

## Caracterização dos sistemas ambientais de municípios em colapso hídrico no estado da Paraíba

### *Characterization of the environmental systems of municipalities in water collapse in the state of Paraíba*

Ayrton Flavio Nascimento de Sousa<sup>1</sup>; Lorena Rayssa Cunha França<sup>2</sup>; Mateus Clemente de Lacerda<sup>3</sup>; Gabriele de Souza Batista<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, Brasil. Email: ayrtonflavions@gmail.com  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-2881-211X>
- <sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, Brasil. Email: lorenarayssacf@hotmail.com  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6261-2753>
- <sup>3</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, Brasil. Email: mateus.clemente@outlook.com  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6811-669X>
- <sup>4</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, Brasil. Email: gabriele.souza@estudante.ufcg.edu.br  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1518-4052>

**Resumo:** O Semiárido Brasileiro, especialmente a Região Nordeste, enfrenta o fenômeno de secas, que tem seus efeitos adversos potencializados com a degradação da qualidade da água e gestão inadequada dos recursos hídricos. O estado da Paraíba apresenta o menor índice de disponibilidade hídrica per capita do Brasil, com classificação crítica. Assim, o estudo busca mapear e caracterizar os sistemas ambientais dos reservatórios que abastecem pequenos municípios da Paraíba: de Bananeiras/PB, Casserengue/PB, Esperança/PB, Picuí/PB, Pochinhos/PB, Remígio/PB e Solânea/PB. Utilizou-se ferramentas de sensoriamento remoto, de sistemas de informações sobre as bacias hidrográficas e de dados sobre qualidade da água, entre os anos de 2010 a 2020. A partir da análise dos dados, verificou-se que a redução de intensidade do regime pluviométrico associada a substituição de vegetação nativa por áreas de pastagem acarretou diversas consequências para o sistema ambiental dos municípios estudados, afetando o bem-estar e a qualidade da biota local. A recarga hídrica insuficiente alterou negativamente a qualidade da água nesses reservatórios, com destaque para o aumento da turbidez e do fósforo total. Desse modo, o trabalho ressalta a importância de práticas sustentáveis e de uma gestão integrada dos recursos hídricos para garantir a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas ambientais locais.

**Palavras-chave:** Semiárido brasileiro; Bacias hidrográficas; Qualidade da água.

**Abstract:** The Brazilian Semi-Arid region, especially the Northeast, faces the phenomenon of droughts, whose adverse effects are exacerbated by the degradation of water quality and inadequate water resource management. The state of Paraíba has the lowest per capita water availability index in Brazil, with a critical classification. Thus, the study aims to map and characterize the environmental systems of the reservoirs that supply small municipalities in Paraíba: Bananeiras, Casserengue, Esperança, Picuí, Pochinhos, Remígio, and Solânea. Remote sensing tools, information systems about the watersheds, and water quality data from 2010 to 2020 were utilized. The data analysis revealed that the reduced intensity of the rainfall regime, combined with the replacement of native vegetation by pasture areas, resulted in various consequences for the environmental systems of the studied municipalities, affecting the well-being and quality of the local biota. Insufficient water recharge negatively impacted water quality in these reservoirs, notably increasing turbidity and total phosphorus levels. Therefore, the study highlights the importance of sustainable practices and integrated water resource management to ensure the long-term sustainability of local environmental systems.

**Keywords:** Brazilian semi-arid; Watersheds; Water quality.

## 1. Introdução

A água é um recurso natural fundamental e está presente em diversos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no planeta. A disponibilidade de água, em quantidade suficiente e de boa qualidade, é indispensável para os seres vivos, assim como para o desenvolvimento da sociedade e economia de uma região.

Algumas regiões do mundo são marcadas por um baixo índice pluviométrico, como o Nordeste do Brasil, que tem a maior parte de sua área inserida no semiárido. Essas condições físicas e climáticas conduzem à formação de uma rede hidrográfica constituída por corpos hídricos intermitentes, tornando o território altamente vulnerável e suscetível aos efeitos adversos da seca (LEMONS, 2020; MENDES *et al.*, 2022). A realidade se agrava com a degradação da qualidade da água e a gestão ineficiente dos recursos hídricos nessa região, diante de um crescimento das demandas para abastecimento humano e, principalmente, para as atividades industriais e a agropecuária.

Os desafios relacionados à segurança hídrica e a qualidade da água tendem a se acentuar nas três dimensões das implicações da seca: ambiental, social, econômica e política (BRITO *et al.*, 2020; BRITO *et al.*, 2022). Assim, os estudos integrados têm um papel importante dentro da natureza, fato que se justifica os inúmeros trabalhos que buscam a visão sistêmica do meio ambiente (COSTA; OLIVEIRA, 2019). A interdisciplinaridade, além de contribuir para o entendimento dos sistemas ambientais, pode auxiliar no processo de tomada de decisão para reduzir ou eliminar os impactos negativos causados por esse evento extremo, permitindo uma abordagem mais abrangente e um enfrentamento mais eficaz.

Nos últimos anos, alguns municípios do estado da Paraíba estão vivenciando um colapso hídrico resultante da combinação de diversos fatores: variações climáticas, longos períodos de estiagem, uso descontrolado da água e a falta de gestão dos mananciais (SOUSA *et al.*, 2023). Além de comprometer o abastecimento da população e a economia dos municípios, o baixo volume dos reservatórios causam alterações no meio em que estão inseridos, desde a alteração na vegetação até a degradação da qualidade da água dos corpos hídricos (FREITAS; ARAÚJO, 2021; PEREIRA *et al.*, 2020). De acordo com o estudo de Alves *et al.* (2024), que estimou o Índice de Segurança Hídrica (ISH) de 20 municípios do estado da Paraíba, com população de até 20 mil habitantes, existe uma vulnerabilidade hídrica na área, de modo que 50,0% dos municípios apresentaram o ISH médio e o restante obteve classificação baixa.

Diante disso, este trabalho objetiva elaborar o mapeamento e caracterizar os sistemas ambientais dos reservatórios atualmente colapsados e que abastecem os pequenos municípios de Bananeiras/PB, Casserengue/PB, Esperança/PB, Picuí/PB, Pocinhos/PB, Remígio/PB e Solânea/PB, utilizando ferramentas de sensoriamento remoto, sistemas de informações sobre as bacias hidrográficas e bancos de dados da qualidade da água dos corpos hídricos analisados. Assim, o estudo não aborda somente a caracterização físico-geográfica das áreas de estudo, mas também faz uma avaliação dos sistemas ambientais diante do contexto da análise integrada da paisagem, do uso e ocupação do solo e da alteração da qualidade das águas dos reservatórios.

## 2. Metodologia

De modo a atingir o objetivo proposto anteriormente, o estudo baseia-se em quatro etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 1 e detalhadas neste item.

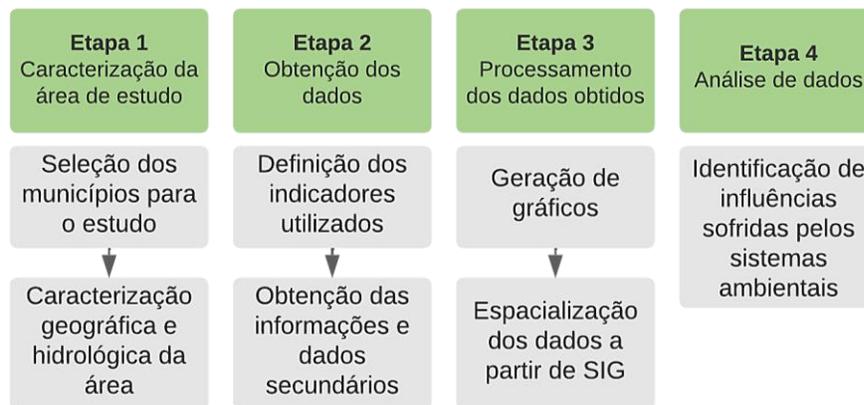


Figura 1 – Fluxograma metodológico do estudo.

Fonte: Autores (2024).

## 2.1 Caracterização da área de estudo

A Paraíba está localizada no nordeste brasileiro e possui 223 municípios, dos quais 213 (95,5%) possuem população menor que 50.000 habitantes. Seu território se concentra em dois biomas: Mata Atlântica e Caatinga, sendo o segundo predominante em todo o estado, enquanto a Mata Atlântica se concentra apenas na região litorânea. Salienta-se que as ações antrópicas de urbanização predominam no estado, ocupando cerca de 65% do seu território. As características hidro geológicas da Paraíba são desfavoráveis, visto que possui o segundo menor índice de disponibilidade hídrica per capita do Brasil, incluso na classe de situação crítica (AESA, 2006).

Tendo em vista o objetivo do estudo quanto à identificação de consequências sofridas pelos sistemas ambientais em municípios que passam por colapso hídrico no período de estiagem registrado na última década, limitou-se a amostra de municípios àqueles de pequeno porte (com menos de 50 mil habitantes, segundo a classificação utilizada no Censo Demográfico de 2010 do IBGE), participantes do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 003/2019 firmado entre a Fundação Nacional de Saúde (Funasa) e a Universidade Federal da Paraíba (UFCG) para a elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico. A situação de colapso hídrico desses municípios foi identificada a partir de estudo realizado na etapa do diagnóstico técnico-participativo do respectivo TED (FUNASA; UFCG; 2021).

O mapa da Figura 2 apresenta os municípios selecionados para o trabalho, seguido da caracterização geográfica e pluviométrica da área de estudo.

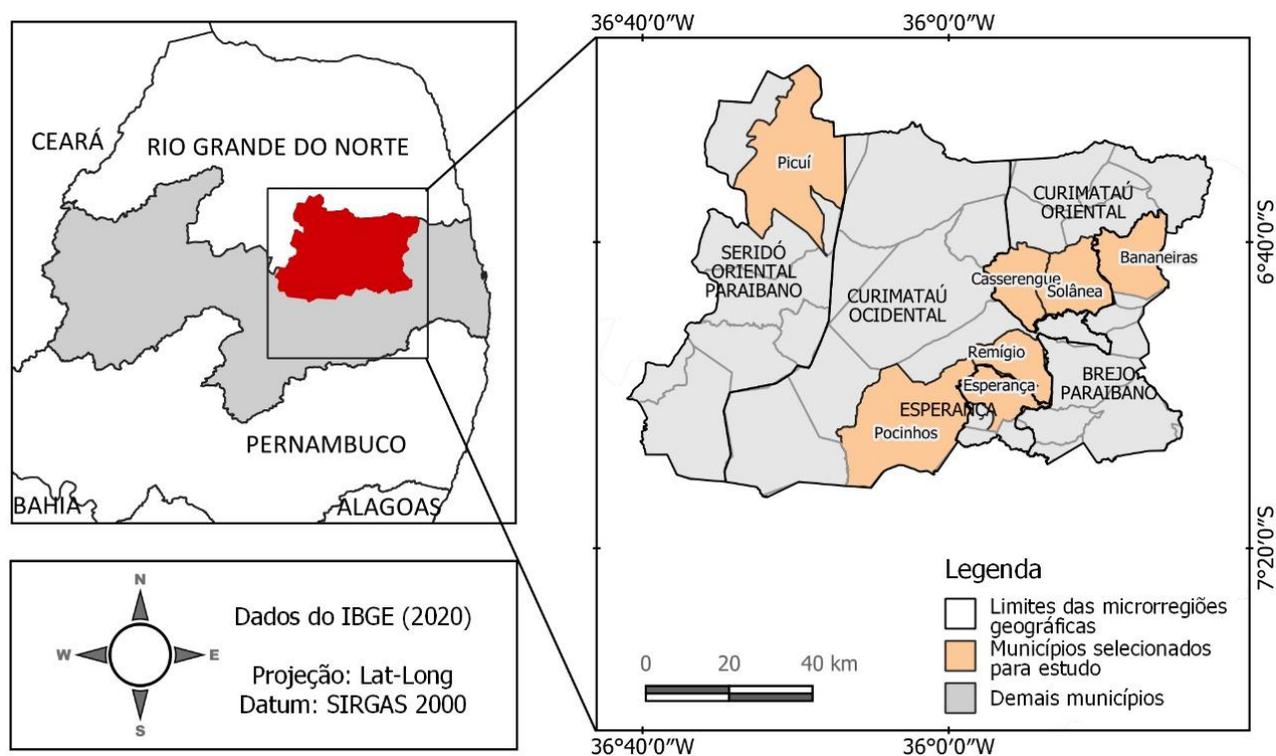


Figura 2 – Localização dos municípios estudados na Paraíba.

Fonte: Autores (2024).

Os municípios englobados no estudo estão localizados em duas mesorregiões paraibanas: Borborema e Agreste. O município de Picuí/PB, localizado na Borborema, faz parte da microrregião do Seridó Oriental Paraibano. Já os demais municípios fazem parte do Agreste Paraibano, sendo Pocinhos/PB e Remígio/PB situados na microrregião do Curimataú Ocidental, Casserengue/PB e Solânea/PB no Curimataú Oriental, Bananeiras/PB no Brejo Paraibano e Esperança/PB na microrregião de Esperança, conforme exibido na Figura 2. A Tabela 1 apresenta dados de populacionais, bem como dados econômicos (produto interno bruto - PIB per capita) e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM para cada um dos municípios estudados.

Tabela 1 – População total e PIB per capita por município.

Município	População Total (habitantes - 2010)	PIB per capita (R\$/hab.ano – 2019)	IDHM (2010)
Bananeiras/PB	21.851	10.316,32	0,568
Casserengue/PB	7.058	8.200,40	0,514
Esperança/PB	31.095	13.352,01	0,623
Pocinhos/PB	17.032	13.069,68	0,591
Picuí/PB	18.222	10.316,32	0,608
Solânea/PB	26.693	11.395,82	0,595
Remígio/PB	17.581	8.884,28	0,607

Fonte: IBGE (2010; 2019).

Como pode-se perceber na Tabela 1, todos os municípios possuem população variando entre 7.000 e 32.000 habitantes, enquadrados na classe de municípios de pequeno porte. O PIB per capita dos municípios, equivalente à produção econômica por habitante, estão todos abaixo da média estadual, igual a R\$ 16.108,00/hab.ano. Quanto ao IDHM, a Paraíba apresentou resultado de 0,658, de forma que os municípios em estudo possuem valores abaixo da média do estado.

Com relação à precipitação de chuva na área de estudo, o mapa da Figura 3 apresenta as isoietas com a pluviometria anual média, com base nos dados coletados no Portal Hidroweb (ANA, 2024). É perceptível que os municípios de Picuí/PB e Pocinhos/PB pertencem a uma área de baixíssima pluviosidade (400 a 600 mm). Já para os municípios de Bananeiras/PB e Solânea/PB, a incidência de chuva é mais intensa, com média do índice pluviométrico anual variando de 800 a 1100 mm. Os demais municípios (Casserengue/PB, Remígio/PB e Esperança/PB) encontram-se numa zona com índices variando entre 600 e 800mm de chuva por ano.

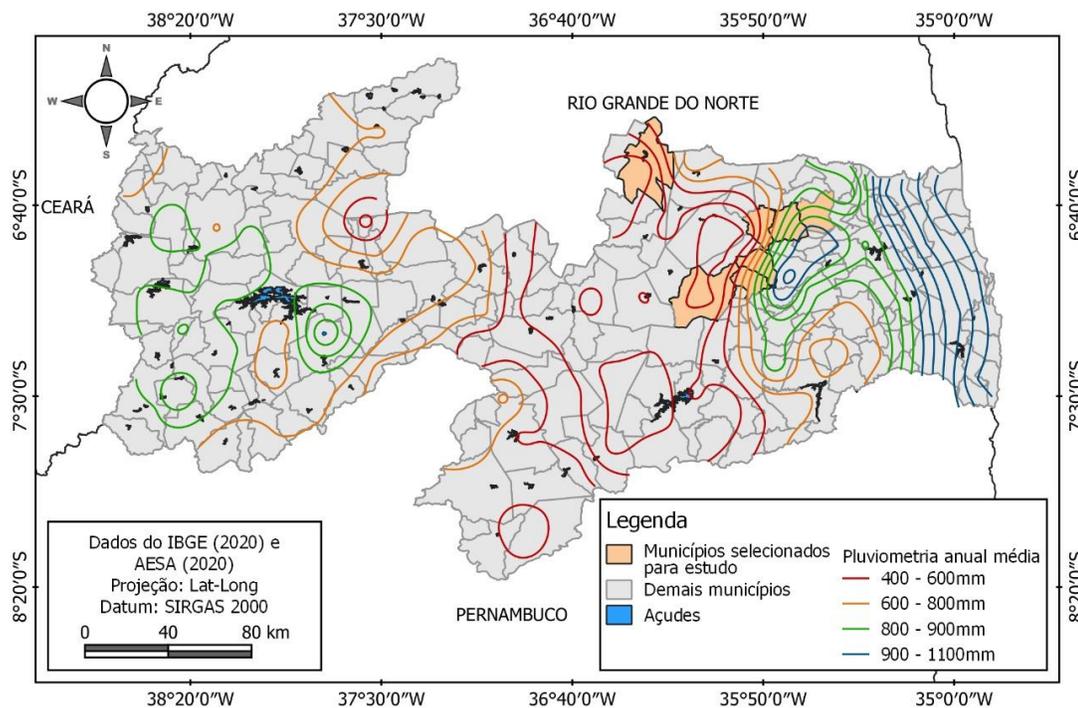


Figura 3 – Mapa da pluviosidade anual média do estado da Paraíba.

Fonte: Autores (2024).

## 2.2 Obtenção dos dados

Para compreender a dinâmica dos sistemas ambientais da região quando relacionados à menor ocorrência de eventos hidro meteorológicos, foram selecionados indicadores e informações que retratassem aspectos físicos, biológicos e de ação antrópica na área de estudo entre os anos de 2010 e 2020, período que inclui o intervalo de estiagem, semelhantemente aos estudos de Farias e Mendoza (2022), Mendes *et al.* (2021) e Oliveira e Cestaro (2016). A maior parte desses indicadores foi obtida através de bancos de dados como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), MapBiomias e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A lista de indicadores utilizados encontra-se na tabela 2.

Tabela 2 – Indicadores utilizados para análise dos aspectos.

Aspecto analisado	Indicador	Descrição	Fonte
Disponibilidade hídrica	Superfície de água	Área do território ocupada pelos corpos hídricos	MapBiomias (2022)
Climatologia	Precipitação média annual	Lâmina média de precipitação acumulada anualmente	AESA (2006)
Vegetação	Qualidade da pastagem	Nível de degradação da pastagem a partir de índices calculados por técnicas de sensoriamento remoto	MapBiomias (2022)
Fauna	Produção pecuária bovina	Cabeças de boi produzidas anualmente	IBGE (2020)
Ocupação antrópica	Uso e ocupação do solo	Estratificação da ocupação do solo de acordo com o tipo	MapBiomias (2022)
Qualidade de água	Concentração de fósforo	Níveis médios dos parâmetros de qualidade citados em reservatórios da microrregião	ANA (2020) e AESA (2022)
	Demanda bioquímica de oxigênio		
	Oxigênio dissolvido		
	Turbidez		

Fonte: Autores (2024).

Outros aspectos naturais físicos, importantes para a análise realizada, também foram considerados durante a etapa de obtenção das informações. Entretanto, durante a pesquisa notou-se uma carência de dados que os mensurassem, principalmente no caso município de pequeno porte localizados no Nordeste.

## 2.3 Processamento dos dados

A análise dos dados coletados na etapa anterior foi realizada a partir da geração de gráficos e mapas. Os gráficos com a série histórica dos indicadores para cada um dos municípios selecionados foram gerados a partir do software Microsoft Excel.

Nos gráficos produzidos, a média dos indicadores para o estado da Paraíba também foi adicionada como parâmetro de comparação com os demais municípios. Além disso, com o objetivo de facilitar a visualização dos efeitos nos aspectos analisados, os valores relativos ao ano de 2010 foram considerados como base para a série histórica.

Já para fins de análise da influência do período de estiagem nos aspectos de disponibilidade hídrica, climatologia (índices pluviométricos anuais médios), vegetação e ocupação antrópica, os indicadores obtidos foram especializados através de mapas produzidos no software QGIS 3.16 e correlacionados com os limites dos municípios selecionados para o estudo.

## 2.4 Análise dos dados

De posse dos dados, gráficos e mapas produzidos, foram realizadas reflexões acerca da existência e do nível dos impactos nos sistemas ambientais causados pelo período de escassez de água na área de estudo. Nessa etapa buscou-se

correlacionar os diferentes aspectos levantados através do confronto de dados, de modo a identificar padrões entre eles.

Neste estudo, também foram analisados os valores médios dos parâmetros turbidez, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Fósforo Total (FT) dos reservatórios que passaram pelo colapso hídrico nas microrregiões da Paraíba, a partir de dados obtidos na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Além disso, utilizou-se os valores dos relatórios elaborados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs).

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento e estabelece as condições de lançamento de efluentes, o controle da qualidade da água de mananciais objetiva a proteção da saúde dos usuários e a garantia do equilíbrio da vida aquática.

Conforme Von Sperling (2014), a turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água. A turbidez é uma característica que depende da presença de partículas orgânica (areia, silte e argila) e detritos orgânicos, bactérias e plâncton em geral. Em níveis elevados, pode afetar os corpos d'água de forma biológica, química e física, tendo em vista a redução da penetração de raios solares, limitando a realização da fotossíntese e a reposição de oxigênio na água (TOMPERI *et al.*, 2020).

O Oxigênio Dissolvido (OD) é essencial para os organismos aeróbios, seres que sobrevivem na presença de oxigênio. Na estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução da sua concentração no meio. Dependendo da magnitude deste fenômeno, podem vir a morrer diversos seres aquáticos, inclusive os peixes. Caso o oxigênio seja totalmente consumido, tem-se as condições anaeróbias (ausência de oxigênio), com geração de odores desagradáveis (VON SPERLING, 2014). Além disso, de acordo com Raj *et al.* (2021), o OD apresenta um papel fundamental no processo de autodepuração dos corpos d'água e sua concentração é variável nos níveis espacial e temporal.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea. Von Sperling (2014) afirma que a DBO determina, de forma indireta, o teor de matéria orgânica nos corpos d'água, sendo, portanto, uma indicação do potencial do consumo de oxigênio dissolvido.

O acúmulo de fósforo é um dos fatores limitantes de produtividade nos corpos hídricos e, juntamente com o nitrogênio, são apontados como principais causadores da eutrofização nos ecossistemas aquáticos. Esse nutriente pode ter origem de fontes naturais (presentes na composição de rochas, carreado pelo escoamento superficial da água da chuva, material particulado presente na atmosfera e resultante da decomposição de organismos alóctone) ou por interferência humana, por meio de descargas de esgotos sanitários, efluentes industriais e por lixiviação de áreas agrícolas (CETESB, 2018; JUPP *et al.*, 2020). A Tabela 2 apresenta os valores padrões estabelecidos para os parâmetros turbidez, OD, DBO e fósforo total, pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e para a classe das águas doces.

Tabela 3 – Padrões de qualidade da água para corpos hídricos.

Parâmetros	Classe I	Classe II	Classe III
Turbidez (UNT)	Até 40	Até 100	Até 100
Oxigênio Dissolvido (mg/L O <sub>2</sub> )	Superior a 6	Superior a 5	Superior a 4
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)*	Até 3	Até 5	Até 10
Fósforo Total (mg/L P)	Até 0,02	Até 0,03	Até 0,05

Fonte: Adaptado de CONAMA (2005).

### 3. Resultados e discussão

Dentre as consequências de um colapso hídrico resultante de períodos de estiagem está a deterioração da qualidade da água dos mananciais com desequilíbrio do sistema aquático. A redução do volume dos corpos d'água pode influenciar nas reações químicas do meio, desencadear processos de poluição e causar impactos negativos na qualidade de vida dos seres

vivos (ROCHA JÚNIOR *et al.*, 2018). Assim, faz-se necessário o monitoramento de parâmetros físicos e químicos da água para proteção deste recurso natural e saber se ele está apropriado para seus usos.

A Figura 4 apresenta os valores médios da turbidez nos açudes das microrregiões colapsadas. É possível constatar que, entre os anos de 2016 e 2020, o parâmetro apresentou valores elevados, chegando a aproximadamente 92 UNT, cerca de 56,5% mais alto que o permitido para águas de classe I. Provavelmente, isso ocorre devido a menor quantidade de água nos reservatórios e, conseqüentemente, uma menor diluição da matéria em suspensão presente nos mananciais, assim como observado por Sousa *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2020).

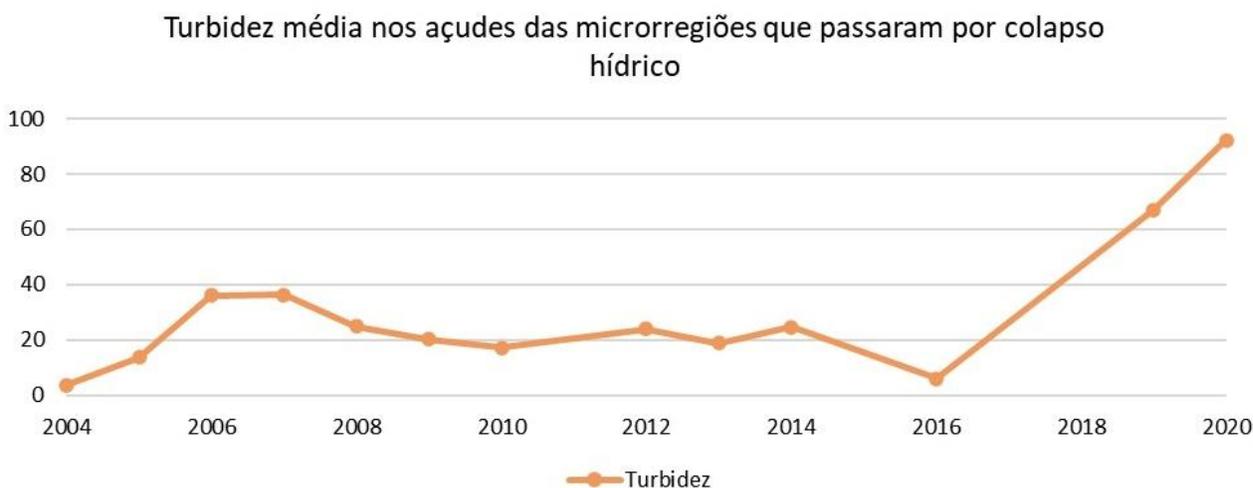


Figura 4 – Valores médios da turbidez entre os anos de 2004 e 2020.  
Fonte: Autores (2024).

Apesar de estar dentro do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357/2005 para as classes das águas doces II e III, os altos níveis de turbidez podem reduzir a penetração da radiação solar no corpo d'água e dificultar a ocorrência da fotossíntese, reduzindo a reposição do oxigênio no meio e causando um desequilíbrio no sistema aquático (TOMPERI *et al.*, 2020).

Ademais, as partículas causadoras da elevada turbidez podem interferir na eficiência dos processos de tratamento da água para consumo humano, servindo de proteção para organismos patogênicos, o que inviabiliza a ação do desinfetante sobre eles. Este risco fica comprovado nos Diagnósticos Técnico-participativos dos Planos Municipais de Saneamento Básico (FUNASA; UFCG, 2021), pois os municípios de Bananeiras, Esperança, Remígio e Solânea apresentaram valores fora do padrão de potabilidade estabelecido na Portaria n° 888/2021 do Ministério da Saúde, entre os anos de 2016 e 2019.

Outro parâmetro que apresentou comportamento alarmante em todos os anos analisados foi o fósforo total. De acordo com a Figura 5, os valores médios de FT variaram de 0,171 mg/L P e 0,583 mg/L P, em média 94,7%, 92,0% e 86,7% acima dos padrões estabelecidos na Resolução CONAMA n° 357/2005 para as classes das águas doces I, II e III, respectivamente. Ferreira *et al.* (2023) reforçam que além de ser um indicativo da presença de águas residuárias nos mananciais, os níveis elevados de FT podem resultar na eutrofização, causada pelo excesso de nutrientes e que provoca o surgimento excessivo de organismos como algas e cianobactérias. Um ambiente eutrofizado acaba adquirindo coloração turva, aumento da turbidez e queda na quantidade de oxigênio, causando a morte de várias espécies aquáticas.



Figura 5 – Valores médios da concentração de fósforo total entre os anos de 2004 e 2020.  
 Fonte: Autores (2024).

No que diz respeito a demanda bioquímica de oxigênio e ao oxigênio dissolvido, ambos os parâmetros estiveram dentro dos padrões exigidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para as águas doces, como apresentados na Figura 6 e 7. Os valores médios de OD se mantiveram acima de 6 mg/L, o que pode ter contribuído para manter o equilíbrio dos ambientes aquáticos dos reservatórios durante todo o período de colapso. Observa-se uma resiliência dos reservatórios aos impactos do colapso hídrico, com uma compensação entre os níveis de carga orgânica biodegradável (DBO) e seu agente degradante (OD), apesar da possível eutrofização indicada pelos níveis de fósforo total (Figura 5).

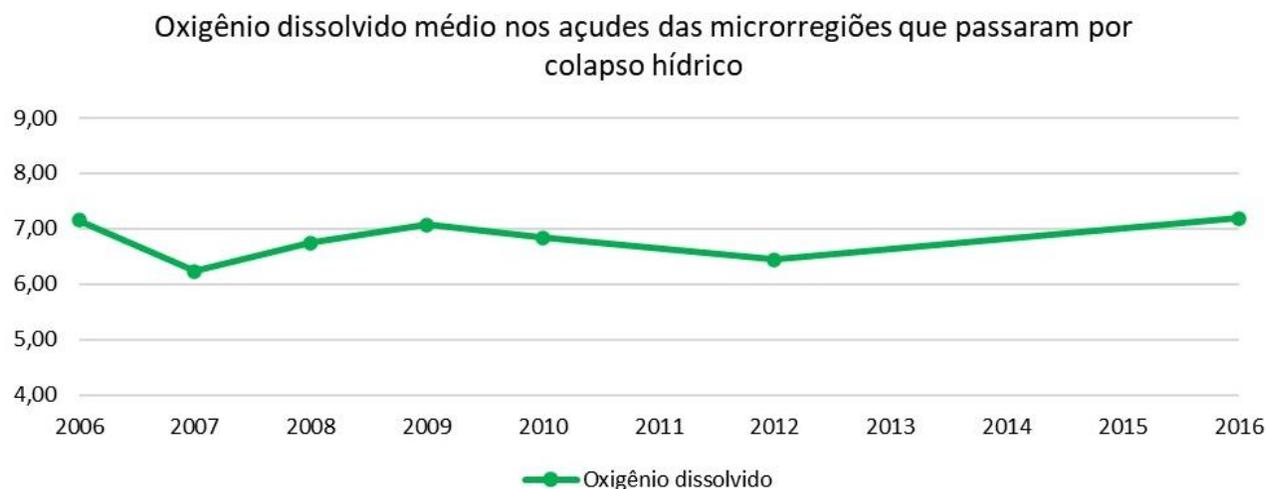
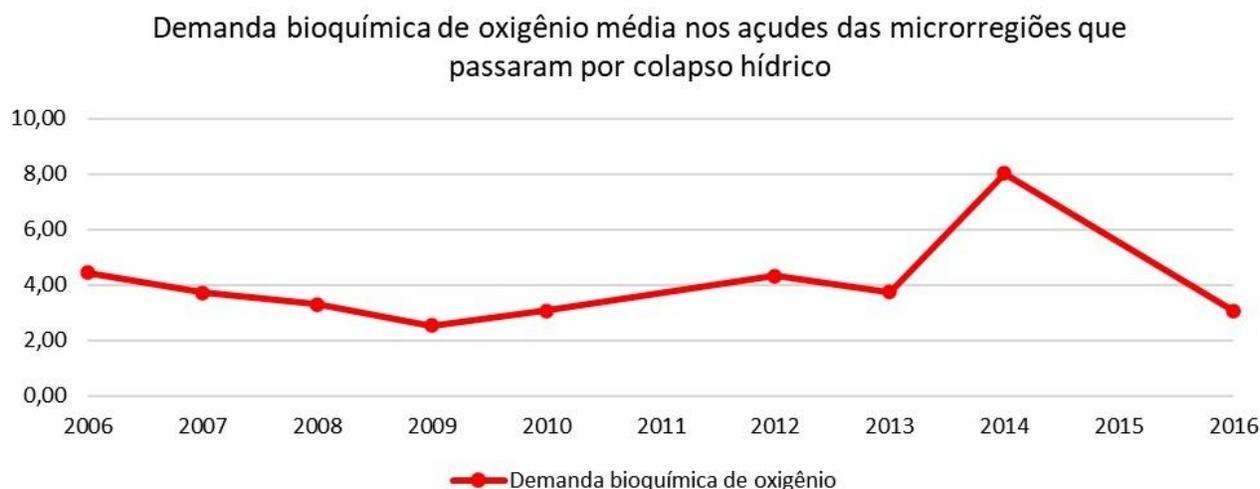


Figura 6 – Valores médios do oxigênio dissolvido entre os anos de 2004 e 2020.  
 Fonte: Autores (2024).



*Figura 7 – Valores médios da demanda bioquímica de oxigênio entre os anos de 2004 e 2020.  
Fonte: Autores (2024).*

A dinâmica antrópica de ocupação do solo da região durante o período de estiagem pode ser observada através da Figura 8. Percebe-se um processo de regressão da formação natural savânica a partir do ano de 2010 até o ápice do colapso hídrico nos municípios das microrregiões Seridó Oriental e Curimataú Ocidental como Picuí/PB e Pocinhos/PB, ao mesmo tempo em que há o surgimento de grandes áreas de pastagem. A substituição da vegetação nativa por pastagens pode levar ao desmatamento e à erosão do solo, resultando em maior sedimentação nos açudes. Isso pode afetar negativamente a qualidade da água e inviabilizar a recarga hídrica, por haver alteração nos padrões de infiltração e evaporação (Oliveira *et al.*, 2023). Por outro lado, os municípios do Curimataú Oriental e do Brejo Paraibano apresentaram um aumento em suas formações naturais.

Observa-se também o desaparecimento das lâminas d'água de grande parte dos corpos hídricos da região, causado pela baixa pluviosidade durante o período analisado, o que prejudica o desenvolvimento da agropecuária em suas margens. Os gráficos mostrados na Figura 9 ajudam a visualizar o processo de transição do uso do solo através da apresentação das porcentagens de cada classe de ocupação do solo nos municípios selecionados para os três anos analisados.

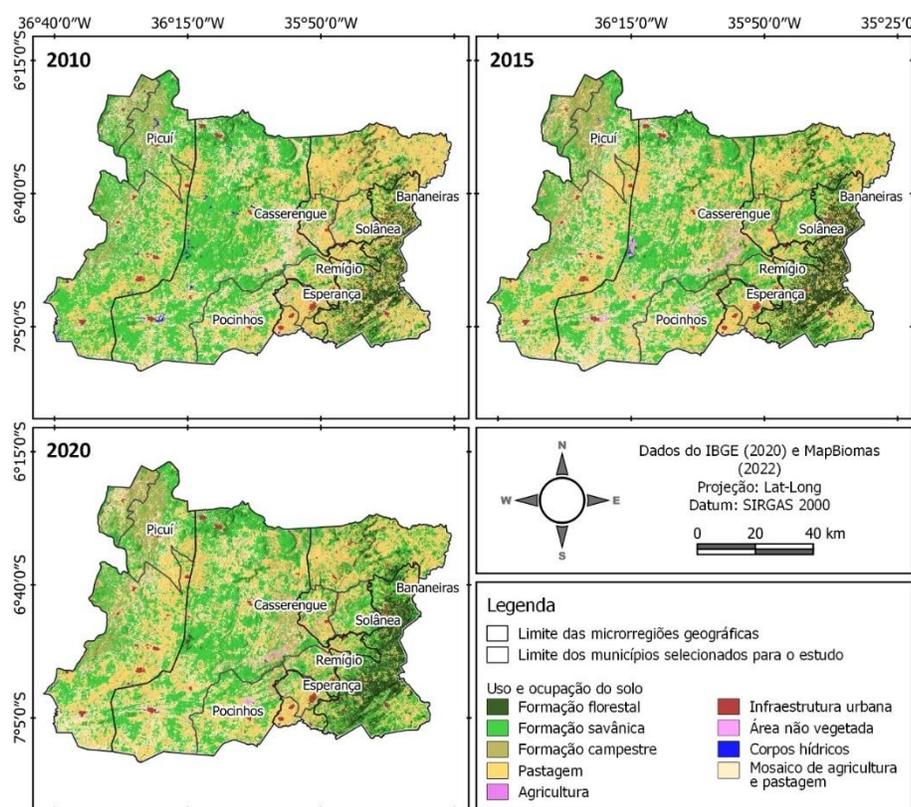


Figura 8 – Uso e ocupação do solo para os municípios em estudo.  
Fonte: Autores (2024).

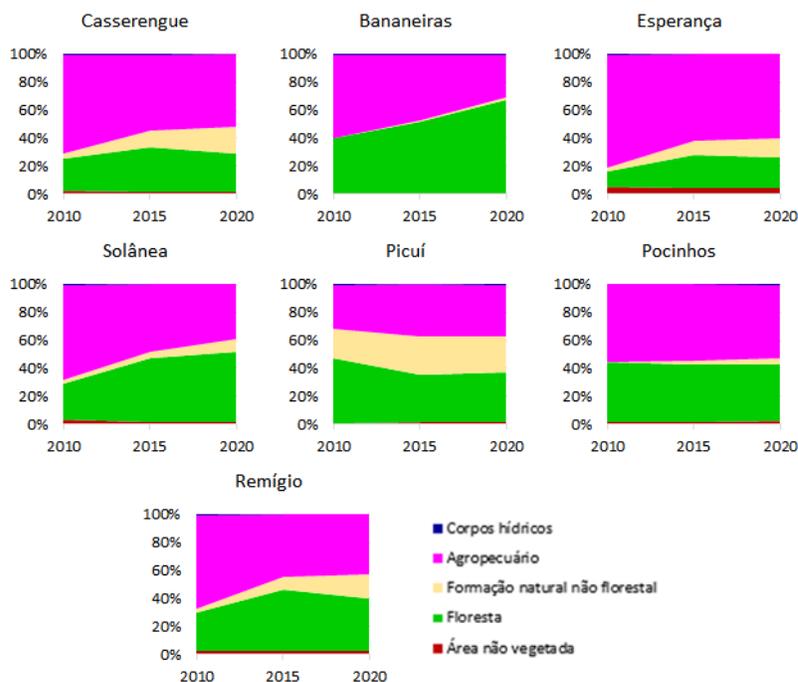


Figura 9 – Proporção das classes de uso e ocupação do solo nos municípios em estudo.  
Fonte: Autores (2024).

Percebe-se que, com a melhora do regime de chuvas na região a partir do ano de 2015, há uma ligeira suavização do processo de perda de áreas agropecuárias, causado pelo aumento das áreas de formação natural não florestal. Em nenhum dos municípios analisados, com exceção de Picuí/PB, onde houve o aumento nas áreas de agropecuária durante o período de estiagem, as áreas produtivas retornaram ao nível anterior ao colapso hídrico. Dessa forma, entende-se que a ocorrência de eventos extremos desse tipo afeta diretamente a produção e a ocupação antrópica do solo, não havendo reestabelecimento imediato pós-evento.

Na Figura 10 é notório para o ano de 2015, ápice do colapso hídrico nos municípios, um forte aumento da degradação severa da pastagem em relação a 2010, predominantemente nos municípios de Picuí/PB, Pocinhos/PB e Esperança/PB. A piora na qualidade da pastagem entre esses anos pode estar relacionada à ausência de disponibilidade hídrica para manutenção das espécies vegetais, visto que o colapso hídrico envolve não somente o abastecimento de água, mas todo o sistema ambiental da localidade.

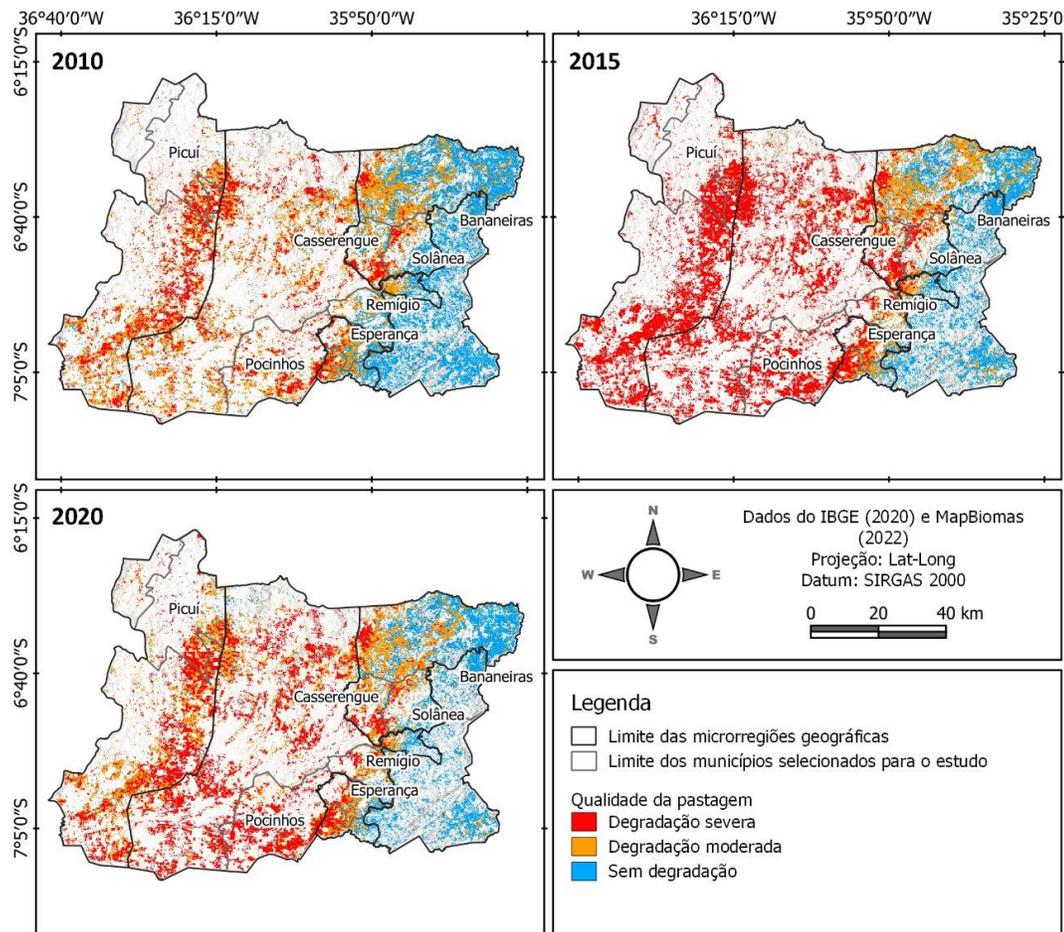
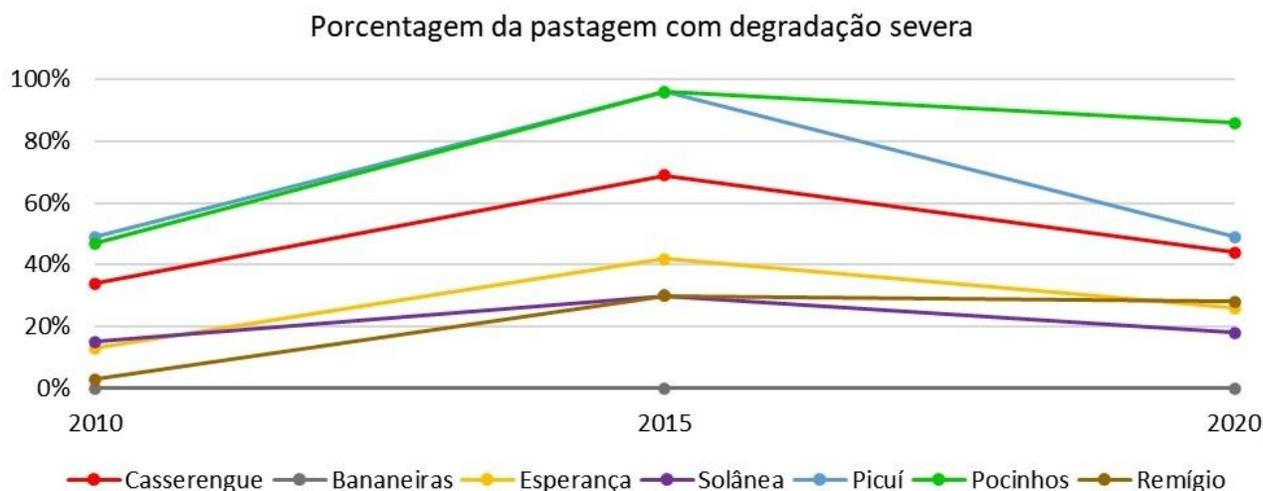


Figura 10 – Qualidade da pastagem da área de estudo.

Fonte: Autores (2024).

Para os municípios de Solânea/PB e Bananeiras/PB, a área sem degradação se manteve proporcional, de modo que, nesses municípios, o advento do colapso hídrico pouco afetou a qualidade da vegetação. Entre 2015 e 2020, período no qual houve melhora no regime de chuvas da região nordeste, a qualidade da pastagem melhorou consideravelmente em todo o território, entretanto ainda houve a redução de áreas sem degradação. Desse modo, para compreender a quantificação de degradação no território, a Figura 11 apresenta o gráfico com a porcentagem de pastagem com degradação severa para cada um dos municípios ao longo dos três anos.



*Figura 11 – Porcentagem da pastagem com degradação severa para os municípios em estudo.  
Fonte: Autores (2024).*

É perceptível que o município de Bananeiras/PB não possui nenhuma área de degradação severa no período de 2010 a 2020, de modo que o colapso hídrico não afetou na qualidade da pastagem para este município. Os municípios de Pocinhos/PB e Picuí/PB já possuíam as maiores taxas de degradação severa entre os municípios estudados para o ano de 2010 e atingiram taxas de degradação severa da pastagem acima de 90% para o ano de 2015. Com a intensificação das precipitações no período de 2015 a 2020, nota-se a redução da degradação severa para a pastagem, exceto para o município de Remígio/PB que apresentou um pequeno aumento na taxa.

#### 4. Considerações finais

Como consequência da redução de intensidade do regime pluviométrico, o colapso hídrico acarretou diversas consequências para o sistema ambiental como um todo das microrregiões estudadas, afetando a qualidade de vida animal e vegetal. No que diz respeito ao uso e ocupação do solo, houve uma regressão na formação natural, entre os anos de 2010 e 2015, para parte do território apesar da vegetação da caatinga apresentar maior resiliência quanto ao consumo de água. No período de 2015 a 2020, houve uma pequena ligeira suavização do processo de perda de áreas agropecuárias, causado pelo aumento das áreas de formação natural não florestal.

No que tange à qualidade de pastagem, houve um forte aumento na degradação severa entre os anos de 2010 e 2015, predominantemente nas microrregiões do Seridó Oriental e Curimataú Ocidental. Entretanto, nas microrregiões do Curimataú Oriental e no Brejo Paraibano, houve poucas alterações na qualidade da pastagem notada pela permanência proporcional de áreas sem degradação, com pouca influência do colapso hídrico no pasto. No período de 2015 a 2020, foi evidente a melhoria na qualidade da pastagem, relacionada à manutenção dos regimes de chuva na região.

Importante destacar que, as condições da vegetação no semiárido podem ser influenciadas por vários fatores, como a existência de vegetação esparsa e heterogênea, o que resulta em interpretações equivocadas dos satélites de baixa resolução sobre a degradação da pastagem. Ademais, as resoluções temporais também são um desafio para as análises ambientais no semiárido, pois os dados podem não captar com precisão alguns eventos de curta duração que resultaram em mudanças na paisagem. Para melhorar a precisão e superar estas limitações do uso do sensoriamento remoto em estudos no semiárido, é recomendada a adoção de diferentes fontes de dados e a execução de análises que integrem múltiplos fatores.

Com relação aos reservatórios que passaram por colapso hídrico na região, foi perceptível a redução de seus volumes ao longo do período de 2010 a 2020, visto que estes foram utilizados com mais frequência, entretanto não houve recarga hídrica suficiente devido à ausência de precipitações nas bacias de drenagem. Essa redução dos volumes causou um aumento nos valores médios de turbidez como consequência da menor diluição de matérias em suspensão presentes nos mananciais.

Além disso, houve um aumento na taxa de fósforo total e DBO, relacionadas a quantidade de matéria orgânica presente no corpo hídrico, bem como a eutrofização dos mesmos. Apesar da variação nos parâmetros citados, a DBO ainda está dentro dos limites estabelecidos na portaria de qualidade para corpos hídricos superficiais.

Os achados deste estudo podem complementar as políticas públicas para a gestão de recursos hídricos na Paraíba, destacando a necessidade de adaptação às mudanças climáticas e mitigação dos efeitos do colapso hídrico. Os resultados obtidos podem orientar o planejamento hídrico, auxiliando na criação de planos de contingência, revitalização de ecossistemas aquáticos e práticas agrícolas mais sustentáveis, garantindo a resiliência ambiental e social das regiões afetadas.

Desse modo, percebendo as limitações das avaliações realizadas, sugere-se que estudos futuros englobem outros componentes do sistema ambiental e outros parâmetros de qualidade de água dos corpos superficiais, a fim de analisar a influência do regime de chuvas e do colapso hídrico na biosfera aquática. Além disso, pode-se realizar estudos de impactos econômicos no sistema ambiental em períodos de colapso hídrico. E, ainda, recomenda-se a utilização de metodologias de modelagem de sistemas ambientais para melhor compreensão da dinâmica do mesmo em situações críticas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Superintendência Estadual da Fundação Nacional de Saúde (Funasa) da Paraíba, a partir do Termo de Execução Descentralizada nº 03/2019, parceria entre a Funasa e a Universidade Federal de Campina Grande, intitulado “Capacitação técnica e elaboração da minuta dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) de 49 municípios selecionados no estado da Paraíba”.

### Referências

- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Geoportal: Shapefiles. 2006. Disponível em: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>. Acesso em: 19/05/2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Relatório de Qualidade de Água. 2022. Disponível em: [http://www.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-relatorio/paginas/publico/dashboard.xhtml?dashboard\\_id=8](http://www.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-relatorio/paginas/publico/dashboard.xhtml?dashboard_id=8). Acesso em: 18/05/2024.
- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH. Relatório Parcial - RPA02. João Pessoa: Ibi Engenharia Executiva, 2019.
- ALVES, A. P. A.; FÉLIX, A. C. T.; BARBOSA, D. L.; BRANDÃO, I. A. P.; PAZ, M. A. F.; CRUZ, S. G. Análise da relação do Índice de Segurança Hídrica com indicadores socioeconômicos em microrregiões de água e esgoto, no Estado da Paraíba, Brasil. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 1, p. 840-861, 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. HIDROWEB - Rede Hidrometeorológica Nacional. 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 20/05/2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Série histórica dos Indicadores de Qualidade de Água de Reservatórios. 2020. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=b3d9cbc0b05b466a9cb4c014eba748b3>. Acesso em: 20/05/2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Diário Oficial da União, 2021.
- BRITO, H. C.; BRITO, W. M. A.; RUFINO, I. A. A. O Índice de Segurança Hídrica do Brasil e o Semiárido Brasileiro: Desafios e Riscos Futuros. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 74, n. 1, p. 1-15, 2022.
- BRITO, H. C.; RODRIGUES, A. C. L. Segurança hídrica em Região Semiárida: avaliação da capacidade adaptativa em municípios do agreste paraibano. In: FERREIRA, Y. B. C.; BRITO, W. M. A.; ASSIS, W. D.; BRITO, H. C. (Org.). *Meio Ambiente e sociedade: análises, diálogos e conflitos ambientais*. Campina Grande: Editora Amplla, 2020. p. 9-20.

- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2018.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, Alterada pela Resolução nº 410 de 04 de maio de 2009 e pela 430 de 13 de maio de 2011, do CONAMA. Brasília: Diário Oficial da União, 2005.
- COSTA, L. R. F.; OLIVEIRA, V. P. V. Sistemas ambientais, vulnerabilidade ambiental e uso e ocupação na sub-bacia hidrográfica do riacho Santa Rosa – Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 4, p. 1525 – 1537, 2019.
- FARIAS, A.; MENDONÇA, F. Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano. *Sociedade & Natureza*, v. 34, p. 1-18, 2022.
- FERREIRA, L. K. R.; FREITAS, L. M. C.; LIMA, G. R. R.; ARAÚJO, A. L.; SILVA, F. J. A. Uma análise quantitativa sobre o estado trófico em reservatórios no Ceará, semiárido brasileiro. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v. 16, n. 3, p. 971-986, 2023.
- FREITAS, P. Â. B.; ARAÚJO, S. M. S. Análise da produção científica internacional sobre segurança hídrica utilizando a base de dados Web of Science (2010-2021). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 5, p. 606-618, 2021.
- FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. UFCG. Universidade Federal de Campina Grande. Produto C – Diagnóstico Técnico-Participativo. Campina Grande: UFCG, 2022. Disponível em: <https://sims.ufcg.edu.br/documentos>. Acesso em: 01/05/2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades: Pesquisa de Produção Pecuária. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pesquisa/18/16459>. Acesso em 18/05/2024.
- JUPP, A. R.; BEIJER, S.; NARAIN, G. C.; SCHIPPER, W.; SLOOTWEG, J. C. Phosphorus recovery and recycling – closing the loop. *Chemical Society Reviews*, v. 50, p. 87-101, 2021.
- LEMOS, J. J. S. Vulnerabilidades induzidas no semiárido brasileiro. *Desenvolvimento Regional em debate*, v. 10, p. 245-268, 2020.
- MAPBIOMAS. Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. 2022. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 16/05/2024.
- MENDES, L. S. A. S.; SILVA NETO, T. A.; SOUSA, J. S. F. O.; SILVA NETOR, C. Â.; VASCONCELOS, M. B.; SALGUEIRO, A. R. G. N. L.; BRAGA, E. A. S.; GIRÃO, F. A. L. Diagnóstico da oferta hídrica do município de Russas – CE: Uma análise descritiva como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 3, p. 1612-1625, 2021.
- MENDES, P. D. A. G.; ALMEIDA, A. C.; LITRE, G.; RODRIGUES FILHO, S.; SAITO, C. H.; DÁVALOS, N. E. B.; GAIVIZZO, L. H. B.; LINDOSO, D. P.; REIS, R. M.; FERREIRA, J. L. Políticas públicas e adaptação às mudanças climáticas: três estudos de casos no semiárido brasileiro. *Sustainability in Debate - Brasília*, v. 13, n. 3, p. 227-245, 2022.
- OLIVEIRA, A. V. L. C.; CESTARO, L. A. Caracterização dos sistemas ambientais do Rio Grande do Norte: um enfoque na Depressão Sertaneja. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 2, n. especial, p. 221-231, 2016.
- 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*, v. 8, p. 1-12, 2023.
- PEREIRA, V. R.; RODRIGUEZ, D. A.; COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, D. V.; MARENGO, J. A. Oportunidades de adaptação para a segurança hídrica no Brasil. *Sustainability in Debate - Brasília*, v. 11, n. 3, p. 106-121, 2020.

- 
- RAJ, P. S. A.; DIVAHAR, R.; NAIR, A. R.; ASWIN, S.; BIPEESH, B. Study of Self Depuration Capability of River Pamba. *Journal of Physics: Conference Series*, p. 1-9, 2021.
- ROCHA JUNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; Attayde, J. L.; Becker, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 30, n. 106, p. 1-10, 2018.
- SILVA, T. J. M.; CALLADO, N. H.; SOUZA, V. C. B.; VASCONCELOS, M. R. S. Respostas da qualidade da água e fitoplânctons à redução de vazão e recepção de cargas de sedimentos no reservatório de Xingó/AL. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 7, n. 15, p. 1-21, 2020.
- SOUSA, A. F. N.; BATISTA, G. S.; OLIVEIRA, G. S.; FRANÇA, L. R. C.; LACERDA, M. C.; FEITOSA, P. H. C. Análise exploratória dos serviços e microrregiões de água e esgoto no estado da Paraíba a partir de indicadores. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 20, n. 1, p. 48-74, 2023.
- SOUSA, K. A.; ESPINDOLA, G. M.; SILVA, C. E. Análise de atributos limnológicos em reservatórios do semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 1, p. 357-371, 2020.
- TOMPERI, J.; ISOKANGAS, A.; TUUTTILA, T.; PAAVOLA, M. Functionality of turbidity measurement under changing water quality and environmental conditions. *Environmental Technology*, v. 43, n. 7, p. 1093-1101, 2020.
- VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. 2ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.