VARIABILIDADE HIDROMETEOROLÓGICA E SEGURANÇA HÍDRICA INDUSTRIAL NO SEMIÁRIDO CEARENSE: AVALIAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ÁGUA BRUTA FORNECIDA AO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM

Ramyro Batista Araujo [1] *; Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior* [2]

Palavras-Chave – Segurança Hídrica Industrial, Secas Prolongadas, Variabilidade Hidrometereológica.

INTRODUÇÃO

A ocorrência crescente de eventos extremos associados à água exige abordagens integradas para avaliar riscos, vulnerabilidades e estratégias de adaptação em regiões semiáridas. Nessas áreas, a disponibilidade hídrica é limitada pela elevada evapotranspiração potencial, irregularidade das chuvas e variabilidade interanual da precipitação (KROL; FUHR; DÖRING, 2004; SCHOLES, 2020).

No Semiárido brasileiro, especialmente no Ceará, essa condição é agravada por secas multianuais e chuvas concentradas, capazes de gerar crises de abastecimento e alterar a qualidade da água armazenada. A climatologia cearense é modulada por fenômenos oceânico-atmosféricos, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), o Dipolo do Atlântico e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema indutor de chuvas na região (MOURA; SHUKLA, 1981; MARENGO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2023). Em configurações desfavoráveis, essas forçantes reduzem a precipitação, comprometem a recarga dos reservatórios e intensificam secas hidrológicas. Entre 2012 e 2018, o Ceará enfrentou seca prolongada, com forte redução dos volumes em reservatórios estratégicos (MONTEIRO; ZANELLA, 2019).

Na gestão de riscos e desastres, a seca deve ser compreendida como processo cumulativo que afeta disponibilidade, qualidade e confiabilidade hídrica. De acordo com França *et al.* (2022), em reservatórios semiáridos, a redução volumétrica aumenta o tempo de residência da água, intensifica a evapoconcentração de sais, nutrientes e constituintes dissolvidos e favorece a eutrofização. Por outro lado, chuvas intensas após longos períodos secos ampliam o escoamento superficial e carreiam sedimentos, matéria orgânica e poluentes difusos aos mananciais, alterando turbidez, cor, DBO e carbono orgânico total (LEITE; BECKER, 2019).

Esses processos são relevantes para o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), vetor estratégico do desenvolvimento econômico estadual que abriga atividades sensíveis à qualidade da água bruta, como siderurgia, energia e empreendimentos associados ao hidrogênio verde. Nesse contexto, a segurança hídrica industrial depende não apenas do volume disponível, mas também da estabilidade da qualidade da água e de sua tratabilidade.

Assim, este trabalho analisa a influência da variabilidade hidrometeorológica sobre a água bruta fornecida ao CIPP, integrando dados de precipitação, volumes armazenados, estado trófico dos reservatórios e parâmetros de qualidade da água.

1) Aluno do Mestrado Profissional em Climatologia da Universidade Estadual do Ceará – UECE; E-mail: ramyrobatista@gmail.com
2) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME e Universidade Estadual do Ceará – UECE; E-mail: juniorphy@gmail.com

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida como estudo de caso do sistema hídrico que abastece o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), incluindo reservatórios estratégicos, estruturas de transferência e fontes locais, como Castanhão, reservatórios metropolitanos, Sítios Novos e Reservatório Apoiado do Pecém (RAP). Foram utilizados dados secundários de precipitação, volumes armazenados, qualidade da água bruta e consumo de insumos químicos, obtidos junto à FUNCEME, COGERH e ao monitoramento industrial.

A variabilidade hidrometeorológica foi avaliada pelo Índice de Anomalia de Chuva (IAC), conforme Rooy (1965), com classificação climática segundo Silva, Santos e Santos (2020). A qualidade da água foi analisada por estatística descritiva, séries temporais e comparação sazonal entre períodos secos e chuvosos, agrupando-se os parâmetros em classes físico-químicas e ambientais. Também foram considerados o Índice de Estado Trófico (IET), conforme Lamparelli (2004), a Resolução CONAMA nº 357/2005 e a relação entre sazonalidade, qualidade da água e tratabilidade industrial.

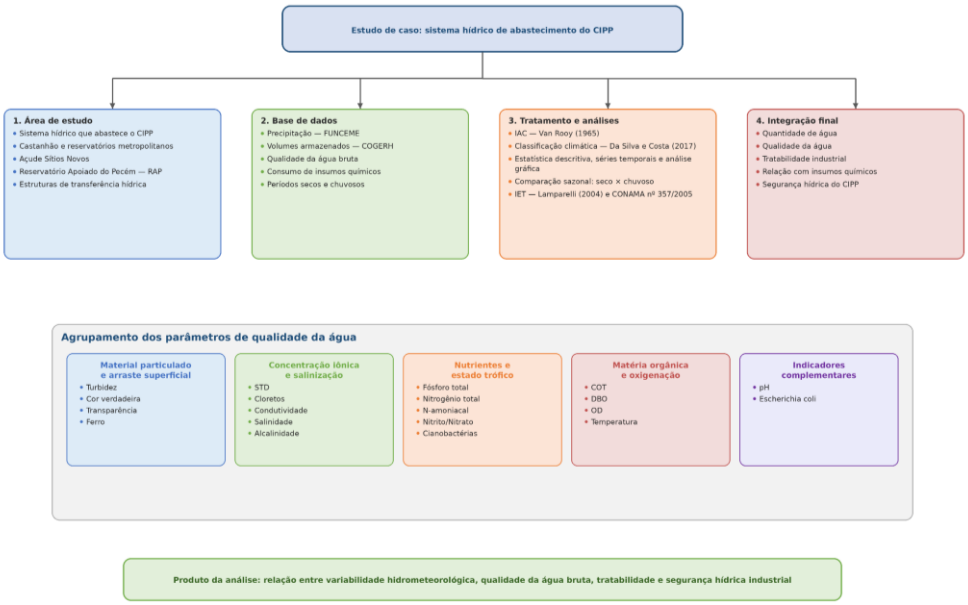


Figura 1. Síntese metodológica adotada para avaliação integrada da variabilidade hidrometeorológica, qualidade da água bruta e tratabilidade industrial no sistema de abastecimento do CIPP. Fonte: autoria própria.

RESULTADOS

A série histórica de precipitação da Região Metropolitana de Fortaleza (1990–2024) evidenciou elevada variabilidade interanual, com média anual de 991,52 mm e desvio padrão de 344,09 mm. O Índice de Anomalia de Chuva (IAC) indicou alternância entre anos secos e úmidos, com destaque para anos secos moderados a intensos em 1990, 1993, 1998, 2010, 2012, 2013 e 2016, e anos úmidos moderados a intensos em 1994, 1995, 2009 e 2022.

Entre 2012 e 2016, a sequência de anomalias negativas esteve associada à seca plurianual que afetou o sistema hídrico cearense, coerente com a seca de 2012–2017/2018 no Nordeste brasileiro (MARENGO *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2018). A relação entre IAC e volumes armazenados (Figura 2) demonstrou que déficits persistentes de precipitação provocam redução prolongada dos reservatórios e efeitos cumulativos sobre a segurança hídrica.

Observou-se descompasso entre recuperação meteorológica e hidrológica. Mesmo após anos com IAC positivo, os volumes permaneceram baixos, evidenciando a “memória hidrológica” do sistema. Em bacias semiáridas, as primeiras chuvas recompõem a umidade do solo, pequenos barramentos e

perdas iniciais antes de gerar escoamento efetivo para grandes reservatórios (MEDEIROS *et al.*, 2018). No Açude Castanhão, a recomposição volumétrica demandou sequência de anos úmidos, indicando baixa resiliência frente a secas plurianuais.

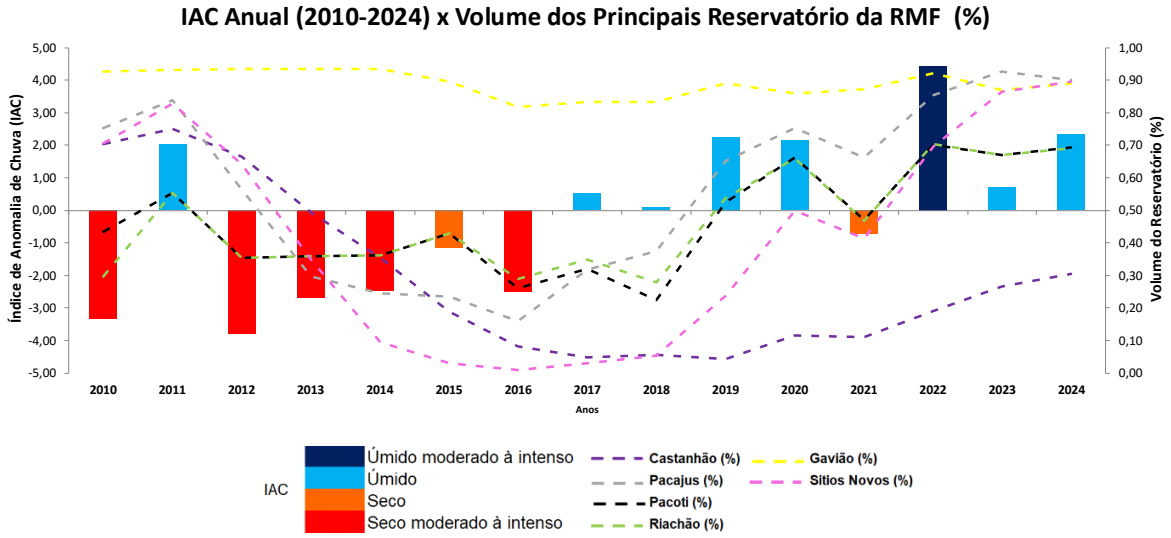


Figura 2. Média do Índice de Anomalia de Chuva vs. Volume dos Principais Reservatórios que abastecem a região metropolitana de Fortaleza de 2010 a 2024. Fonte: autoria própria.

A depleção volumétrica também esteve associada à degradação qualitativa da água. A evolução do Estado Trófico indicou maior vulnerabilidade ecológica em períodos de baixo volume, quando a concentração de nutrientes e o maior tempo de residência hidráulica favorecem a eutrofização. Esse comportamento é compatível com estudos que relacionam seca, redução do volume útil, aumento da condutividade elétrica, redução da transparência e maior ocorrência de florações algais e cianobactérias em reservatórios do Semiárido (LAURENT *et al.*, 2023).

A análise sazonal evidenciou mecanismos distintos. Na estiagem, a redução volumétrica e a evaporação favorecem a concentração de constituintes dissolvidos, refletindo-se em condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, cloretos, salinidade, alcalinidade e dureza, parâmetros críticos para o uso industrial por estarem associados a incrustação, corrosão e maior demanda de tratamento. No período chuvoso, especialmente após eventos concentrados, houve aumento de turbidez, cor verdadeira, ferro e matéria orgânica, em razão do arraste superficial de sedimentos, nutrientes e poluentes difusos. Assim, embora a recarga possa diluir sais, também pode elevar temporariamente a carga particulada e orgânica, ampliando a complexidade do tratamento (LEITE; BECKER, 2019).

As fontes de abastecimento do CIPP apresentaram comportamentos distintos de qualidade. O sistema Sítios Novos/Pecém e o sistema associado ao Eixão das Águas diferiram conforme origem da água, mistura, tempo de residência, uso da bacia e condição hidrológica. O consumo de insumos químicos indicou sensibilidade operacional à sazonalidade da água bruta, sobretudo em períodos de alteração de turbidez, cor, matéria orgânica e pH.

Portanto, seca prolongada e chuvas intensas não devem ser analisadas isoladamente. No Semiárido cearense, a seca reduz volumes, concentra constituintes e fragiliza a qualidade da água; já chuvas concentradas promovem recarga, mas mobilizam cargas difusas e alteram rapidamente a tratabilidade. A gestão hídrica deve, portanto, integrar quantidade, qualidade, tratabilidade e risco operacional.

CONCLUSÕES

A avaliação quali-quantitativa da água bruta fornecida ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém demonstrou que a variabilidade hidrometeorológica influencia diretamente a segurança hídrica

industrial no Semiárido cearense. O Índice de Anomalia de Chuva evidenciou alternância entre anos secos e úmidos, com destaque para a seca plurianual de 2012 a 2018 e para a lenta recuperação dos volumes nos reservatórios estratégicos.

Os resultados indicam que a disponibilidade volumétrica, isoladamente, não garante segurança hídrica. Em períodos secos, a redução dos volumes favorece a concentração de sais, nutrientes e outros constituintes, ampliando riscos de salinização, eutrofização, corrosão, incrustação e maior complexidade no tratamento. Em períodos chuvosos, eventos concentrados podem elevar turbidez, cor, ferro e matéria orgânica, também afetando a tratabilidade da água.

Assim, secas e chuvas intensas representam desafios à qualidade da água por mecanismos distintos. Para o CIPP, a gestão do abastecimento deve integrar monitoramento hidrometeorológico, avaliação contínua da qualidade da água, análise de cenários críticos, diversificação de fontes e tratamento adaptativo. Essa abordagem é essencial para ampliar a resiliência operacional industrial diante dos extremos hidrológicos e fortalecer a governança da água, a segurança hídrica e a adaptação climática no Ceará.

REFERÊNCIAS

FRANÇA, Josefa Marciana Barbosa de *et al.* Qualidade da água em um sistema de reservatórios em cascata – um estudo de caso no semiárido brasileiro. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, n. 3, p. 439-447, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-415220200328. Acesso em: 1 jun. 2026.

LAURENT, Auriane *et al. Extremes in water quality parameters modulated by weather and climate conditions in Ceara State, Brazil*. Ecohydrology and Hydrobiology, v. 23, n. 4, p. 556-568, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.06.004. Acesso em: 5 jan. 2026.

LAMPARELLI, M.C. (2004) Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo

LEITE, Jéssica N. R.; BECKER, Vanessa. *Impacts of drying and reflooding on water quality of a tropical semi-arid reservoir during an extended drought event*. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 31, e11, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s2179-975x6918. Acesso em: 1 jul. 2026.

MARTINS, Eduardo Sávio P. R. *et al.* A Multimethod Attribution Analysis of the Prolonged Northeast Brazil Hydrometeorological Drought (2012–16). Bulletin of the American Meteorological Society, v. 99, n. 1, p. S65-S69, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0102.1. Acesso em: 7 set. 2025.

MARENGO, Jose A. *et al. Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil*. Journal of Climate, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1. Acesso em: 1 jul. 2026.

MARENGO, Jose A.; RODRIGUES TORRES, Roger; ALVES, Lincoln M. Drought in Northeast Brazil — Past, present, and future. Theoretical and Applied Climatology, v. 129, n. 3, p. 1189-1200, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8. Acesso em: 1 jul. 2026

MONTEIRO, Jander B.; ZANELLA, Maria Elisa. *Eventos extremos no estado do Ceará, Brasil: uma análise estatística de episódios pluviométricos no mês de março de 2019*. GeoTextos, v. 15, n. 2, p. 57-75, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.9771/geo.v15i2.32093. Acesso em: 1 jul. 2026.

KROL, Maarten S.; FUHR, Dagmar; DÖRING, Andreas. *Semi-arid Northeast Brazil: integrated modelling of regional development and global change impacts.* In: UNRUH, Jon D.; KROL, Maarten S.; KLIOT, Nurit (ed.). Environmental change and its implications for population migration. Dordrecht: Kluwer Academic, 2004. p. 119-144.

ROOY, M. P. V. *A rainfall anomaly index independent of time and space*. Notos 14, 43-48. 1965.

SCHOLES, Robert. *The Future of Semi-Arid Regions: A Weak Fabric Unravels*. Climate, v. 8, n. 3, p. 43, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/cli8030043. Acesso em: 1 jul. 2026.
SILVA, Maria da *et al. Variabilidade climática da precipitação no estado do Ceará, Nordeste do Brasil*. Revista Brasileira de Climatologia, v. 33, p. 491-512, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.17154. Acesso em: 1 mar. 2026.

SILVA, Francillene Fernandes; DOS SANTOS, Francílio de Amorim; DOS SANTOS, Juliana Moreira. Índice De Anomalia De Chuva (IAC) Aplicado Ao Estudo Das Precipitações No Município De Caridade, Ceará, Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, *[S. l.]*, v. 27, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v27i0.74274. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/74274. Acesso em: 05 ago. 2025.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) pelo fornecimento dos dados técnicos e séries históricas utilizados neste estudo, cuja contribuição foi fundamental para viabilizar as análises apresentadas.