qualidade da água para abastecimento (OCHUNGO et al., 2019; ANA, 2024).

A análise estatística é um mecanismo amplamente utilizado em estudos ambientais, como também, especificamente, na área de recursos hídricos.

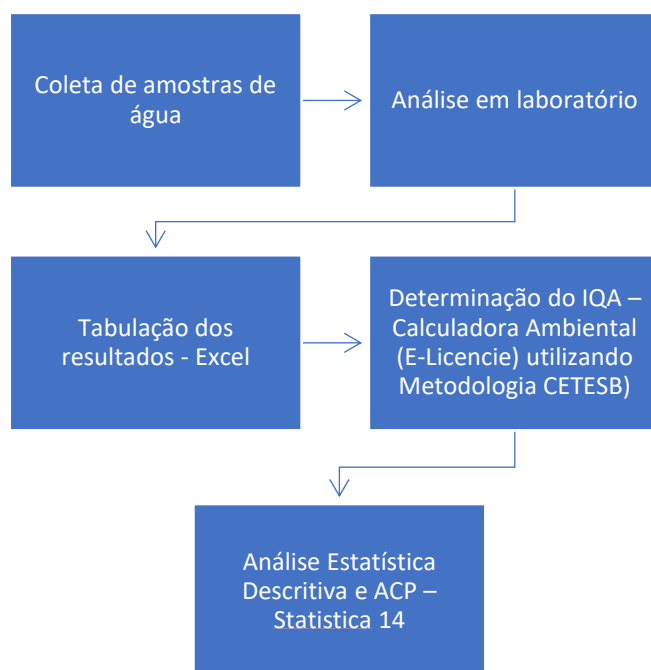
A técnica de Análise de Componentes Principais (ACP) possibilita o agrupamento de amostras e a identificação de grupos similares, permitindo sua distinção e interpretação de forma independente, e reduzindo muitas variáveis originais correlacionadas para um conjunto menor de variáveis novas e não correlacionadas. Essa redução diminui o número de análises em laboratório, levando à economia de recursos na atividade de monitoramento da qualidade de água (GOTELLI; ELLISON, 2011; PASTRO et al., 2020).

Considerando o exposto, a pesquisa teve por objetivo, fazer uso da técnica ACP para determinar os parâmetros do IQA que tem maior preponderância dentro do cálculo, dentre os 9 que o constitui, para um trecho urbano em clima semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODO

O presente estudo foi desenvolvido em campo e em laboratório, com a obtenção de amostra de água da área de estudo e análise dos parâmetros do IQA. Em seguida, com a utilização de software, foi executado a análise estatística. A sequência de atividades é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Sequência de atividades executadas na pesquisa.



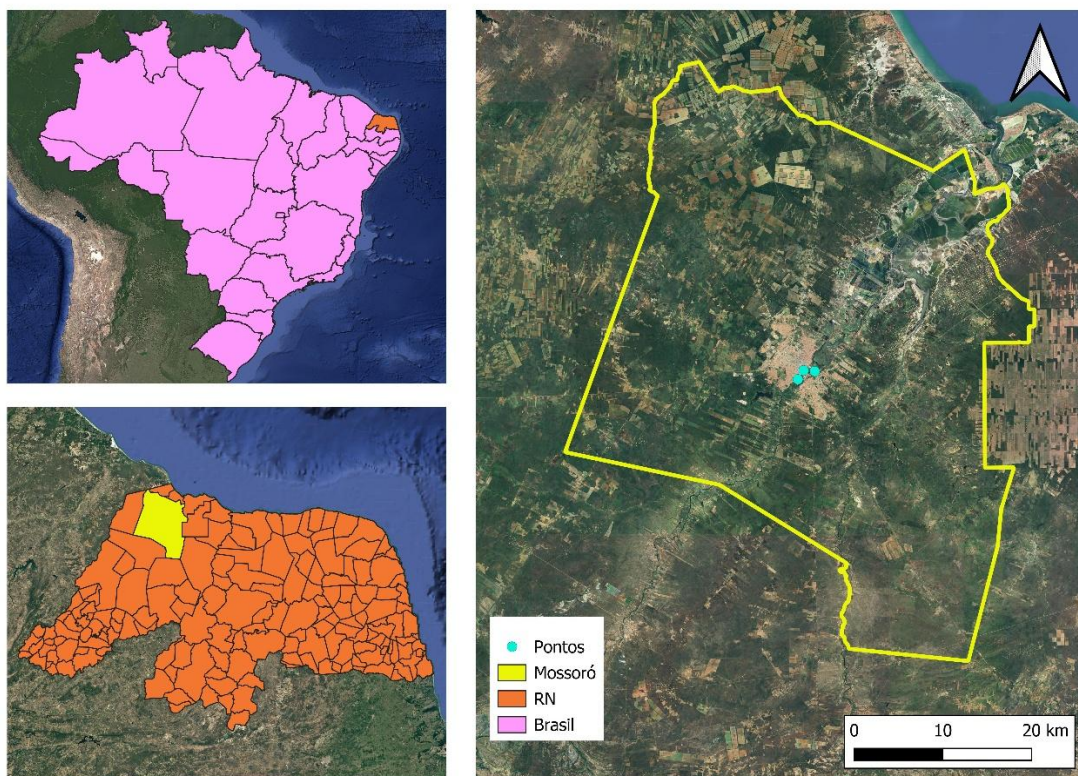
Fonte: Autoria Própria (2025)

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no centro da cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil, dentro da bacia do rio Apodi-Mossoró. A região está inserida no clima semiárido, caracterizado por altas temperaturas e segundo a classificação de Koppen, o clima é quente do tipo BSw^h, com uma estação chuvosa e outra seca, com médias de precipitação entre 550 e 800mm por ano, em que essa precipitação é concentrada entre os meses de março e abril (BEZERRA et al., 2013; ROCHA et al., 2009). A temperatura média da região é de 27,6°C, com radiação solar diária média mensal variando entre 4900 a 6398 Wh.m². No período seco, compreendido entre setembro e novembro, a velocidade média diária dos ventos é de 5m s⁻¹. O relevo na bacia apresenta declividade predominantemente plana, com vazão

média de longa duração na cidade de Mossoró de 17,6 m³/s (LEMOS FILHO; SOBRINHO; OLIVEIRA JUNIOR, 2022). A região faz parte do Nordeste brasileiro, conforme mostrado na Figura 6:

Figura 6: Mapa de localização do município de Mossoró – RN, Brasil, mostrando os pontos de coleta.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os pontos do rio que foram selecionados para coleta de amostras de água são de um trecho de intensa atividade antrópica, que perpassa o centro da cidade. Estão localizados, especificamente, nas pontes da Avenida Abel Coelho (P3), no bairro Alto da Conceição, e na ponte da Avenida Jerônimo Dix-Neuf Rosado (P1), no bairro Paredões, como também na barragem localizada no centro (P2), apresentados na Figura 7 e na Tabela 1:

Figura 7: Localização dos pontos de coletas de amostra de água do trecho urbano do rio Apodi-Mossoró, em Mossoró – RN.



Fonte: Google Earth (2025)

Tabela 1: Especificação dos pontos de coleta de amostra de água de trecho urbano do rio Apodi-Mossoró em Mossoró-RN.

Ponto	Localização	Coordenadas Geográficas	
		Latitude	Longitude
P1	Ponte Av. Avenida Jerônimo Dix-Neuf Rosado	5°11'44.58"Sul	37°19'44.69"Oeste
P2	Barragem do Centro	5°11'41.51"Sul	37°20'25.28"Oeste
P3	Ponte Av. Coelho Neto	5°12'13.7"Sul	37°20'46.3"Oeste

Fonte: Autoria Própria (2025)

A sequência de pontos se deu pela rota programada para coleta das amostras.

2.2 Período de coleta e dados do estudo

A pesquisa se deu no período de julho de 2022 a novembro de 2023. Os dados do período de julho de 2022 a março de 2023 foram obtidos da tese de Silva (2024), em que, no conjunto de 6 pontos de coleta, estão contidos os 3 pontos de coleta desta pesquisa. No período de abril a novembro de 2023, as coletas foram realizadas uma vez ao mês, totalizando 7 coletas em cada ponto.

Os dados de precipitação dos anos de 2022 e 2023 foram obtidos da estação meteorológica Campbell Scientific, localizada no campus central da Universidade Federal rural do Semiárido - UFERSA, Campus Central em Mossoró-RN. Os dados históricos mensais de precipitação foram calculados a partir de informações disponíveis na Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN - EMPARN. A série histórica foi calculada do período de 1964 a 2021.

2.3 Determinação de Índice de Qualidade de Água – IQA

Os parâmetros do IQA foram determinados no Laboratórios de Saneamento (LASAN), no Laboratório de Análise de Solo Água e Planta (LASAP), e no Laboratório de Inspeção de Produtos de Origem Animal (LIPOA), todos localizados no Campus Central da UFERSA, na cidade de Mossoró. A metodologia utilizada para determinar cada indicador é resumida no Quadro 5. Os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT), Demanda de Oxigênio Dissolvido (DBO_5) Nitrogênio Total (N), Fósforo Total (P) e Sólidos Totais (ST) foram determinados pelo Standard Methods for Examination of Water and Wastewater em triplicata, e foram utilizados os valores médios.

Quadro 5: Resumo de metodologias utilizadas para determinar os indicadores de IQA.

Indicador	Metodologia/Utensílio	Laboratório/Local
Oxigênio Dissolvido	Sonda Multiparâmetros	In loco
Coliformes Termotolerantes	Tubos múltiplos	LIPOA
pH	Medidor de pH de bancada (pHMETRO)	LASAN
DBO ₅	Demanda consumida no 5º dia	LASAN
Nitrogênio Total	NTK Titulométrico com destilação preliminar	LASAP
Fósforo Total	Método do ácido ascórbico com digestão preliminar com método do persulfato	LASAN
Turbidez	Nefelométrico com Turbidímetro	LASAN
Sólidos Totais	Em estufa a 105°C	LASAN
Temperatura	Sonda Multiparâmetros	In loco

Fonte: Autoria Própria (2025)

A definição do IQA seguiu a metodologia elaborada pela CETESB, que consta no apêndice D disponibilizados no acervo da instituição, como descrito a seguir.

Para determinação do IQA são ponderados 9 parâmetros, de acordo com apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Variáveis que compõem o IQA adaptado pela metodologia da CETESB

Nº	Indicador	Unidade
1	Oxigênio Dissolvido	%saturação'
2	Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml
3	pH	-
4	DBO ₅	mg O ₂ /L
5	Nitrogênio Total	mg /L
6	Fósforo total	mg /L
7	Turbidez	uT
8	Sólidos Totais	mg /L
9	Temperatura de desvio	°C

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

O IQA é calculado pelo produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que integram o Índice (CETESB, 2022):

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Em que:

IQA = índice de qualidade da água, representado por um número em escala contínua de 0 a 100.

q_i = qualidade individual (sub-índice de qualidade) do i ésimo parâmetro, um valor entre 0 e 100.

w_i = peso unitário do i ésimo parâmetro.

O IQA é categorizado como apresentado na tabela 3:

Tabela 3: Categorização da qualidade da água segundo IQA.

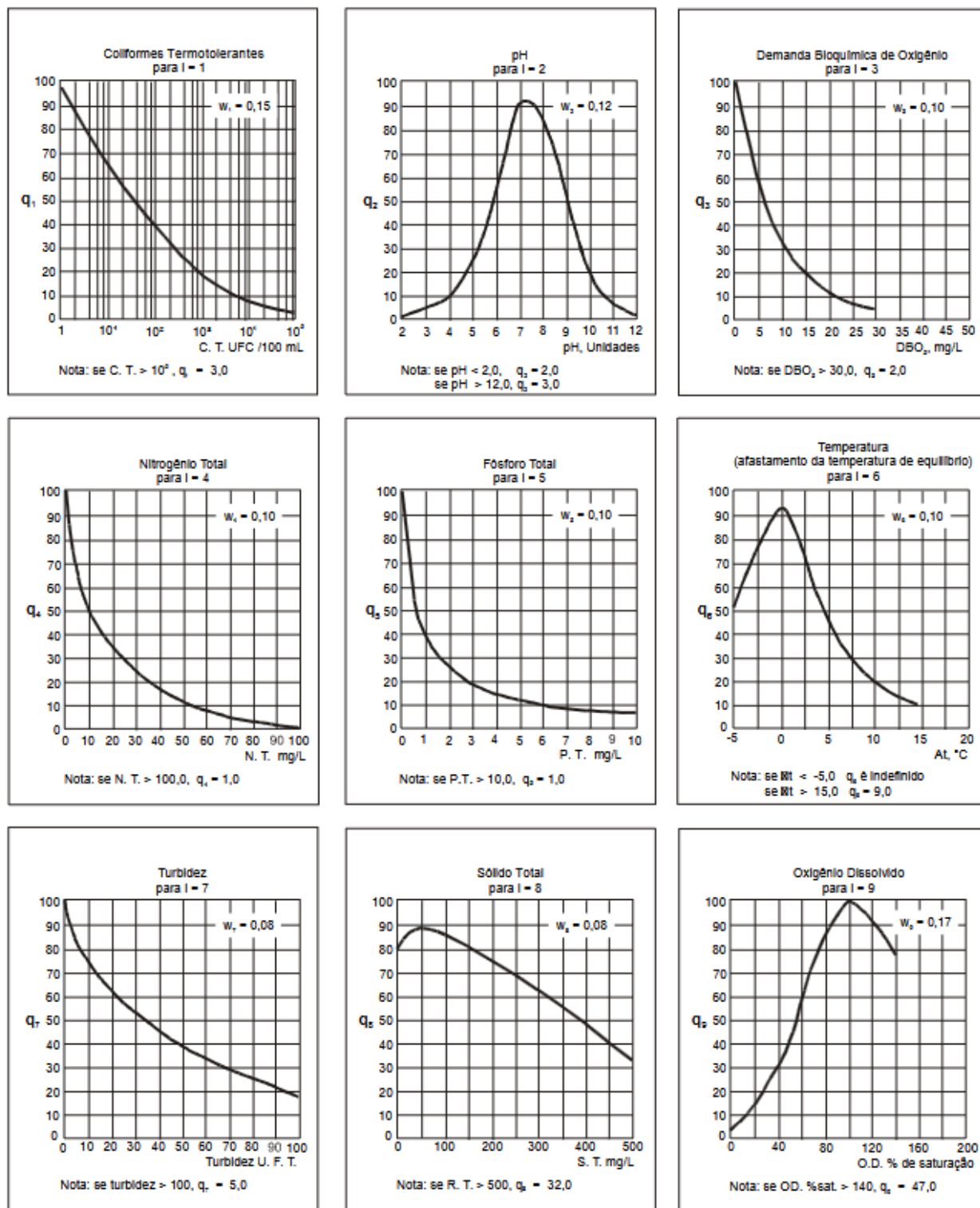
Classificação do corpo d'água	
IQA	Categoria
$79 < IQA \leq 100$	Ótima
$51 < IQA \leq 79$	Boa
$36 < IQA \leq 51$	Regular
$19 < IQA \leq 36$	Ruim
$IQA \leq 19$	Péssima

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

Para efetivação do cálculo do IQA se faz necessário encontrar o item q_i que consta na fórmula. Esse item é encontrado nos gráficos de Curvas Médias referente a cada parâmetro, que é apresentado na Figura 8:

Para execução dos cálculos do IQA foi usado a ferramenta online gratuita Calculadora Ambiental, da empresa E-licencie (E-LICENCIE, 2024).

Figura 8: Curvas Médias de variação da Qualidade das Águas



Fonte: CETESB (2022).

2.4 Análise estatística

Com os valores dos parâmetros de IQA calculados e organizados em tabela de Excel, os dados foram transpostos para o software e executadas a análise descritiva, apresentando os valores de médias, medianas, moda, valores mínimos e máximos e desvio padrão, como também a análise multivariada do tipo Análise de Componentes Principais – ACP.

As análises foram realizadas com o auxílio do software Statistica 14.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Índice de Qualidade de Água - IQA do trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró

Os resultados do IQA do período de julho de 2022 a novembro de 2023, para os pontos analisados oscilaram entre ÓTIMA, nos meses agosto e outubro de 2022 e junho de 2023, e RUIM, concentrados no período entre os meses de dezembro de 2022 a fevereiro de 2023 no P2 (Barragem Centro), como resumidos no Quadro 6.

Quadro 6: Resumo dos resultados de IQA do trecho analisado para o período de estudo.

IQA						
DATA DE COLETA	P1	P2	P3	P1	P2	P3
jul/22	39,294	43,04	57,381	Regular	Regular	Boa
ago/22	99,77	91,959	100	Ótima	Ótima	Ótima
set/22	41,241	39,276	55,417	Regular	Regular	Boa
out/22	81,54	85,542	100	Ótima	Ótima	Ótima
dez/22	37,478	32,48	49,226	Regular	Ruim	Regular
jan/23	41,254	35,241	43,717	Regular	Ruim	Regular
fev/23	39,646	31,654	43,105	Regular	Ruim	Regular
mar/23	51,189	46,28	43,867	Boa	Regular	Regular
abr/23	49,995	41,552	57,223	Regular	Regular	Boa
jun/23	80,678	84,493	85,5	Ótima	Ótima	Ótima
jul/23	62,51	39,767	58,806	Boa	Regular	Boa
ago/23	51,661	38,908	49,968	Boa	Regular	Regular
set/23	54,211	40,103	45,652	Boa	Regular	Regular
out/23	43,067	51,964	54,701	Regular	Boa	Boa
nov/23	44,595	46,532	52,64	Regular	Regular	Boa

Fonte: Autoria Própria (2025)

A maior frequência dos resultados estão classificados entre BOA e REGULAR. Analisando mais atentamente, é notório que, alguns resultados classificadas como BOA, estão no limiar inferior da classificação, ou seja, para ser classificada como BOA o resultado tem de ser superior a 51, e, para ser classificada como REGULAR o resultado tem de ser inferior ou igual a 51, como apresentado na Tabela 3. Esses resultados limiares aparecem no P1 nos meses de março, agosto e setembro de 2023, e no P2 no mês de outubro de 2023, isso indica que havia a probabilidade de ser classificados como REGULAR.

Esmiuçando a análise em cada ponto de coleta, é evidente que no ponto da Avenida Jerônimo Dix-Neuf Rosado, mais conhecida por Leste- Oeste (P1), a qualidade da água é majoritariamente classificada como REGULAR. Esse é localizado a jusante da barragem do centro da cidade cerca de 1,45km, de fluxo perene e contínuo.

O ponto localizado na Barragem do Centro (P2) é o ponto de maior variabilidade de qualidade da água, oscilando entre ÓTIMA e RUIM, tendo classificação majoritária como REGULAR. Esse ponto é situado a montante do barramento, em que no período seco, a água pode se encontrar parada, que, quando acumulado com o descarte de esgoto no rio, favorecem a degradação da água, consequentemente os parâmetros apresentam-se insatisfatórios.

Quanto ao ponto posicionado no ponto de Avenida Coelho Neto (P3), a qualidade da água varia entre ÓTIMA e REGULAR, apresentado qualidade da água majoritariamente BOA, considerando que a maior parte dos valores transita entre BOA e ÓTIMA. Esse ponto é situado a jusante da Barragem de Genésio, cerca de 2,8km, de fluxo perene e contínuo, condição que favorece o poder de depuração do rio, fato que pode contribuir para melhores resultados dos parâmetros do IQA.

Tratando dos meses de agosto e outubro de 2022 e junho de 2023, classificada como ÓTIMA, esse fato se deu devido à ausência de Coliformes Termotolerantes nas análises em laboratório. Quando atribuído o valor zero na equação do IQA, automaticamente, o valor de IQA obtido é alto, acima de 80, mas outras variáveis apresentam-se ruins, como mostrado no Quadro 7:

Quadro 7: Valores das variáveis¹ analisadas do IQA das amostras de água para o período estudado.

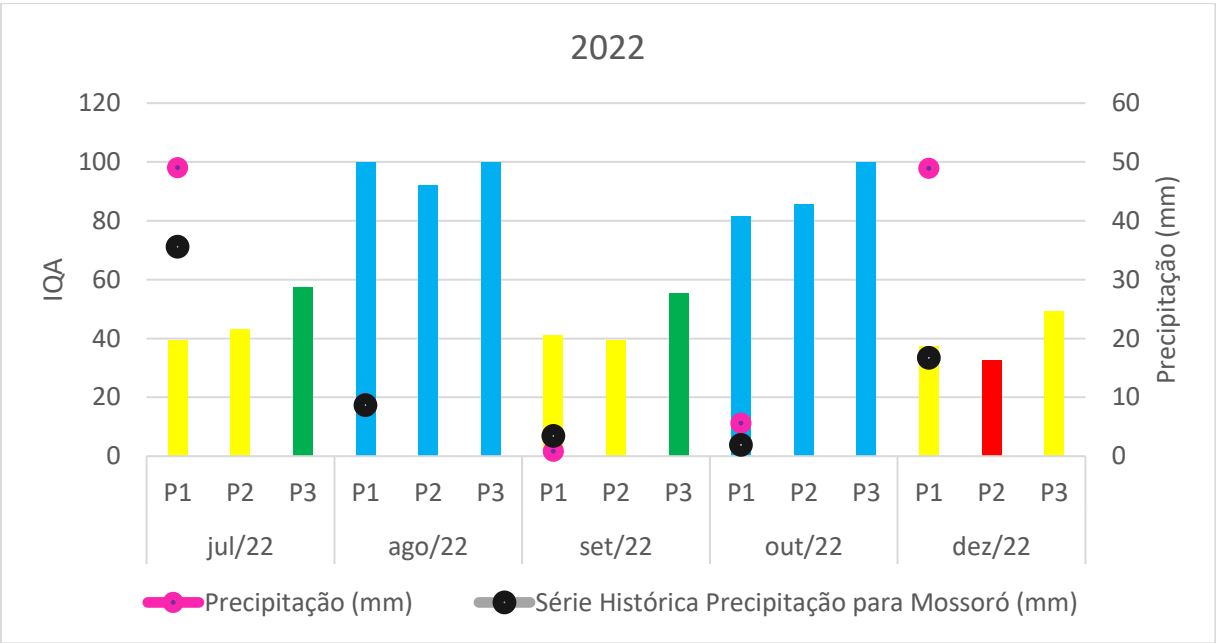
IQA											
Datas de coleta	Pontos Coleta	Variáveis									
		C°	pH	OD %	DBO	CT	N	P	ST	Turb	VALOR IQA
jul/22	P1	28	7,5	58,42	5	4600	5,873	0,01	846,5	66,2	39,294
	P2	28	7,5	29,61	2	930	4,562	0,01	830	3,01	43,04
	P3	29	7,8	101,84	3	72	10,667	0,01	846	4,58	57,381
ago/22	P1	28	7,4	50,92	4	0	1,456	0,05	956,5	28,4	99,77
	P2	28	7,3	21,45	1	0	2,427	0,02	1042,5	3,21	91,959
	P3	28	7,7	77,37	4	0	2,33	0,03	1049	6,98	100
set/22	P1	28	7,4	21,18	5	290	0,4368	0,05	1073,5	5,35	41,241
	P2	28	7,4	43,42	13	2100	4,659	0,01	1055,5	9,64	39,276
	P3	30	7,8	69,08	2	92	6,261	0,02	978,5	5,94	55,417
out/22	P1	29	7,5	25,53	7	0	2,588	0,02	1263	3,55	81,54
	P2	28	7,4	37,76	8	0	3,883	0,014	1033	8,09	85,542
	P3	29	8,3	115,66	6	0	6,423	0,05	1127,67	6,68	100
dez/22	P1	29	7,9	20,00	3	1500	5,242	0,02	1554,5	3,51	37,478
	P2	29	7,9	37,76	11	11000	3,883	0,08	1396,5	3,91	32,48
	P3	29	8,7	105,53	6	92	9,61	0,19	1270,5	12,3	49,226
jan/23	P1	29	7,9	21,97	5	150	2,475	0,03	1488	3,78	41,254
	P2	28	8,0	39,47	4	11000	7,959	0,01	766	4,77	35,241
	P3	30	8,5	80,00	16	92	7,717	0,18	1243	28,6	43,717
fev/23	P1	30	7,8	11,58	3	150	0,971	0,04	1283,3	2,61	39,646
	P2	30	7,6	4,21	4	1100	1,747	0,15	592,67	8,99	31,654
	P3	33	9,3	120,39	10	230	11,891	0,2	1129	9,35	43,105
mar/23	P1	30	8,0	65,79	3	230	2,896	0,04	341	48,7	51,189
	P2	30	8,0	72,76	3	2400	4,53	0,11	299	45	46,28
	P3	31	8,0	57,37	2	1500	9,739	0,11	320	49,3	43,867
abr/23	P1	31	8,1	65,13	4	1500	1,9	0,06	302,667	12,6	49,995
	P2	31	7,9	64,87	4	11000	2,8	0,06	322,333	10,5	41,552
	P3	31	8,0	80,26	3	36	3	0,03	613,667	12,1	57,223
jun/23	P1	29	8,1	91	6	0	3,9	0,09	695	58	80,678
	P2	29	8,0	66	7	0	6,7	0,11	313,333	7,19	84,493
	P3	30	8,1	77,3	7	0	3,1	0,05	576,333	11,6	85,5
jul/23	P1	28	7,1	104,8	1	36	1,7	0,06	795,667	4,55	62,51
	P2	28	7,8	58,6	5	4600	5,7	0,63	875,667	5,56	39,767
	P3	29	7,9	92,4	2	230	1,9	0,03	877,667	3,91	58,806
ago/23	P1	29	7,6	61	5	74	3	0,05	1029,33	11	51,661
	P2	28	7,5	32	6	750	4,3	0,29	1966,33	5,58	38,908
	P3	28	7,8	77,2	3	1500	1,4	0,05	1113	21,1	49,968
set/23	P1	30	7,0	109,1	9	36	2,6	0,07	1259,67	10,4	54,211
	P2	28	7,7	46,8	11	930	4,5	0,45	1130,33	4,33	40,103
	P3	29	8,0	111,1	8	2400	2,6	0,11	1240	17,9	45,652
out/23	P1	30	7,2	31,6	8	1	3,2	0,27	1243,33	23,4	43,067
	P2	29	7,2	83,2	4	230	2,9	0,38	1256,67	7,95	51,964
	P3	30	7,5	106,9	4	36	2,9	0,22	1438,67	19,8	54,701
nov/23	P1	30	7,4	36,5	8	36	2,3	0,06	1487,67	13,2	44,595
	P2	29	7,8	44,9	5	150	2,1	0,23	1465,33	4,94	46,532
	P3	30	8,0	91,7	7	92	3,2	0,07	1638,33	19,1	52,64

Fonte: Autoria Própria (2025).

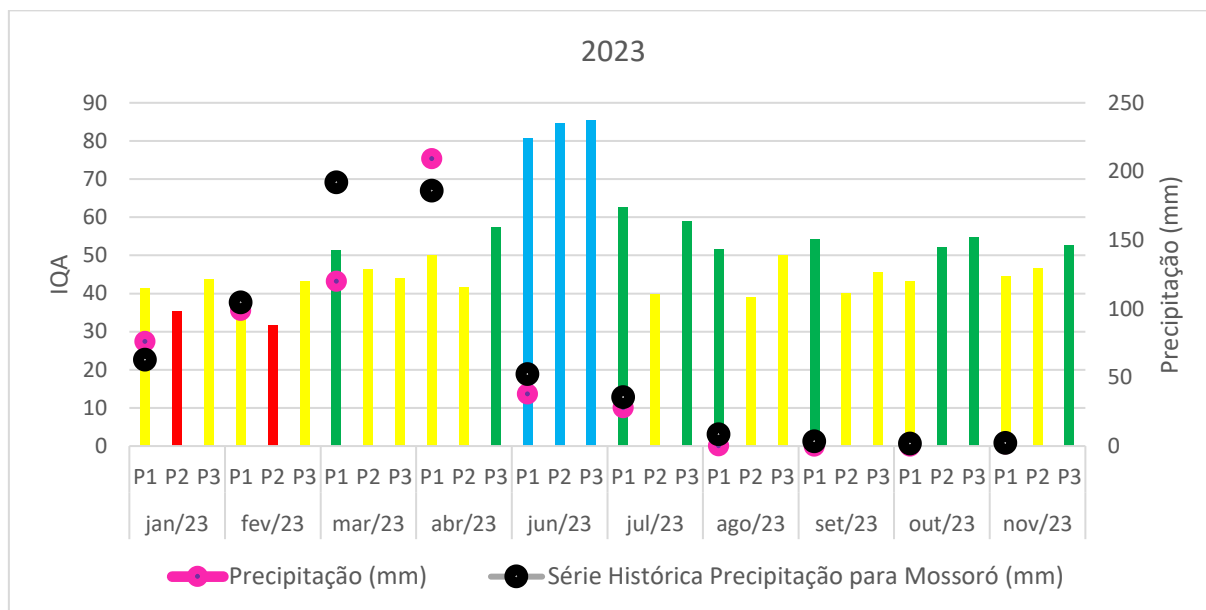
¹ Variáveis: C° - Temperatura; OD% - Oxigênio Dissolvido; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; CT – Coliformes Termotolerantes; N – Nitrogênio; P – Fósforo; ST – Sólidos Totais; Turb – Turbidez.

Correlacionando com a precipitação verifica-se que, quando a precipitação é baixa há a predominância de qualidade REGULAR, principalmente no final do ano de 2023, a exceção é o mês de outubro de 2022, classificada como ÓTIMA, os meses de agosto de 2022 e julho de 2023, também classificadas como ÓTIMA, tiveram uma diferença para outubro de 2022, pois esses meses tiveram um incremento de precipitação em meses anteriores, julho de 2022 e abril de 2023 tiveram precipitação acima da média histórica sendo possivelmente um fator que contribuiu para esse resultado, conforme pode-se observar nos Gráficos 1 e 2:

Gráfico 1: Correlação do IQA com a precipitação para o período de estudo do ano de 2022



Fonte: Autoria Própria (2025)

Gráfico 2: Correlação do IQA com a precipitação para o período de estudo do ano de 2023

Fonte: Autoria Própria (2025)

É notório que o ponto 2 (P2) concentra os piores valores de qualidade de água, principalmente nos meses de dezembro de 2022, janeiro e fevereiro de 2023, em que são classificados como RUIM. Vale ressaltar que esse fato ocorre mesmo com a precipitação do período de estudo com valores aproximados ou superiores aos da série histórica. Uma explicação possível para esse fato é que o P2 é localizado a jusante de um barramento. Tendo essa característica, P2 acumula carga poluidora carregada pela correnteza, proveniente das porções mais altas da bacia, como também de pontos de esgotos existem nas proximidades desse ponto. Essa condição perdura até que o volume de água acumulado ultrapasse a parede da barragem, fato que, dentro do período de pesquisa, ocorreu em 31 de março de 2023, acompanhando o aumento do índice pluviométrico, e, a partir dessa data, a qualidade da água nos 3 pontos tem uma melhora significativa.

Em síntese, o trecho estudado apresenta a qualidade da água REGULAR, para o período da pesquisa, com pior qualidade de água centrado no ponto 2. Fato sustentado pelo surgimento desordenado de macrófitas aquáticas, principalmente no ponto 2, como apresentado na Figura 9.

Figura 9: (A) Visualização aérea do ponto P1 do mês de Agosto de 2023 / (B) do ponto P3 do mês de Agosto de 2023 / (C) do ponto P2 do mês de Agosto de 2023 / (D) Vista in loco das macrófitas no ponto P2 de Agosto de 2022.



(A)



(B)



(C)



(D)

Fonte: Autoria Própria (2025)

Essas condições de qualidade de água são compatíveis com a pesquisa de Vale (2020), que trabalhou com dados fornecidos pelo Programa Água Azul - PAA, em que, os pontos de levantamento localizados na cidade de Mossoró mostram que o trecho urbano da cidade de Mossoró, entre os anos de 2008 e 2016, também era majoritariamente de qualidade REGULAR, como apresentado no Quadro 8:

Quadro 8: Resumo dos resultados de IQA do PAA para o período de 2008 a 2016.

IQA - PAA Mossoró				
DATA DE COLETA	APM 20	APM 21	APM 20	APM 21
nov/08	54,033	41,736	Boa	Regular
set/09	45,836	49,15	Regular	Regular
ago/10	45,836	49,15	Boa	Regular
jun/11	60,162	44	Boa	Regular
dez/11	81,641	47,706	Ótima	Regular
out/12	100	36,569	Ótima	Ruim
out/14	51,343	49,882	Regular	Regular
jul/15	63,478	42,984	Boa	Regular
abr/16	68,326	51,897	Boa	Boa
set/16	30,456	26,95	Ruim	Ruim

Fonte: Adaptado Vale (2020)

Resultados semelhantes aparecem no trabalho de Bezerra et al. (2013), em que a pesquisa se deu também em trecho urbano da bacia do Rio Apodi-Mossoró utilizando a metodologia CETESB, no mês de maio de 2010, em que, dos 3 pontos analisados, 2 deles foram classificados como qualidade REGULAR, e uma classificada como qualidade BOA. Os autores atribuem essa degradação da qualidade da água às atividades antrópicas (BEZERRA et al., 2013).

É observado a mesma tendência na pesquisa de Albuquerque, Praxedes e Oliveira (2017), em que o estudo foi realizado no Rio Salgado no sul do estado do Ceará, ainda dentro do clima semiárido, com determinação do IQA pela metodologia CETESB, entre os anos de 2014 e 2015. Os resultados variaram entre classificações de BOA a RUIM, mas, mesmo com classificação de qualidade BOA em 5 dos 9 pontos analisados, o cálculo do valor médio de IQA mostrou que a qualidade da água, no geral, foi classificada como REGULAR. Os autores conferem essa condição ao despejo de esgoto doméstico sem tratamento e ao desmatamento da mata ciliar em 2 pontos da pesquisa, que foram classificados com qualidade da água RUIM (ALBUQUERQUE; PRAXEDES; OLIVEIRA, 2017).

Tanto esta pesquisa, como as citadas referendam que, a carga poluidora que chega ao curso dos rios interfere negativamente na qualidade da água, traduzidos em classificações IQA REGULAR e, algumas vezes classificados como RUIM. Fato que demonstra que são necessários intervir com medidas mitigadoras desses impactos negativos.

3.2 Análise estatística do resultado de IQA

Aplicada a estatística aos parâmetros especificados no Quadro 6, o resultado foi a estatística descritiva, descrita na Tabela 4.

Tabela 4: Estatística descritiva dos parâmetros do IQA das amostras de água para o período estudado.

Estatística descritiva					
<i>Variáveis</i>	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
C°	29,140	29,000	27,500	32,80	1,064
pH	7,778	7,790	7,010	9,28	0,426
OD %	62,699	64,868	4,211	120,39	31,272
DBO	5,489	5,000	1,000	16,00	3,188
CT	1359,222	150,000	0,000	11000,00	2824,526
N	4,132	3,100	0,437	11,89	2,658
P	0,107	0,060	0,010	0,63	0,129
ST	1009,470	1049,000	299,000	1966,33	395,836
Turb	14,604	8,990	2,610	66,20	15,551

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados mostram que o parâmetro de maior variabilidade foi o parâmetro coliformes termotolerantes (CT), e o de menor variabilidade foi o fósforo (P). Outro parâmetro de destaque é a temperatura, pois também apresenta baixa variabilidade, o que demonstra a baixa amplitude térmica, num intervalo de altas temperaturas. Essa condição em que a água tem uma alta temperatura propicia a floração de cianobactérias e a proliferação de coliformes termotolerantes.

Efetuada a análise multivariada dos parâmetros do IQA, os resultados foram sintetizados na matriz de correlação, com resultados mostrados na Tabela 5, na análise de componentes principais, verificados na Figura 10, finalizando com o gráfico de autovalores da matriz de correlação, apresentado no Gráfico 3.

Tabela 5: Matriz de correlação dos parâmetros analisados do IQA das amostras de água dentro do período de estudo.

Matriz de Correlação									
Correlações marcadas são significativas em $p < ,05000$									
Variáveis	C°	pH	OD %	DBO	CT	N	P	ST	Turb
C°	1,00								
pH	0,51	1,00							
OD %	0,24	0,39	1,00						
DBO	0,05	0,20	0,07	1,00					
CT	0,02	0,07	-0,16	0,06	1,00				
N	0,21	0,59	0,33	0,21	0,12	1,00			
P	0,05	0,03	0,06	0,24	0,00	0,13	1,00		
ST	-0,29	-0,18	-0,11	0,33	-0,19	-0,11	0,19	1,00	
Turb	0,16	0,13	0,19	-0,01	0,00	0,13	-0,07	-0,36	1,00

Fonte: Autoria própria (2025)

A matriz de correlação mostra que as correlações mais significativas são categorizadas como moderadas, de acordo com a classificação de Callegari-Jacques (2003), pois concentram-se no intervalo de $0,3 \leq r < 0,6$, apresentados na coloração em vermelho.

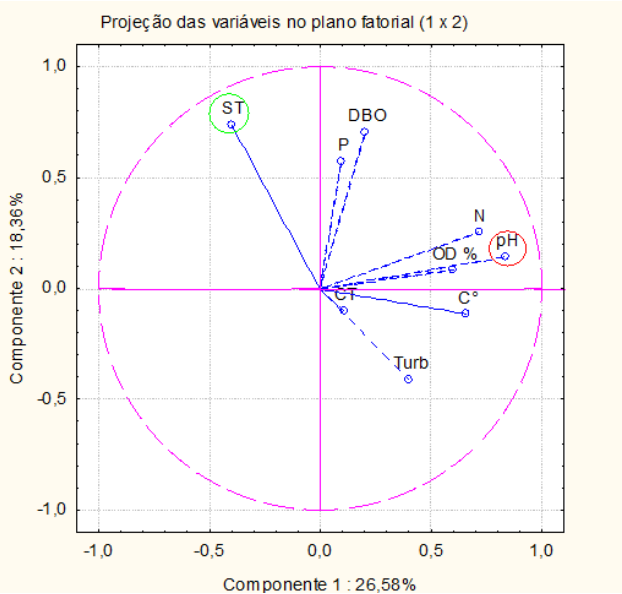
A temperatura se correlaciona positivamente com pH (0,51), ou seja, dependendo da variação de temperatura, o valor do pH acompanha essa variação de forma direta, quando a temperatura aumenta, provavelmente o valor de pH também acompanha esse aumento. Além dessa correlação com a temperatura, o pH se correlaciona de forma positiva (0,36 e 0,59) também com Oxigênio Dissolvido (OD) e com Nitrogênio (N), salientando que, a variação do pH pode ter influência diretamente no comportamento desses parâmetros.

O Oxigênio Dissolvido (OD) se correlaciona de maneira positiva (0,33) com Nitrogênio (N), mostrando que a variação do OD pode ter influência no valor de Nitrogênio, quanto mais alto o valor de OD, também aumenta o valor do Nitrogênio.

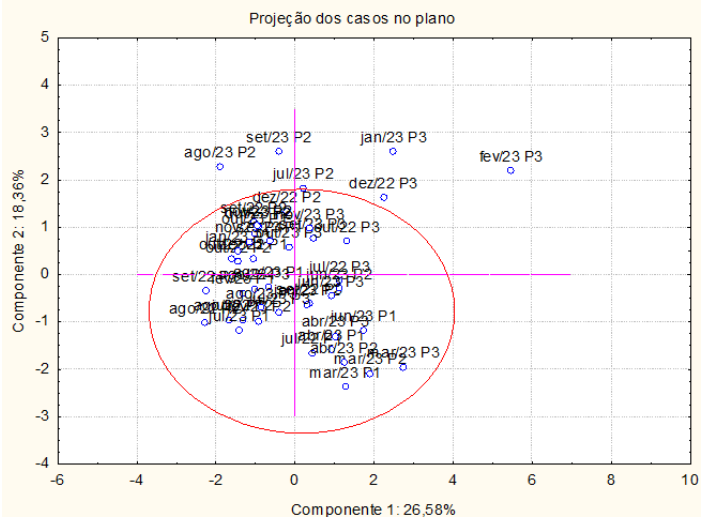
O parâmetro Sólidos Totais (ST) apresenta correlação negativa (-0,36) com o parâmetro Turbidez (Turb), ou seja, quando valor de ST aumenta, a tendência é que o valor de Turbidez diminua, inferindo que a turbidez é causada por fatores diferentes ao ST.

É perceptível que, a maioria das correlações acontecem em cadeia, em torno do parâmetro pH, ocorrência mais evidenciada na análise estatística ACP.

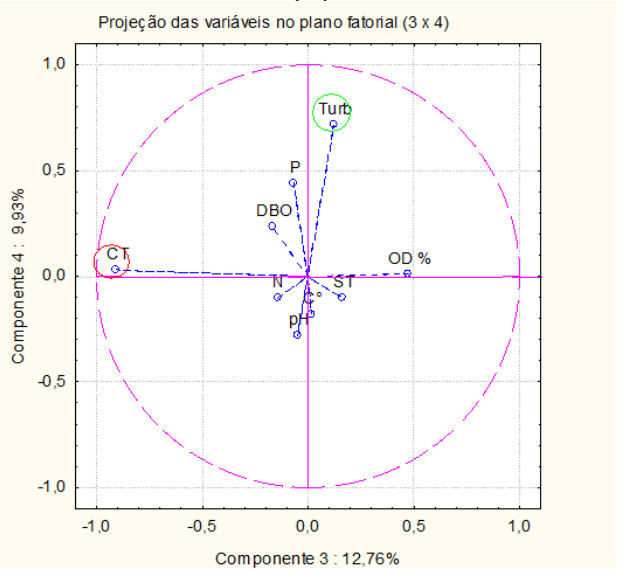
Figura 10: Resumo da análise ACP. Itens (A) (C) (E) mostra a correlação em pares de componentes. Itens (B) (D) (F) mostra o agrupamento de casos da correlação por pares.



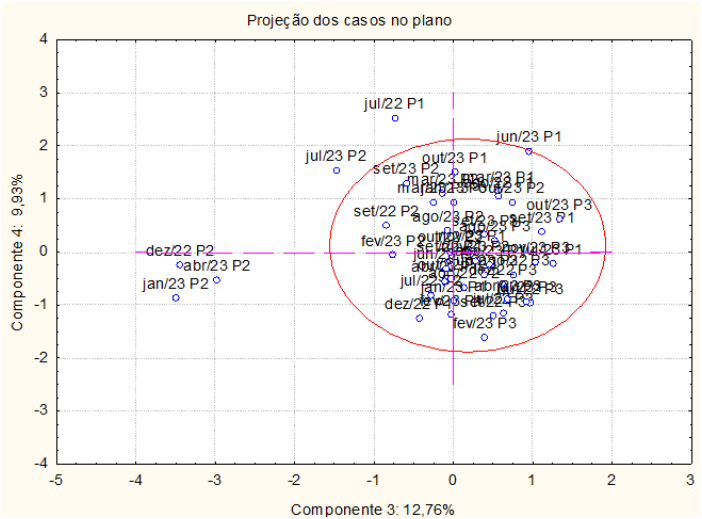
(A)



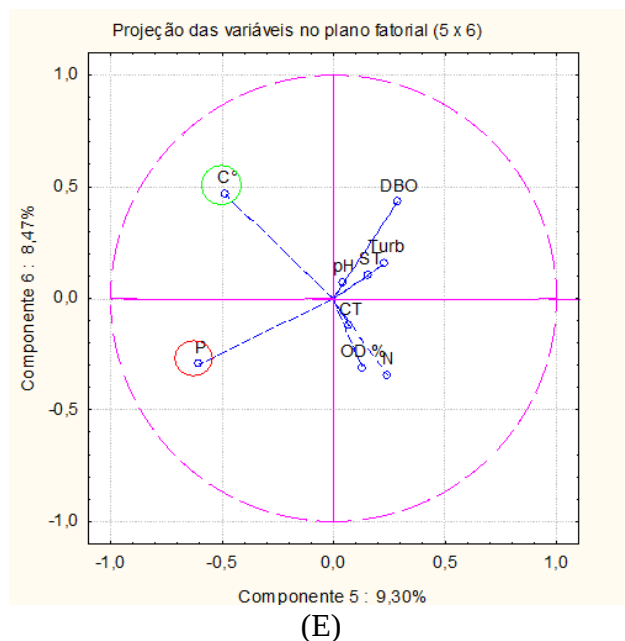
(B)



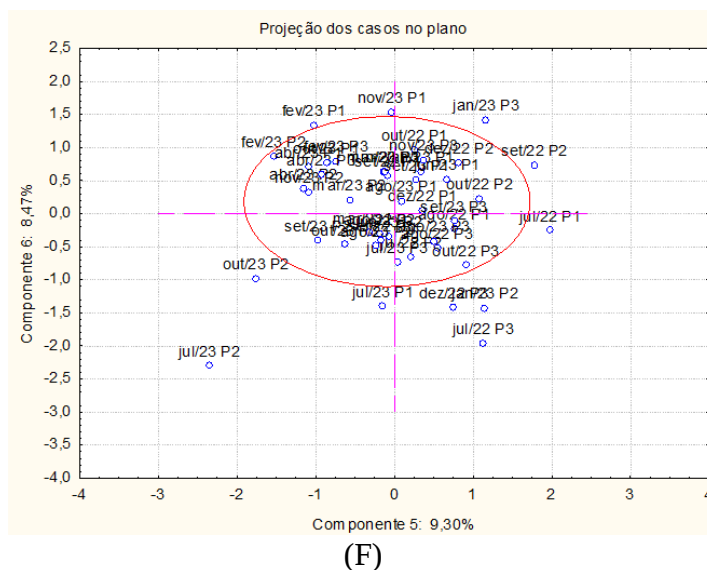
(C)



(D)



Fonte: Autoria própria (2025)

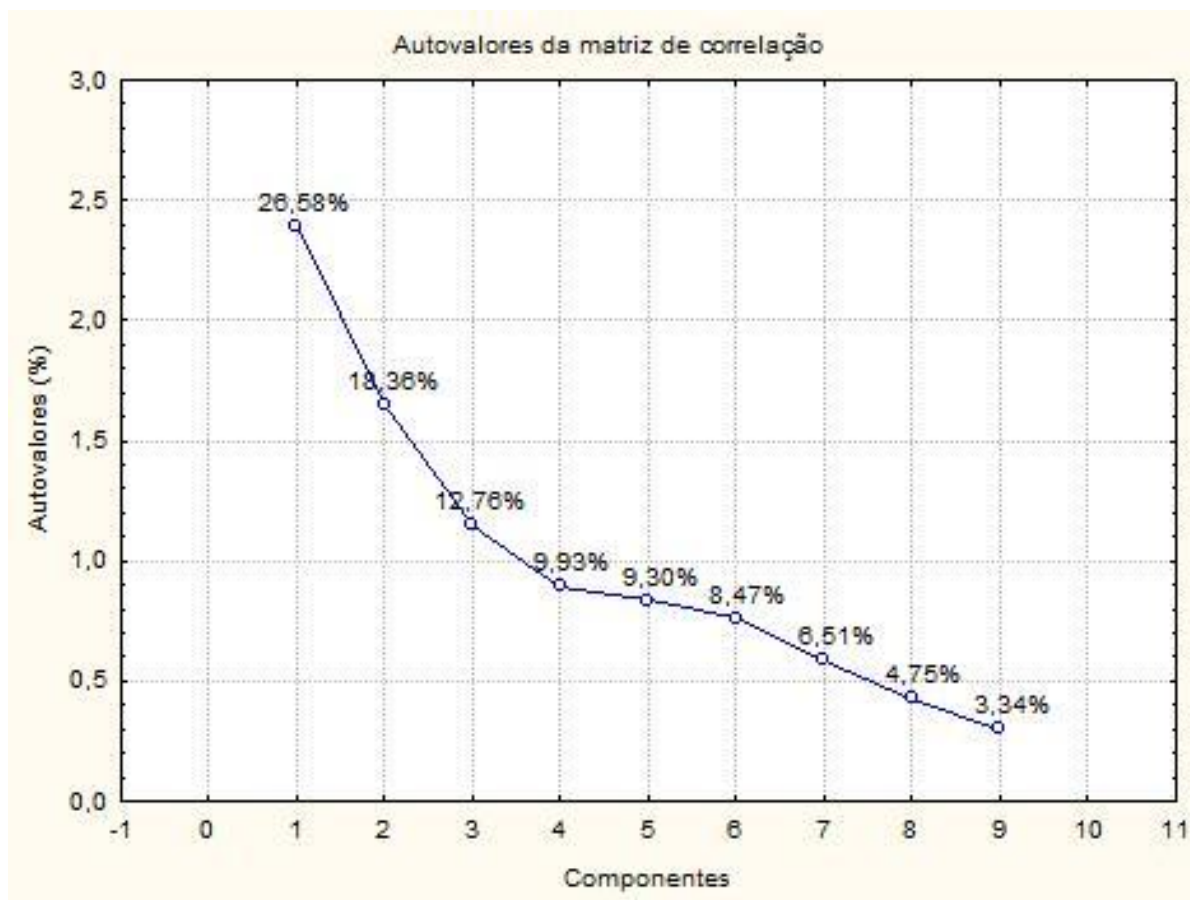


Os gráficos da ACP sintetizam o comportamento de cada parâmetro em relação a cada componente principal gerada pela análise (VALE, 2020) e o comportamento dos casos, nos agrupamentos mostrados. Os resultados da ACP mostraram que os 6 parâmetros cobrem 85,4% da influência no valor do IQA são pH, Sólidos Totais (ST), Coliformes Termotolerantes (CT), Turbidez (Turb), Fósforo (P) e Temperatura (°C), nessa sequência de relevância.

Dentre os parâmetros relevantes apresentados, destaca-se o pH, o ST e o CT. Cada um deles tem mais de 10% de influência no resultado do IQA, como aparece no Gráfico 3.

Fato corroborado pela matriz de correlação, que expõe muitas correlações entre o pH e os parâmetros, como também corroborado pelos agrupamentos identificados, em que mostra a maioria dos casos em um único agrupamento para cada par de componentes analisado.

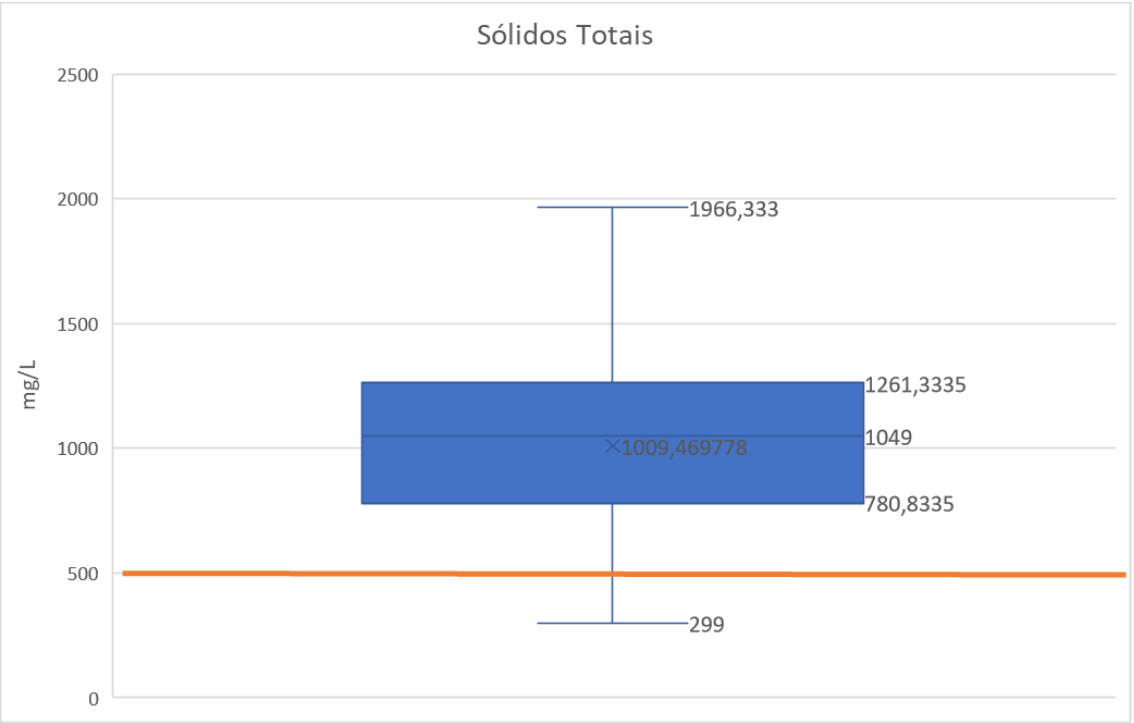
Gráfico 3: Porcentagem de autovalores para cada componente do IQA.



Fonte: Autoria própria (2025).

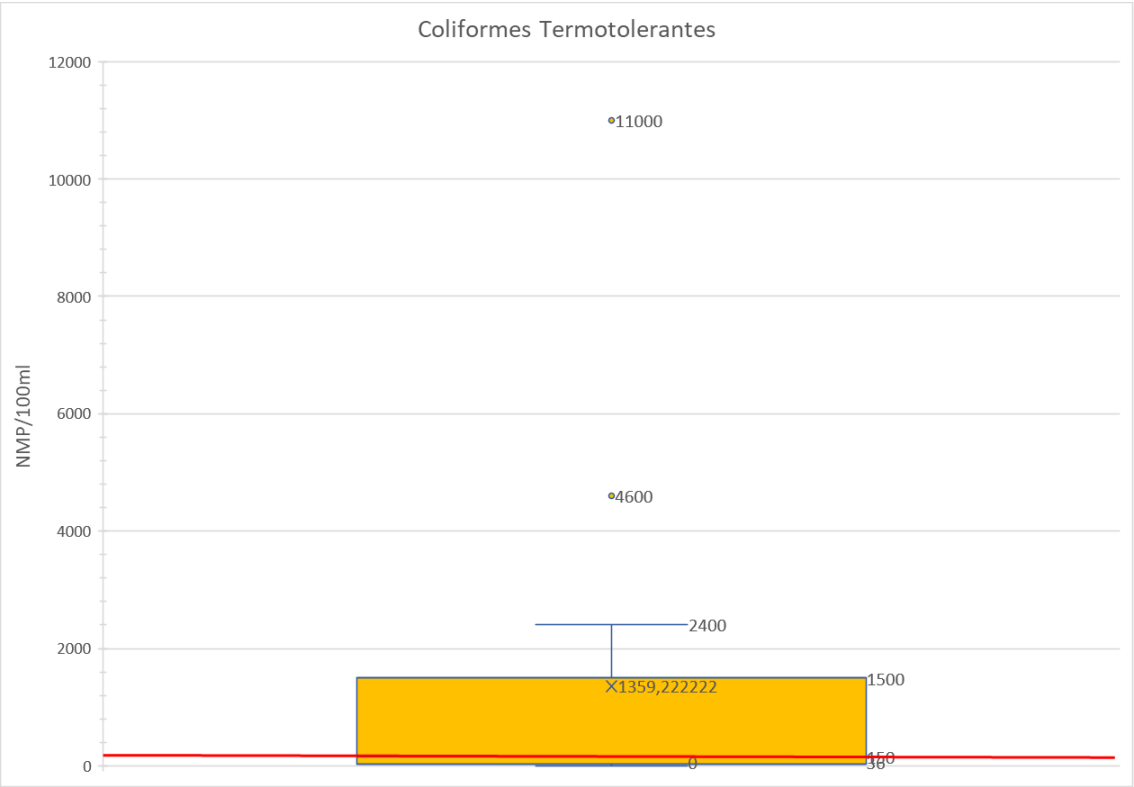
A resolução CONAMA 357/2005 categoriza as águas em doces, salobras e salinas, e determina critérios de utilização para cada uma das categorias. Considerando os critérios estabelecidos para águas doces, que são águas adequadas ao abastecimento público, é observado que, no estudo, somente o parâmetro pH se enquadra no critério, que é no intervalo de 6 a 9. Os valores máximos para Sólidos Totais e Coliformes Termotolerantes são respectivamente 500mg/L e 200NMP/100ml, e na pesquisa é observado valores muito acima desses valores estabelecidos, como mostrado nos Gráficos 4 e 5, fato que concorre para baixa qualidade da água.

Gráfico 4: Gráfico de box splot com valores de Sólidos Totais no intervalo de estudo.



Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 5: Gráfico de box splot com valores de valores de Coliformes Termotolerantes no intervalo de estudo.



Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados de valores de pH dessa pesquisa são compatíveis com outras pesquisas realizadas também em trecho urbano na cidade de Mossoró como no trabalho de Bezerra et al. (2013), em que o pH varia entre 7,8 e 8,3, e na pesquisa de Vale (2020), em que a pesquisa trata dos dados do Programa Água Azul, no período de 2008 a 2016 abrangendo 2 pontos na cidade de Mossoró, tendo como valores médios de 7,42 e 8,15.

São compatíveis também com pesquisas realizadas em outros corpos d'águas localizadas em outras bacias no semiárido, como o estudo de Fontana et al. (2019) realizados em trechos urbanos dos rios Lucaia e Jaguaribe na cidade de Salvador, em que valores de pH variaram entre 7,22 e 8,04; e com estudo de Fernandes, Araújo e Távora (2023), realizado no rio Jaguaribe, na cidade de Tabuleiro de Norte – CE, e apresentou valores de pH entre 6,2 e 8,7.

Esses valores de pH apresentados indicam que água em trechos urbanos de rios do semiárido tem comportamento levemente alcalino (valores acima de 7). Esse parâmetro é influenciado pelo próprio contexto ambiental, como as altas temperaturas, elevada evapotranspiração e baixos índices pluviométricos. Outro fator de interferência é a atividade antrópica em torno da bacia, pois a poluição que chega ao rio aumenta a concentração de sais que podem alterar esse parâmetro.

Os valores de Sólidos Totais apresentados na pesquisa são compatíveis com valores apresentados por Bezerra et al. (2013) e Vale (2020), que, respectivamente, mostram valores entre 1320 e 1514 mg/L, e valores médios de 746mg/L e 1413mg/L.

O parâmetro ST tem influência de fatores ambientais como escoamento superficial e vazão do rio, mas também sofre influência das atividades antrópicas, possivelmente devido à carga de efluentes que chegam ao trecho, que podem aumentar a concentração de elementos alterando o valor final de Sólidos Totais.

Para os valores de Coliformes Termotolerantes a pesquisa se mostrou compatível com pesquisas realizadas em outras bacias hidrográficas localizadas no semiárido como o trabalho de Albuquerque, Praxedes e Oliveira (2017) executado no rio Salgado localizado na região sul do Ceará, entre os anos de 2014 e 2015, apresentando valores que variam de 20 a 16000 NMP/100ml, com valor médio de 4760 NMP/100ml. Outro trabalho que apresenta valores de CT elevados é o de Nunes et al. (2019), que foi realizado no rio Salgadinho na cidade de Juazeiro do Norte – CE, no período de agosto a setembro de 2016, apresentados valores acima de 16000 NMP/100ml. Mais uma pesquisa que corrobora com esta é a realizada por Fontana et

al. (2019), que apresenta valores que variam entre 5000 NMP/100ml a valores maiores de 16000 NMP/100ml.

O parâmetro de CT, provavelmente, é o que maior indicador de poluição da água, pois a presença de CT aponta a existência de dejetos fecais de humanos e animais. Quando esses valores são muito elevados, indica que chega uma grande carga poluidora proveniente de esgoto sanitário.

Todos esses fatores revelam que, em trechos urbanos, além das condições ambientais desfavoráveis, o curso do rio sofre com descarte de carga poluidora, e a falta de medidas mitigadoras para esse problema.

4. CONCLUSÕES

O trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró na cidade de Mossoró tem comportamento predominantemente REGULAR quanto a sua qualidade indicada pela determinação do IQA. Aplicando a estatística multivariada ACP, foi apontado que os parâmetros que mais contribuíram para esse resultado foram o pH, os Sólidos Totais e os Coliformes Termotolerantes, parâmetros fortemente afetados pela poluição que chega ao rio.

Esse fato se deve a uma combinação de fatores como características ambientais desfavoráveis, tais como baixa amplitude térmica, concentrada em altas temperaturas, alta taxa de evapotranspiração, baixo índice pluviométrico e rios de baixos volumes, combinados com atividade antrópica, que se traduz em descarte de carga poluidora no corpo d'água.

O único parâmetro, dentre os três indicados, que se enquadra nos critérios da Resolução CONAMA 357 é o pH, os demais apresentam-se muito acima dos valores permitidos, sugerindo uma grande interferência de poluição na qualidade da água.

Esse cenário indica uma deficiência na preservação do rio no trecho urbano, como também a falta de medidas mitigadoras para redução das ações antrópicas às margens do rio, circunstâncias que são fruto da carência de gestão de recursos hídricos.

A técnica de estatística multivariada pode ser uma aliada à atividade da gestão, pois, quando ela define os parâmetros mais significativos para a qualidade da água, os gestores podem priorizar esses parâmetros na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ALBUQUERQUE, T. N.; PRAXEDES, M. I.; COSTA, E.; OLIVEIRA, W. M. **Avaliação da qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Salgado utilizando IQA-CETESB**. In: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS, Fortaleza - Ceará, Brasil, 20 a 22 de junho de 2017. Anais. Fortaleza, 2017. DOI: 10.18068/IIISBRNS2017.gas501. ISSN: 2359-2028.

BEZERRA, J. M.; SILVA, P. C. M.; BATISTA, R. O.; PINTO, C. H. C.; FEITOSA, A. P. Análise dos indicadores de qualidade da água no trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró em Mossoró-RN, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, supl. 1, p. 3443–3454, 2013.

Calculadora Ambiental. E-licencie. Disponível em < <https://app.e-licencie.com.br/calculadora/>>. Acesso em 04 de outubro de 2024

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas, Critérios de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos e Indicador de Controle de Fontes**. 2022. Disponível em: <https://CETESB.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2023/11/Apendice-D-Metodologia-de-Calculo-dos-Indices-de-Qualidade-das-Aguas-2022.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

FERNANDES, J. C.; ARAÚJO, I. I. M.; TÁVORA, M. A. Caracterização limnológica do rio Jaguaribe no município de Tabuleiro do Norte, estado do Ceará. **Holos**, Ano 39, v. 4, e10216, 2023. DOI: 10.15628/holos.2023.10216.

FONTANA, A. C. D.; PEREIRA, I. A.; PESSOA NETO, A. R.; OLIVEIRA, D. F.; NASCIMENTO, M. M.; SANTOS, A. G. Investigação de indicativos de qualidade da água em trechos dos rios urbanos Lucaia e Jaguaribe em Salvador, Bahia, Brasil. **REGA**, v. 16, e8, 2019. ISSN 2359-1919. DOI: <https://dx.doi.org/10.21168/rega.v16e8>.

GALVÍNCIO, J. D. Estimativa da temperatura da superfície com imagens obtidas com drones. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 397-406, 2019.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2011.

IBGE. **Mossoró: Panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>. Acesso em: 29 nov. 2024.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. The Sixth Assessment Report: The numbers behind the science**. Geneva, Switzerland, 2022.

LEMOS FILHO, L. C. A.; SOBRINHO, J. E.; OLIVEIRA JÚNIOR, H. S. Clima e Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Apodi-Mossoró RN. In: CARVALHO, R. G. (Org.). **Rio Apodi-Mossoró: meio ambiente e planejamento**. Mossoró: Edições UERN, 2022. p. 39-65.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2.ed. Piracicaba: USP, 2008. 254f.

LOPES, E. R. N.; SOUZA, J. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; LOURENÇO, R. W. Gestão de bacias hidrográficas na perspectiva espacial e socioambiental. **Economía Sociedad y Territorio**, n. 62, p. 1–23, 2020.

NUNES, L. M.; MONTEIRO, M. F. G.; SOUSA JÚNIOR, D. L.; AQUINO, P. E. A.; SARAIVA, C. R. N.; LEANDRO, M. K. N. S.; MARQUES, A. E. F.; SILVA, R. O. M.; LEANDRO, L. M. G. Pesquisa de coliformes totais e termotolerantes no rio Salgadinho no município de Juazeiro do Norte, CE. **Revista Eletrônica Acervo Científico / Electronic Journal Scientific Collection**, v. 7, e2243, 2019. ISSN 2595-7899. DOI: <https://doi.org/10.25248/reac.e2273.2019>.

OCHUNGO, E.; OUMA, G.; OBIERO, J.; ODERO, N. Water quality index for assessment of potability of groundwater resource in Langata Sub County, Nairobi-Kenya. **American Journal of Water Resources**, v. 7, p. 62–75, 2019.

PASTRO, M. S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, F. R.; FERRAZ, F. T. Estatística multivariada aplicada à análise de qualidade da água em diferentes ambientes de microbacias hidrográficas. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 185-191, mar./abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8047>.

ROCHA, A. B.; BACCARO, C. A. D.; SILVA, P. C. M.; CAMACHO, R. G. V. Mapeamento geomorfológico da bacia do Apodi-Mossoró, RN. **Mercator**, v. 8, n. 16, p. 201–216, 2009.

SEBRAE. **Mossoró**. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/mossoro?selector245id=geo2401107>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SILVA, A. L. S da. **Qualidade da Água e Capacidade de Fitoextração de Macrófitas no Trecho Urbano do Rio Apodi-Mossoró do Município de Mossoró-RN**. 2024. 129f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo em Água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024.

SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. Aspectos econômicos, sociais e ambientais da bacia hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró. In: SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. (Orgs.). **A Bacia do Rio Apodi-Mossoró: aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no semiárido do Rio Grande do Norte**. Mossoró: EDUFERSA, 2022. p. 123-135.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015.

SOUZA, A. C. M.; SILVA, M. R. F.; DIAS, N. S. Gestão de recursos hídricos: o caso da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró (RN). **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 280-296, 2012.

TIBÚRCIO, I. M.; SILVEIRA, N. T.; SANTOS, T. O.; MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D. Balanço hídrico e mudanças climáticas no semiárido pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPER). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1657-1670, 2023.

VALE, R. A. V. **Análise de índices de qualidade de água da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró, Brasil**. 2020. 55 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo em Água) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.

4 ARTIGO 2: APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS PARA AJUSTE DE UMA EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA DO IQA EM TRECHO URBANO DE UM RIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Trechos de bacias hidrográficas do semiárido, que atravessam áreas urbanas, tem uma susceptibilidade maior a impactos negativos das ações antrópicas. A atividade de gestão de recursos hídricos requer suporte à sua tomada de decisão, e o emprego do monitoramento de corpo d'água é um dos suportes. O Índice de Qualidade de Água - IQA é uma ferramenta muito difundida no monitoramento de águas superficiais, sendo resumido em um valor numérico e categorizando a água desde péssima à ótima. Mas a operacionalização desse monitoramento de corpos d'água pode ser muito onerosa, pode consumir bastante tempo para gerar resultados, e, em muitas vezes, pode ser inviabilizado. Tendo em vista esse fato, é de muita valia ter alternativa mais simples e viável para fazer esse monitoramento. Com isso, a pesquisa teve como mote propor uma metodologia simplificada para determinar o IQA de um trecho urbano em bacia hidrográfica no semiárido brasileiro, principalmente em período seco, situação em que geralmente há o aparecimento de macrófita. Para esse estudo foram coletadas amostras de água no período de junho a novembro de 2023, em concomitância foram efetuados sobrevoos com aeronave remotamente pilotada, usualmente chamada de drone, modelo Mavic Air 2 da fabricante DJI, para mapear área de macrófitas. Em seguida procedeu-se a análise laboratorial das amostras para determinar o IQA utilizando a metodologia CETESB, e foi feito o processamento das imagens geradas pelo drone, com auxílio das ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas-SIG, Agisoft Metashape 2.0 e Qgis versão 3.28.14, para determinar a área de ocupação das macrófitas mapeadas. Com todos esses dados, foi feita uma correlação da área de ocupação de macrófitas com o IQA que foi determinado para o ponto de coleta, a partir dessa correlação obteve-se uma equação senoidal que aponta o IQA. A equação confirmou a classificação apontada pela CETESB em 10 dos 12 casos estudados, demonstrando sua eficiência em indicar a qualidade da água, tendo como base de análise a área de ocupação das macrófitas.

Palavras-chaves: macrófita, SIG, drone, equação senoidal

APPLICATION OF GEOTECHNOLOGIES TO ADJUST A WATER QUALITY INDEX ESTIMATION EQUATION IN AN URBAN STRETCH OF A RIVER IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION.

ABSTRACT

Stretches of watersheds in semi-arid regions that pass through urban areas are more susceptible to negative impacts from anthropogenic activities. Effective water resources management requires decision-making support, and monitoring of water bodies is one such support tool. The Water Quality Index (WQI) is a widely used tool for monitoring surface water, providing a numerical value that categorizes water quality from "poor" to "excellent." However, the operationalization of water body monitoring can be costly, time-consuming, and in many cases, unfeasible. Given this, having a simpler and more viable alternative for monitoring becomes highly valuable. This research aimed to propose a simplified methodology for determining the WQI of an urban stretch of a watershed in the Brazilian semi-arid region, particularly during the dry season—a period when macrophyte proliferation is common. For this study, water samples were collected from June to November 2023. Simultaneously, aerial surveys were conducted using a remotely piloted aircraft, commonly known as a drone (Mavic Air 2 model by DJI), to map the area covered by macrophytes. Subsequently, the water samples were analyzed in the laboratory to determine the WQI using the CETESB methodology. The drone images were processed using Geographic Information System (GIS) tools, specifically Agisoft Metashape 2.0 and QGIS version 3.28.14, to quantify the area occupied by the mapped macrophytes. With all these data, a correlation was established between the macrophyte coverage area and the WQI determined at the sampling point. From this correlation, a sinusoidal equation was developed to estimate the WQI. This equation matched the classification provided by CETESB in 10 out of the 12 cases studied, demonstrating its efficiency in indicating water quality based on the extent of macrophyte coverage.

Keywords: Macrophyte. GIS. Drone. Sinusoidal equation.

1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas naturalmente padecem com escassez de água devido as suas características. Altas temperaturas, baixos índices pluviométricos, chuvas concentradas em poucos meses do ano, duas estações bem definidas e altas taxas de evapotranspiração retratam o clima semiárido. Essa condição é agravada pelas gradativas alterações climáticas.

O semiárido brasileiro tem uma das maiores densidades demográficas, comparando com outras regiões semiáridas no mundo, contornando 1427 municípios em 10 estados. O Rio Grande do Norte - RN faz parte desse semiárido, tem condições climáticas especiais e socioeconômicas complexas, solos diversificados, e com 90% do território no polígono das secas (DUARTE, 2002; SUDENE, 2021; LUCENA, 2022).

O município de Mossoró é o segundo maior dos 167 municípios do RN, segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE é identificado como Capital Regional C (2C), localizado na Mesorregião Oeste, tendo como principais atividades econômicas o comércio varejista, setor de alimentação e de reparo de veículos (IBGE, 2024; SEBRAE, 2024). O município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.

A bacia do Rio Apodi-Mossoró tem grande relevância no estado, sendo a segunda maior bacia do RN, correspondendo a 26,8% do território, tendo seus recursos utilizados essencialmente para abastecimento humano, irrigação e dessedentação animal. Quando atravessa a cidade de Mossoró tem uma área de drenagem de 9571km² (SILVA; CAMARGO, 2022).

Os impactos antrópicos que mais afetam as bacias hidrográficas são mineração, pecuária, descarte de resíduos domésticos, agrícolas e industriais. Quando o rio atravessa trechos urbanos, comumente se observa o descarte de efluente domésticos.

Em consequências desses fatos, é fundamental uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

A gestão de recursos hídricos consiste na regulamentação, por parte da União, estados e municípios sobre o uso da água, para abastecimento humano, utilização industrial e agropecuário, principalmente no âmbito regional (ROCHA et al., 2010).

A atividade de monitoramento da qualidade da água ampara a tomada de decisão sobre o seu uso, e, é realizada através da medição periódica de indicadores qualitativos (VALE, 2020). Para atender esse requisito, a Agência Nacional de Águas - ANA se utiliza da metodologia para determinar o Índice de Qualidade de Água – IQA, que é um recurso robusto baseado na

utilização de parâmetros padronizados para determinar a qualidade da água (ANA, 2024; OCHUNGO et al., 2019)

Os corpos d'água podem apresentar indicadores visuais de sua qualidade, sendo a presença de macrófitas um deles. As macrófitas aquáticas são plantas visíveis a olho nu, que sobrevivem total ou parcialmente submersas ou flutuantes (IRGANG; GASTAL JUNIOR, 1996). Em condições normais, as macrófitas são benéficas ao meio, pois atua na ciclagem de nutrientes, na remoção de nutrientes em ambientes eutrofizados e favorecendo o desenvolvimento da comunidade do perifíton, porém, uma grande carga poluidora propicia o seu crescimento excessivo e desordenado, causando problemas ambientais (XAVIER et al., 2021).

Embora confiável, a metodologia do IQA possui algumas limitações, como seu custo elevado, desafios operacionais e, em muitos casos, a inviabilidade de sua aplicação. Diante dessas dificuldades, torna-se essencial considerar alternativas ao IQA convencional. Pesquisas que utilizam geotecnologias para a determinação de parâmetros ambientais, em conjunto com ferramentas matemáticas de modelagem, vêm tendo destaque na comunidade científica.

Uma metodologia de monitoramento ambiental que está em ascensão é a utilização de Drone aliado ao uso de ferramentas de Sistema Informações Geográficas - SIG.

Drone é uma Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPA utilizadas para fins experimentais, comerciais ou institucionais (ANAC, 2024), que utiliza princípios de aerofotogrametria para obtenção de imagens.

O Sistema de Informações Geográficas - SIG é uma ferramenta do tipo software que permite armazenar, manipular recuperar dados para análise espacial.

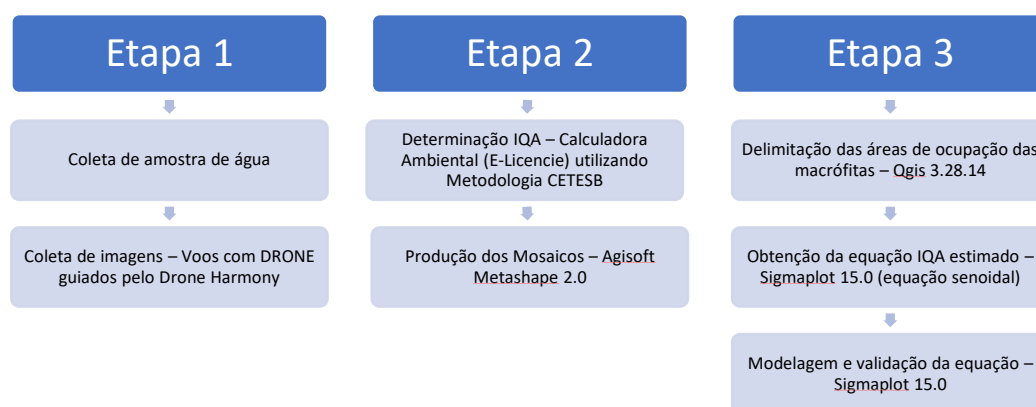
Outra metodologia aliada para interpretar fenômenos ambientais é a modelagem matemática. Equações são indicadas para modelar ciclos hidrológico ou escoamento superficial, a exemplo, e ajudam planejamento de uma gestão sustentável.

Diante do apresentado, essa pesquisa teve como objetivo propor uma alternativa à metodologia tradicional de IQA, por meio da correlação da área de ocupação de macrófitas, com IQA encontrado de forma usual, traduzindo em uma equação senoidal. As imagens das macrófitas foram obtidas por drone, e o tratamento das imagens para delimitação das áreas de ocupação foram executas em softwares SIG.

2 MATERIAL E MÉTODO

A pesquisa foi elaborada em três etapas, a primeira foi a coleta de amostras de água dos pontos de estudo e voo do drone para obtenção das imagens das áreas dos trechos de estudo. A segunda etapa foi para análise em laboratório para determinação dos parâmetros e, consequentemente, o valor do IQA, em paralelo foi realizado o tratamento das imagens. A terceira etapa foi dedicada à tabulação das informações e determinação da equação a qual indica o valor do IQA. As etapas detalhadas são apresentadas na Figura 11.

Figura 11: Resumo das etapas da pesquisa.



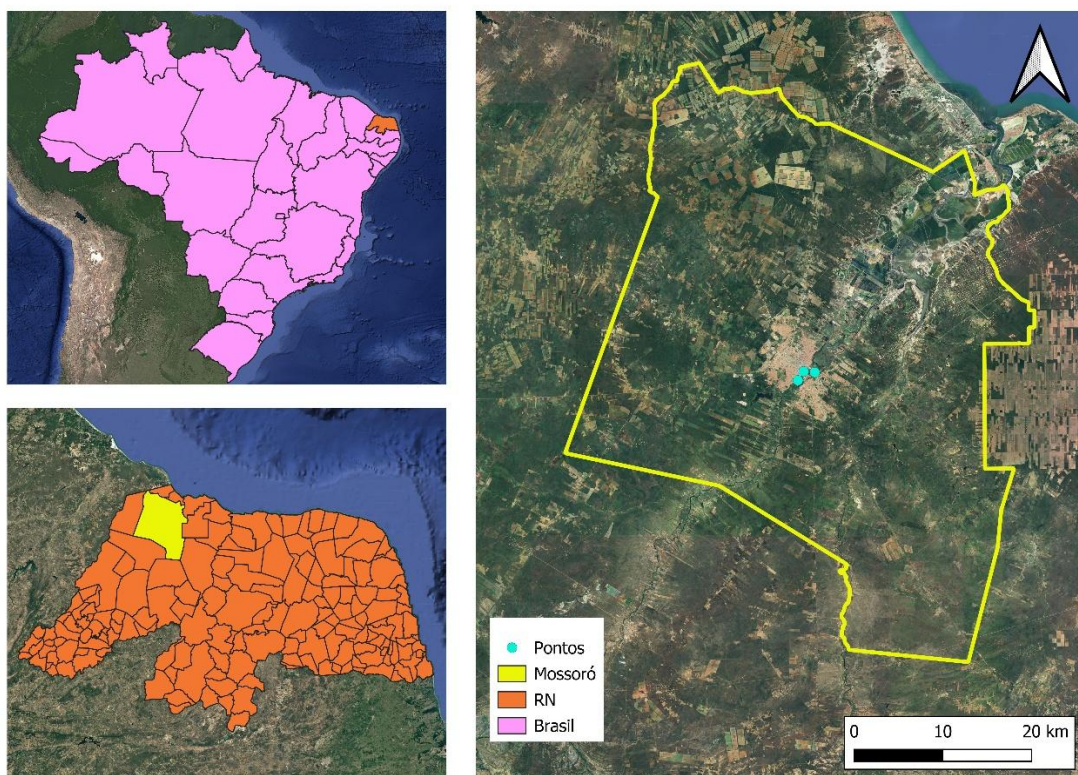
Fonte: Autoria Própria (2025)

2.1 Área de estudo

A área foco da pesquisa faz parte da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, localizada no centro da cidade de Mossoró no Rio Grande do Norte, Brasil. A cidade está inserida no nordeste brasileiro, de clima semiárido, categorizado como BSwh' na classificação de Köppen, que se caracteriza por altas temperaturas, duas estações bem delimitadas, em que a estação chuvosa se concentra entre março e abril, com baixa precipitação, tendo médias de entre 500 a 880mm. Ao perpassar o município de Mossoró, o Rio Apodi-Mossoró transcorre no sentido sudoeste-nordeste e de forma sinuosa (ROCHA et al., 2009; BEZERRA et al., 2013; ARAÚJO; SANTOS; ARAÚJO, 2007). A região apresenta temperatura média anual de 27,6 °C, com valores médios mensais de radiação solar diária variando entre 4900 e 6398 Wh/m². Durante o período seco, que ocorre entre os meses de setembro e novembro, a velocidade média diária dos ventos atinge 5 m/s. O relevo da bacia caracteriza-se por ser

predominantemente plano, e a vazão média de longa duração no município de Mossoró é de $17,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (LEMOS FILHO; SOBRINHO; OLIVEIRA JUNIOR, 2022). A localização espacial da área de estudo está apresentada na Figura 12:

Figura 12: Mapa de localização do município de Mossoró – RN, mostrando os pontos de coleta.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os pontos selecionados do rio em estudo estão situados em um trecho que atravessa o centro da cidade, que sofre intensa atividade antrópica. Especificamente, esses pontos incluem as pontes da Avenida Abel Coelho, no bairro Alto da Conceição, e da Avenida Jerônimo Dix-Neuf Rosado, no bairro Paredões, além da barragem localizada no centro. Os pontos são mostrados na Tabela 6 e na Figura 13.

Tabela 6: Localização dos pontos de coleta de amostra de água de trecho urbano do rio Apodi-Mossoró da pesquisa.

Ponto	Localização	Coordenadas Geográficas	
		Latitude	Longitude
P1	Ponte Av. Avenida Jerônimo Dix-Neuf Rosado	5°11'44.58"Sul	37°19'44.69"Oeste
P2	Barragem do Centro	5°11'41.51"Sul	37°20'25.28"Oeste
P3	Ponte Av. Coelho Neto	5°12'13.7"Sul	37°20'46.3"Oeste

Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 13: Localização espacial dos pontos de coleta de água e áreas de atuação do Drone.



Fonte: Google Earth (2025)

A sequência de pontos se deu pela rota programada para coleta das amostras.

2.2 Período de estudo, precipitação, coleta de amostras água e obtenção das imagens

A pesquisa aconteceu no intervalo de maio a novembro de 2023. Nesse período foram coletados uma amostra de água do rio em estudo a cada mês, em cada ponto. Em paralelo a cada coleta de água, foram executados voos com o drone, para coleta de imagens do rio, em

área delimitada em forma circular, com origem de raio localizado nas coordenadas expostas na Tabela 4. As imagens têm o propósito de demarcar a área de ocupação de macrófitas nesses pontos do rio.

As informações sobre precipitação foram logradas da estação meteorológica Campbell Scientific, que está localizada no campus central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA, em Mossoró - RN. Os dados históricos mensais de precipitação foram calculados a partir de informações disponíveis na Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN - EMPARN. A série histórica foi calculada do período de 1964 a 2021.

2.2.1 Obtenção das imagens da área de macrófitas

Para obtenção das imagens foram efetuados voos com Drone modelo Mavic Air 2 da fabricante DJI, conforme Figura 14. O drone executou os voos para mapeamento de forma autônoma, cobrindo uma área pré delimitada, a uma velocidade de 5,0m/s, a 75m de altura, recobrindo 75% da área horizontal e vertical.

Figura 14: Drone Mavic Air 2 utilizado na pesquisa. (A) Vista frontal do drone. (B) Vista superior do drone.



(A)



(B)

Fonte: Autoria própria (2023)

Para automatização dos voos foi utilizado o software de fotogrametria gratuito Drone Harmony. O software faz a interface com drone e nele são inseridos os parâmetros de voo, que o drone segue na sua execução.

Devido a imprevistos enfrentados, como ventos fortes, limitação da bateria do aparelho, em alguns voos, não foi possível captar todas as imagens. Para conclusão da dessa etapa foi modificado o plano de voo inicial, que antes previa o sobrevoo de toda área que abrange os

pontos, com a adequação, o drone fez sobrevoo sobre uma área circular, de raio de 100 metros, com origem no ponto de coleta.

As imagens capturadas e aplicadas na pesquisa foram: imagens do ponto 1 e 2 no mês de junho, ponto 2 no mês de agosto, todos os pontos nos meses de setembro, outubro e novembro, totalizando 12 conjuntos de imagens.

2.3 Determinação do IQA em laboratório e tratamento das imagens

Após a coleta de amostras, foram realizadas as análises nos laboratórios da UFERSA, campus central em Mossoró-RN, para determinação dos parâmetros do IQA.

O tratamento das imagens foi executado em softwares do tipo SIG.

2.3.1 Determinação de parâmetros e cálculo de IQA

As análises laboratoriais para determinação dos parâmetros do IQA foram realizadas no Laboratórios de Saneamento (LASAN), no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) e no Laboratório de Inspeção de Produtos de Origem Animal (LIPOA). A metodologia empregada para a determinação de cada indicador está resumida no Quadro 9. Os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT), Demanda Bioquímica de Oxigênio em cinco dias (DBO₅), Nitrogênio Total (N), Fósforo Total (P) e Sólidos Totais (ST) foram analisados em triplicata conforme os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, sendo considerados os valores médios obtidos.

Quadro 9: Resumo de metodologias utilizadas para determinar os indicadores de IQA.

Indicador	Metodologia/Utensílio	Laboratório/Local
Oxigênio Dissolvido	Sonda Multiparâmetros	In loco
Coliformes Termotolerantes	Tubos múltiplos	LIPOA
pH	Medidor de pH de bancada (pHMETRO)	LASAN
DBO ₅	Demanda consumida no 5º dia	LASAN
Nitrogênio Total	NTK Titulométrico com destilação preliminar	LASAP
Fósforo Total	Método do ácido ascórbico com digestão preliminar com método do persulfato	LASAN
Turbidez	Nefelométrico com Turbidímetro	LASAN
Sólidos Totais	Em estufa a 105°C	LASAN
Temperatura	Sonda Multiparâmetros	In loco

Fonte: Autoria própria (2025)

Os parâmetros são apresentados na Tabela 7 e os cálculos para determinação do valor do IQA seguiram a metodologia que consta no apêndice D, da CETESB.

Tabela 7: Parâmetros que compõem o IQA pela metodologia CETESB

Nº	Indicador	Unidade
1	Oxigênio Dissolvido	%saturação'
2	Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml
3	pH	-
4	DBO ₅	mg O ₂ /L
5	Nitrogênio Total	mg /L
6	Fósforo total	mg /L
7	Turbidez	uT
8	Sólidos Totais	mg /L
9	Temperatura de desvio	°C

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

O apêndice diz que o IQA é calculado pelo produto ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que integram o Índice (CETESB, 2022):

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Em que:

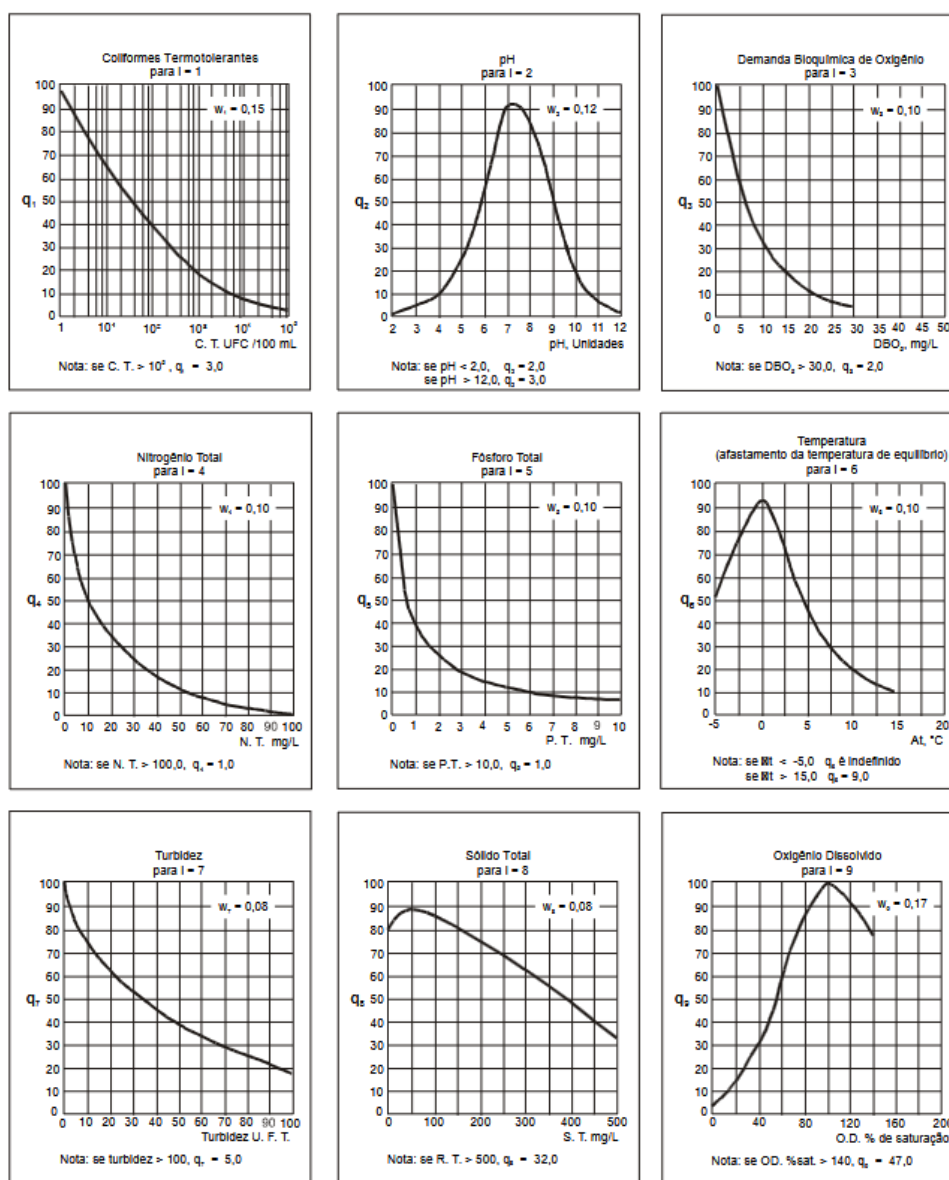
IQA = índice de qualidade da água, representado por um número em escala contínua de 0 a 100.

q_i = qualidade individual (sub-índice de qualidade) do i ésimo parâmetro, um valor entre 0 e 100.

w_i = peso unitário do i ésimo parâmetro.

Para utilizar o sub-índice q_i no cálculo, é necessário encontrá-lo nas Curvas Médias de variação da Qualidade das Águas, apresentado na Figura 15.

Figura 15: Curvas Médias de variação da Qualidade das Águas para os 9 parâmetros.



Fonte: CETESB (2022).

O IQA é categorizado de acordo com exibido na Tabela 8:

Tabela 8: Categorização da qualidade da água segundo IQA.

Classificação do corpo d'água	
IQA	Categoria
$79 < IQA \leq 100$	Ótima
$51 < IQA \leq 79$	Boa
$36 < IQA \leq 51$	Regular
$19 < IQA \leq 36$	Ruim
$IQA \leq 19$	Péssima

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

Para efetuação dos cálculos do IQA foi empregado o recurso online gratuito chamado Calculadora Ambiental, da empresa E-licencie (E-LICENCIE, 2024).

2.3.2 Tratamento da Imagens

Com o conjunto de imagens obtidas pelo drone em cada área, foi necessário organizar e interpretar essas informações.

Inicialmente, juntou-se as imagens de cada ponto, transformando essas imagens em um mosaico. Para essa tarefa foi utilizado o software Agisoft Metashape 2.0.

Com os mosaicos prontos, foi necessário efetuar a interpretação das imagens geradas, e delimitar a área de ocupação das macrófitas, para, futuramente correlacionar essas áreas com o IQA. Essa atividade foi exercida com auxílio do software SIG Qgis 3.28.14.

2.4 Equação senoidal indicativa do IQA

A última etapa se deu com a correlação entre a área de ocupação das macrófitas, já delimitada pelo Qgis. O objetivo foi encontrar uma relação, combinadas numa equação que pudesse apontar, sem a necessidade de análise laboratorial, a categorização da qualidade da água, segundo metodologia da CETESB.

As informações de área ocupada e IQA determinado em laboratório foram tabulados em Excel. Com esses dados tabulados, foi utilizado o software SigmaPlot 15.0 para realizar testes para determinação de uma equação do tipo senoidal, que satisfizesse as condições estatísticas.

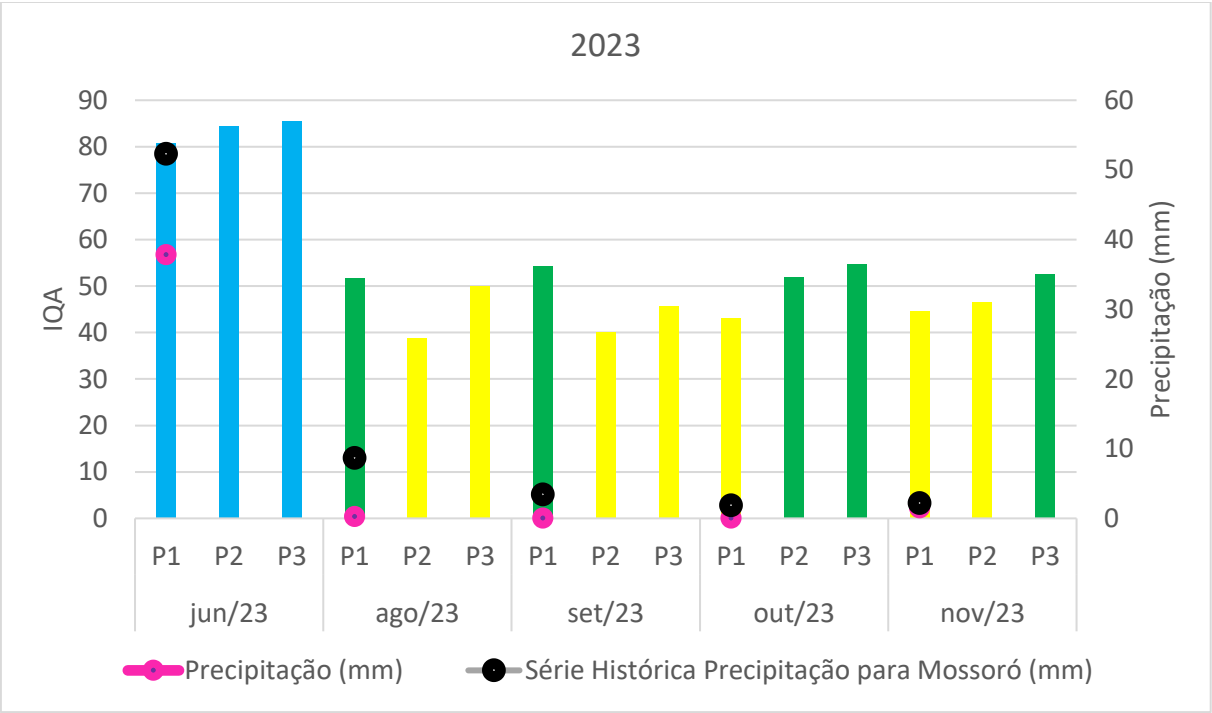
Encontrada a equação, foi realizada a modelagem dela, utilizando os valores de ocupação das macrófitas determinadas, substituindo o valor de x na equação.

Após a modelagem, foi executada a validação da equação, utilizando a metodologia Leave One Out – LOO.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A pesquisa foi realizada em período do ano hidrológico considerado seco, fator que pode ter colaborado para a redução da qualidade da água, referenciadas pela medição do IQA, como demonstrado no Gráfico 6 e no Quadro 10. O período seco é crítico para qualidade da água em rios do semiárido, pois a precipitação é reduzida a quase zero, as temperaturas aumentam substancialmente, aumentando a evapotranspiração, em consequência, há uma redução de volume e na capacidade de depuração do rio.

Gráfico 6: IQA do período de estudo correlacionado com a precipitação do período e a série histórica.



Fonte: Autoria própria (2025).

Quadro 10: Resumo da qualidade da água durante o período de estudo.

IQA						
DATA DE COLETA	P1	P2	P3	P1	P2	P3
jun/23	80,678	84,493	85,5	Ótima	Ótima	Ótima
ago/23	51,661	38,908	49,968	Boa	Regular	Regular
set/23	54,211	40,103	45,652	Boa	Regular	Regular
out/23	43,067	51,964	54,701	Regular	Boa	Boa
nov/23	44,595	46,532	52,64	Regular	Regular	Boa

Fonte: Autoria própria (2025).

As macrófitas são plantas que vivem no meio aquático, que são indicadoras da qualidade da água. Quando há um crescimento desordenado dessas plantas, sinaliza que nutrientes necessários ao seu desenvolvimento estão presentes em abundância no corpo d'água, geralmente esses nutrientes excedentes são oriundos de carga poluidora que chega ao rio.

Historicamente há o surgimento de macrófitas nesse trecho do rio, e para o ano de 2023 segue esse comportamento, como apresentado na Figura 17.

Nota-se a presença de macrófitas recobrindo grande parte do trecho do rio, na maioria das imagens obtidas, a exceção é o ponto 3 (P3), em que o aparecimento de macrófitas é reduzido, e limitado às margens do rio. A partir desse recobrimento das macrófitas, tem-se a área ocupada em relação à área do rio, correlacionado com IQA, especificada na Tabela 9.

Tabela 9: Área de ocupação das macrófitas nos pontos analisados, correlacionado com IQA.

ÁREA RIO/MACRÓFITAS					
<i>Data</i>	<i>Ponto de coleta</i>	<i>Área Rio</i>	<i>Área Macrófita</i>	<i>Ocupação Macrófita</i>	<i>IQA</i>
07.06.2024	P1	8245	3395	41,18%	80,678
	P2	14190	4816	33,94%	84,493
25.08.2024	P2	14437	11032	76,41%	38,908
29.09.2024	P1	10054	2988	29,72%	54,211
	P2	12634	9771	77,34%	40,103
	P3	7062	633	8,96%	45,652
26.10.2024	P1	10613	3169	29,86%	43,067
	P2	13786	8880	64,41%	51,964
	P3	9280	480	5,17%	54,701
24.11.2024	P1	11582	2339	20,20%	44,595
	P2	14093	9852	69,91%	46,532
	P3	8856	309	3,49%	52,64

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16: Imagens de aerofotogrametria por drone, no período de estudo. (A) P1 jun/2023; (B) P2 jun/2023; (C) P2 ago/2023; (D)(E)(F), respectivamente, P1, P2 e P3 em set/2023; (G)(H)(I), respectivamente, P1, P2 e P3 em out/2023; (J)(L)(M), respectivamente, P1, P2 e P3 em nov/2023.



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)



(I)



(J)



(L)



(M)

Fonte: Autoria própria (2025).

É verificado que P2 é o ponto que apresenta qualidade da água mais degradada, tendo maior porcentagem de ocupação de macrófitas sobre as águas do rio, com categorização de IQA oscilando entre ÓTIMA e REGULAR, mas tendo valores de IQA concentrados dentre 39,80 e 60,09, mostrado no Gráfico 7. Neste ponto, a ocupação das macrófitas é mais severa, tendo uma área de ocupação de 77,34% no mês de agosto de 2023.

Como mencionado, P3 é o ponto de menor área ocupada por macrófitas, tendo a maior ocupação de 8,96% da área do rio, e os valores de IQA concentram-se entre 48,88 e 64,29 (Gráfico 7), fatores que mostram uma discreta melhora na qualidade da água, quando comparada ao ponto 2.

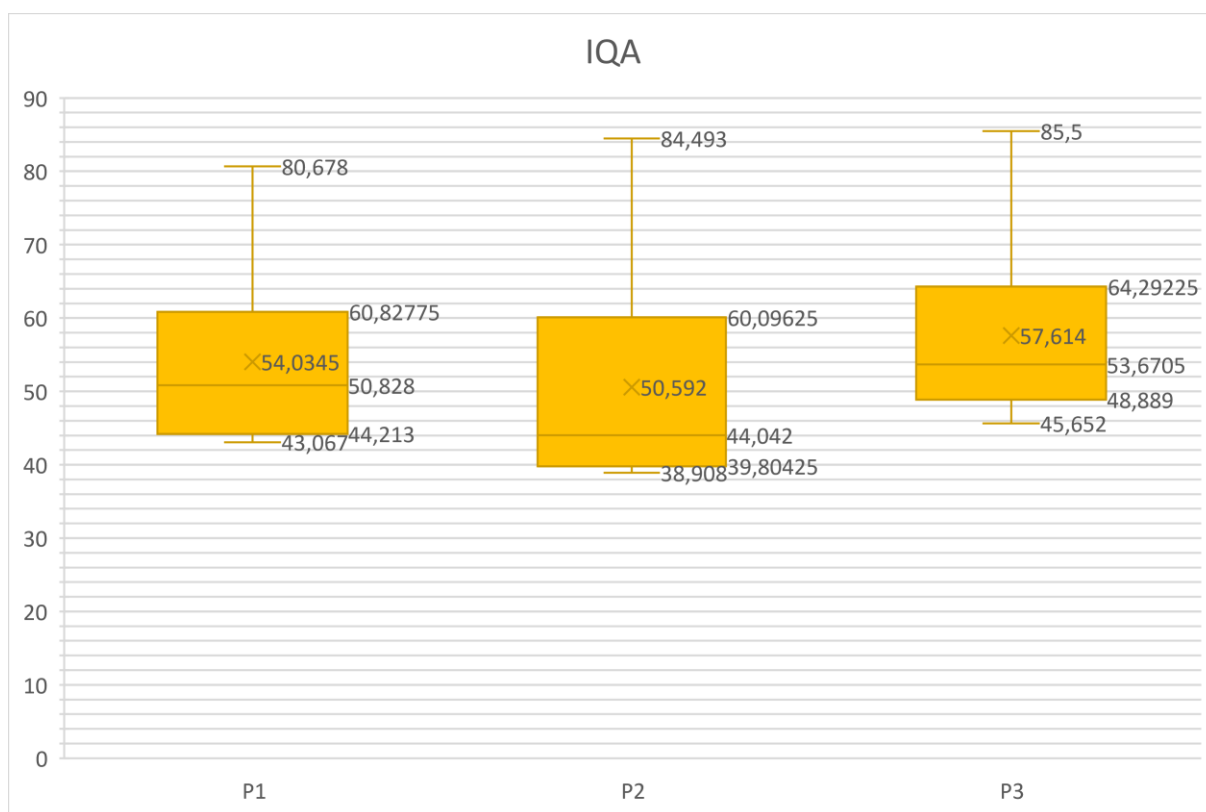
Quanto ao ponto 1 (P1), a qualidade da água tem um comportamento intermediário entre os pontos P2 e P3, oscilando entre ÓTIMA a REGULAR, com valores de IQA concentrados em sua maioria entre 44,12 e 60,82 (Gráfico 7), com ocupação máxima de macrófitas de 41,18%, em junho de 2023.

A correlação entre a ocupação de macrófitas e IQA mostra que, no período seco do ano de 2023, a qualidade da água apresentou-se insatisfatória, fato que corrobora com as características das macrófitas de serem indicadoras de qualidade de água, descrita por Pedralli (2003) que profere que o biomonitoramento por meio de plantas aquáticas pode ser realizado pelo indicativo de sua presença ou ausência, no caso de presença, realizar análise de parâmetros quantificáveis como tamanho da população e atributos morfológicos (PEDRALLI, 2003).

Essa característica das macrófitas é ratificada em diversos estudos como de Amorim et al. (2015), que identificou microalgas associadas à macrófitas no Reservatório Thomaz Osterne

de Alencar, localizado no Distrito de Monte Alverne, Crato-CE, e considera que o reservatório pode estar passando por mudanças na qualidade da água (AMORIM et al., 2015). Outro estudo que demonstra essa característica é o de Santos (2017) que trata da eutrofização no Rio Grande, localizado em Barreiras – BA, e conclui que a presença de macrófitas se dá, provavelmente, pelo lançamento indevido de esgoto in natura e pelo aumento da deposição de matéria orgânica (SANTOS, 2017). A pesquisa de Hegel e Melo (2016), executado na Reserva Particular do Patrimônio Natural Maragoto, localizado em Passo Fundo – RS, que mostra que, em alguns pontos analisados constata-se excesso de macronutrientes devido a resíduos domésticos e industriais que são despejados no corpo hídrico, que permite o desenvolvimento e proliferação das macrófitas (HEGEL; MELO, 2016).

Gráfico 7: IQA dos pontos 1, 2 e 3 especificados em box splot.



Fonte: Autoria própria (2025).

Essa característica das macrófitas de indicadores de qualidade da água pode ser aproveitada em metodologias simplificadas para estipular o IQA de corpos d'água.

Os resultados alcançados são produto da utilização da aerofotogrametria por DRONE, apresentados na figura 15. Com o DRONE tendo fotografado no visível, foi possível fazer o

mapeamento da ocupação das macrófitas, e aproveitar sua característica para estabelecer uma correlação do IQA calculado em laboratório, mostrados na Tabela 9. Com a correlação estabelecida, foi possível buscar uma equação que melhor se adequasse aos dados, atendendo a critérios estatísticos, para que pudesse indicar valores de IQA empíricos, compatíveis com a categorização dos valores de IQA obtidos das análises em laboratório.

Após a busca, a equação que mais se adequava aos dados e a critérios estatísticos foi uma função senoidal de 4 parâmetros, apresentada a seguir:

$$IQA = y_0 + a \sin\left(\frac{2\pi x}{b} + c\right) \quad (3)$$

Onde:

IQA = Índice de Qualidade de Água;

a = 23,0583 (amplitude da onda);

b = 0,599 (período da onda);

c = 3,0032 (fase da onda);

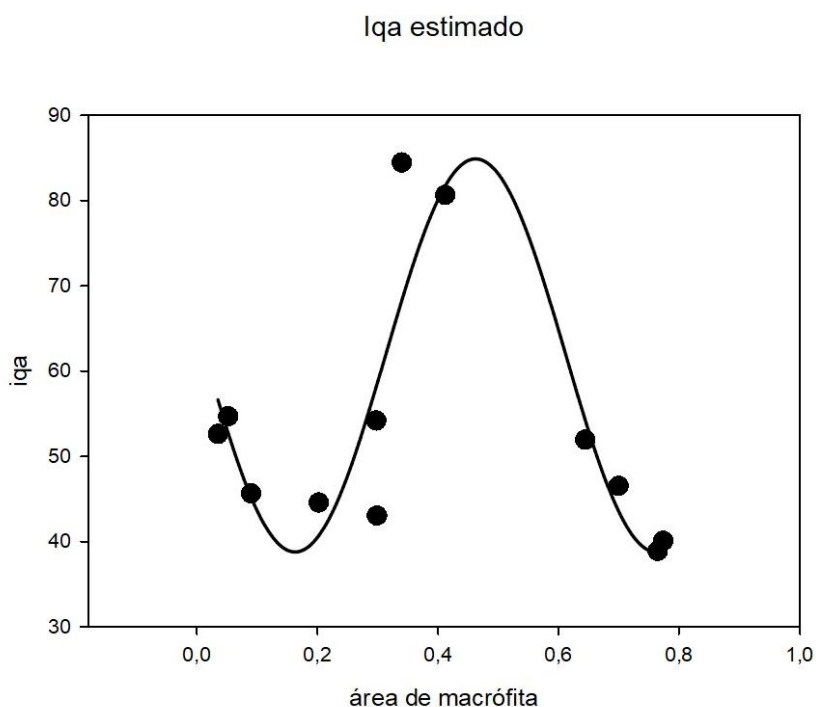
y_0 = 61,8473 (valor médio da onda);

x = valor de ocupação de macrófita.

A equação empírica para determinação tem critérios estatísticos satisfatórios, tendo R^2 de 0,7627, parâmetros estatisticamente significativos, com valores de $p < 0,05$ para cada parâmetro confirmado pelo teste t, a Análise de Variância (ANOVA) apresentou-se altamente significativa, com valores de $F = 125,71$ e $p < 0,0001$, o Teste de Normalidade Shapiro-Wilk mostra que os resíduos seguem uma distribuição normal, com valores de $W = 0,8865$ e $p = 0,1062$ ($p < 0,05$). Todas essas características definem que o modelo é bem ajustados aos dados, de parâmetros significativos e suposições estatísticas válidas. Essas informações estão disponíveis no anexo 5.1.

A equação do IQA empírico é interpretada no gráfico apresentado na Figura 17.

Figura 17: Gráfico gerado pela equação senoidal do IQA empírico.



Fonte: Autoria própria (2025)

Empreendendo a modelagem da equação, atribuindo os valores da ocupação de macrófitas à variável x , é evidenciado que os resultados obtidos foram bem aproximados dos valores obtidos em laboratório. Em 12 ocasiões testadas, em 10 delas, os resultados da equação chegaram próximos aos resultados de laboratório, pertencendo a mesma categorização de IQA. Em duas ocasiões os resultados formam discrepantes, estando em categorias diferentes de qualidade de água. Esses resultados são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11: Modelagem da equação de IQA empírico.

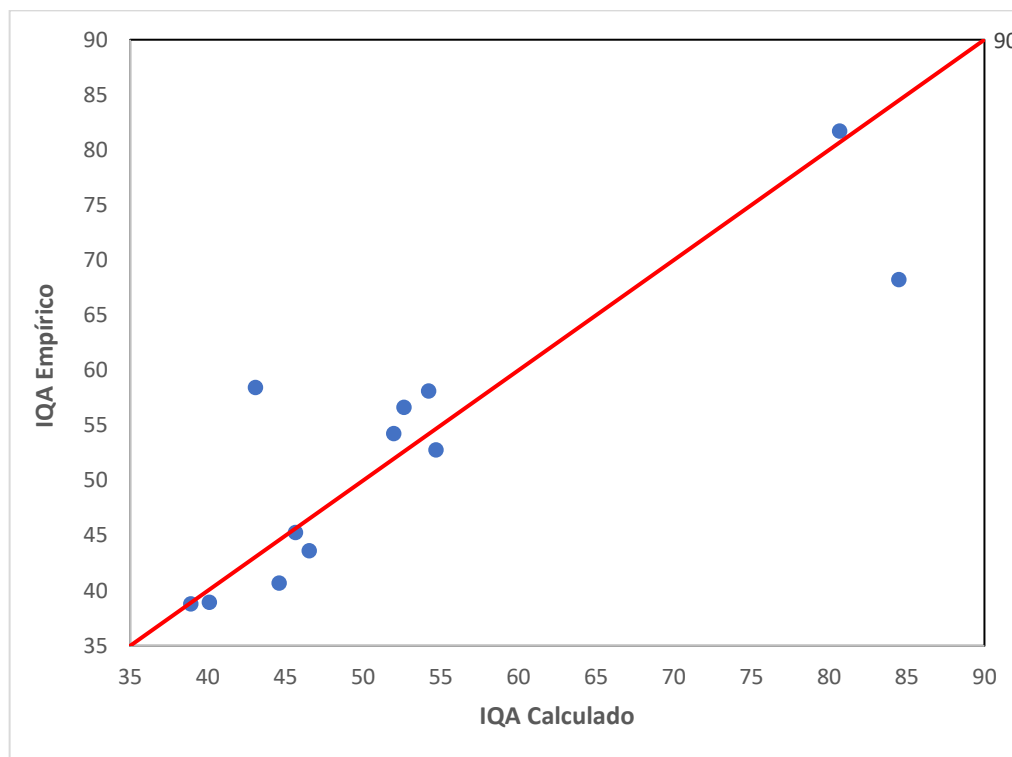
IQA Empírico	IQA Calculado
81,728	80,678
68,223	84,493
38,795	38,908
58,116	54,211
38,955	40,103
45,744	45,652
58,451	43,067
54,273	51,964
52,785	54,701
40,697	44,595
43,620	46,532
56,642	52,64

Fonte: Autoria própria (2025)

A equação de IQA empírico conseguiu acertar 83,33% das ocasiões testadas, isso mostra que a equação foi eficiente em categorizar assertivamente a qualidade da água para um trecho urbano de uma bacia hidrográfica no semiárido, em período seco.

A validação da equação mostra que a equação empírica tem boa capacidade de previsão de valores de IQA, para os dados observados. Os valores médios de Nash-Sutcliffe Efficiency – NSE, de Root Mean Square Error – RMSE e R^2 se mostraram satisfatórios, com a utilização da metodologia LOO. O valor médio de NSE é de 0,703, demonstrando que a equação é muito precisa quanto a indicar corretamente o valor de IQA, pois o valor desse parâmetro está próximo a 1, que é o valor ideal. O valor médio de R^2 é de 0,703, ratificando que, apesar dos dados limitados, a equação é assertiva na maioria dos seus resultados. O valor médio de RMSE é de 7,216, apesar de apresentar um erro absoluto moderado, combinado com NSE e R^2 efetivos, e considerando que os intervalos de IQA são amplos, em torno de 19 unidades, é possível ratificar que a previsibilidade da equação é compatível com valores reais. A visualização da correlação entre IQA Calculado e IQA Empírico são expressos no Gráfico 8.

Gráfico 8: Correlação entre IQA Calculado e IQA Empírico.



Fonte: Autoria própria (2025)

Modelos matemáticos direcionados para aplicação na qualidade de água são técnicas que possibilitam simular condições reais, dentro de uma faixa de incertezas, e prever tendências (TUCCI, 1998). Esse instrumento já é bastante utilizado em estudos ambientais, em técnicas já bastante difundidas como em modelagens de monitoramento de vegetação, erosão de solo e modelagem hídrica.

Técnicas semelhantes foram utilizadas nas pesquisas de Pessoa e Campos (2015) e de Lier (2024) que trabalharam com dados de precipitação e, os estudos apresentaram resultados satisfatórios, quando utilizada a equação senoidal. O estudo de Pessoa e Campos (2015) analisou o ciclo diário de precipitação no município de Fortaleza, no estado do Ceará, no intervalo de 5 minutos, utilizando uma série de dados de 30 anos, e mostrou que uma equação senoidal de dois parâmetros para determinar a hora da ocorrência de mínimo e máximo (PESSOA; CAMPOS, 2015). Já o estudo de Lier (2024) teve por objetivo apresentar um método para prever a intensidade da chuva, e que teve uma equação senoidal para determinar essa informação (LIER, 2024).

Essa combinação de técnicas de aerofotogrametria por drone, geoprocessamento e modelagem matemática, se constituíram numa metodologia viável para indicar, de modo

empírico, a qualidade de água de uma localidade do semiárido em período seco, em que há o aparecimento de macrófitas.

4 CONCLUSÕES

Em período seco do ano hidrológico, as condições ambientais são mais severas para o corpo hídrico. Altas temperaturas associadas a índices pluviométricos a quase zero, alta evapotranspiração, redução do volume e descarte de carga poluidora, contribuem para deterioração da qualidade da água e surgimento de macrófitas em rio no semiárido. Nessa conjuntura posta, é essencial o monitoramento da qualidade da água, para prover suporte a atividade de gestão de recursos hídricos.

A metodologia proposta, que associa a utilização de técnicas de aerofotogrametria por DRONE, de geoprocessamento e de modelagem matemática, apresentou-se viável, podendo ser uma alternativa à determinação de IQA convencional, principalmente quando a determinação do IQA em laboratório seja muito onerosa ou inviável. É uma metodologia de fácil acesso, que teve uma eficiência de 83,33% nos casos analisados.

A utilização dessa metodologia pode amparar a atividade de monitoramento de corpos d'água, quando se tem a presença desordenada de macrófitas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 25 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Drones**. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>. Acesso em: 28 nov. 2024.

AMORIM, C. A.; LUCAS, F. H. R.; RANGEL, A. J.; NASCIMENTO, K. J.; GÓES, M. I. L.; LACERDA, S. R. Microalgas perifíticas associadas à *Nymphoides indica* (L.) O. Kuntze em um reservatório do semiárido cearense. **Caderno de Cultura e Ciência**, Ano X, v. 14, n. 1, set. 2015. Universidade Regional do Cariri – URCA. ISSN 1980-5861.

ARAÚJO, D. N.; SANTOS, J. P.; ARAÚJO, A. L. C. Monitoramento das águas do Rio Mossoró/RN no período de abril/2005 a julho/2006. **Holos**, Natal, v. 1, n. 23, p. 4–41, 2007.

BEZERRA, J. M.; SILVA, P. C. M.; BATISTA, R. O.; PINTO, C. H. C.; FEITOSA, A. P. Análise dos indicadores de qualidade da água no trecho urbano do Rio Apodi-Mossoró em Mossoró-RN, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, supl. 1, p. 3443–3454, 2013.

Calculadora Ambiental. E-licencie. Disponível em < <https://app.e-licencie.com.br/calculadora/>>. Acesso em 04 de outubro de 2024

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas, Critérios de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos e Indicador de Controle de Fontes**. 2022. Disponível em: <https://CETESB.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2023/11/Apendice-D-Metodologia-de-Calculo-dos-Indices-de-Qualidade-das-Aguas-2022.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

DUARTE, R. S. Dois modelos para a convivência do produtor rural com o ambiente do semiárido nordestino. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 33, n. 1, jan./mar. 2002.

HEGEL, C. G. Z.; MELO, E. F. R. Q. Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água dos arroios da RPPN Maragato. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR), v. 9, n. 3, p. 673-693, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n3p673-693>.

IBGE. **Mossoró: Panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>. Acesso em: 29 nov. 2024.

IRGANG, B. E.; GASTAL JR., C. V. S. **Macrófitas aquáticas da planície costeira do RS**. Porto Alegre: CPG-Botânica/UFRGS, 1996. 290 p.

LEMOS FILHO, L. C. A.; SOBRINHO, J. E.; OLIVEIRA JÚNIOR, H. S. Clima e Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Apodi-Mossoró RN. In: CARVALHO, R. G. (Org.). **Rio Apodi-Mossoró: meio ambiente e planejamento**. Mossoró: Edições UERN, 2022. p. 39-65.

LIER, Q. J. V. Obtenção da intensidade das chuvas a partir de dados pluviométricos coletados numa estação automatizada: o caso de Piracicaba, SP. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 32, e027452, 2024. ISSN 2526-7043. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v32.e027452>.

LUCENA, C. Y. S.; SOUZA, J. J. L. de L.; SILVA, B. Q.; REIS, J. S.; LUCENA, R. L. A Serra de Santana no semiárido nordestino: aspectos geográficos e possibilidade de práticas sustentáveis. **Revista Geográfica de América Central**, nº 70(1), p. 17, jan./jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.17>.

OCHUNGO, E.; OUMA, G.; OBIERO, J.; ODERO, N. Water quality index for assessment of potability of groundwater resource in Langata Sub County, Nairobi-Kenya. **American Journal of Water Resources**, v. 7, p. 62–75, 2019.

PEDRALLI, G. **Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água: alternativas para usos múltiplos de reservatórios**. In: THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**. Maringá: EDUEM, 2003. p. 171-188.

PESSOA, F. E. P.; CAMPOS, J. N. B. Ciclo diário de precipitações pluviais em intervalos de cinco minutos no município de Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 195-204, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140116>.

ROCHA, A. B.; BACCARO, C. A. D.; SILVA, P. C. M.; CAMACHO, R. G. V. Mapeamento geomorfológico da bacia do Apodi-Mossoró, RN. **Mercator**, v. 8, n. 16, p. 201–216, 2009.

ROCHA, J. L. S.; REGO, N. A. C.; SANTOS, J. W. B.; OLIVEIRA, R. M.; MENEZES, M. Indicador integrado de qualidade ambiental aplicado à gestão da bacia hidrográfica do rio Jiquiriçá, BA, Brasil. **Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 89–101, 2010.

SANTOS, C. A. P. Macrófitas bioindicadoras em trecho urbano do Rio Grande – oeste da Bahia. **Caderno de Pesquisa**, Santa Cruz do Sul, v. 29, n. 1, p. 25-35, maio/ago. 2017. ISSN on-line: 1677-5600. DOI: 10.17058/cp.v29i2.9378.

SEBRAE. **Mossoró**. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/mossoro?selector245id=geo2401107>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. Aspectos econômicos, sociais e ambientais da bacia hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró. In: SILVA, G. H. G.; CAMARGO, A. F. M. (Orgs.). **A Bacia do Rio Apodi-Mossoró: aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no semiárido do Rio Grande do Norte**. Mossoró: EDUFERSA, 2022. p. 123-135.

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). **Delimitação do semiárido: relatório final**. Recife: 2021. 272 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 668 p.

VALE, R. A. V. **Análise de índices de qualidade de água da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró, Brasil**. 2020. 55 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo em Água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.

XAVIER, J. O.; CAMPOS, M. C. S.; RIBEIRO, S. T. M.; MOTA, H. R. **Macrófitas aquáticas: caracterização e importância em reservatórios hidrelétricos**. Belo Horizonte: Cemig, 2021. 96 p.: il. fot. ISBN 978-85-87929-85-3.

5 ANEXOS

Relatório de Análise Estatística da Equação Senoidal Para IQA Empírico.

Nonlinear Regression

terça-feira, 29 de outubro de 2024 20:57:19

Data Source: Data 1 in Notebook1

Equation: Waveform; Sine, 4 Parameter

$\pi=3,14159265358979$

$f = y_0 + a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot x / b + c)$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
0,8733	0,7627	0,6737	8,4256

	Coefficient	Std. Error	t	P
a	23,0583	4,9228	4,6840	0,0016
b	0,5990	0,0379	15,8214	<0,0001
c	3,0032	0,2379	12,6262	<0,0001
y0	61,8473	3,0842	20,0529	<0,0001

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	35697,2359	8924,3090	125,7110	<0,0001
Residual	8	567,9254	70,9907		
Total	12	36265,1613	3022,0968		

The F-test compares the regression model to the zero model.

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	1825,3732	608,4577	8,5710	0,0070
Residual	8	567,9254	70,9907		
Total	11	2393,2986	217,5726		

The F-test compares the regression model to a constant model whose value is the mean of the observations.

The results of an F-test should only be interpreted for nested models.

Statistical Tests:

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0,1062)
W Statistic= 0,8865 Significance Level = <0,0001

Constant Variance Test (Spearman Rank Correlation) Passed (P = 0,0749)