



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

UMA ANÁLISE QUANTITATIVA SOBRE O ESTADO TRÓFICO EM RESERVATÓRIOS NO CEARÁ, SEMIÁRIDO BRASILEIRO

* Luciana Kamila Rodrigues Ferreira ¹
Luciana Mara Cardoso Freitas ¹
Gustavo Ross Ribeiro Lima ¹
Andrea Limaverde de Araújo ¹
Fernando José Araújo da Silva ¹

A QUANTITATIVE ANALYSIS ON THE TROPHIC STATE IN RESERVOIRS IN CEARÁ, BRAZILIAN SEMI-ARID

Recibido el 17 de octubre de 2022. Aceptado el 9 de marzo de 2023

Abstract

This paper shows the eutrophication degree in artificial lentic structures located in the Brazilian semiarid. Fourteen reservoirs were sampled quarterly from 2015 to 2021. The study variables comprised the fraction of available volume (AV) in the day of sample collection, annual rainfall (P_p), total nitrogen (N), total phosphorus (P), chlorophyll a (Chla), transparency (Z) and density of cyanobacteria (CB). The Trophic State Index (TSI) was determined in the reservoirs. Also, among the information of the study, bivariate analysis (through correlations) and multivariate analysis (through Principal Components Analysis) were performed. The values of TSI showed Eutrophic state character. For annual cycles both arithmetic and geometric means can be applied. The climatic association variables (AV and P_p) had negative effect on the accumulation of nutrients and consequent increase in eutrophication. Multivariate analysis suggested similar results. However, internal phenomena in water seem to be stronger than those related to climate in driving eutrophication. Findings also showed that cyanobacterial density is enhanced by $N:P < 20$ had no significant association with climatic variables.

Keywords: climate effect, eutrophication, water monitoring.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Avenida Mister Hull, s/n – Pici – Fortaleza – Ceará – CEP 60455-760 – Brasil. Email: kamilafcoelho@gmail.com

Resumo

O grau de eutrofização de estruturas lênticas artificiais localizadas em região do semiárido brasileiro foi investigado. Foram considerados 14 reservatórios com coletas de amostras trimestralmente no período de 2015 a 2021. As variáveis de estudo compreenderam a fração de volume disponível (VD) no dia de coleta, pluviometria (P_p), nitrogênio total (N), fósforo total (P), clorofila a (Cl_a), transparência (Z) e densidade de cianobactérias (CB). Foi determinado o Índice de Estado Trófico (IET) nos reservatórios. Também, entre as informações do estudo efetuaram-se análise bivariada (através de correlações) e multivariada (através de Análise de Componentes Principais). Os valores de IET mostram carácter Eutrófico e que os resultados anuais podem ser baseados em média aritmética ou geométrica. As variáveis de associação climática (VD e P_p) apresentaram efeito negativo sobre o acúmulo de nutrientes, com conseqüente incremento de eutrofização. A análise multivariada sugere resultados semelhantes. Entretanto, fenômenos no interior dos reservatórios parecem ser mais fortes que os de clima. Os resultados mostraram que a densidade de cianobactérias é potencializada por razões N:P < 20 e tem associação não relevante com as variáveis climáticas.

Palavras-chave: efeito do clima, eutrofização, monitoramento da água.

Introdução

O fenômeno recorrente de secas na região nordeste do Brasil é caracterizado pela irregularidade anual e interanual dos totais pluviométricos. Associam-se a isso elevadas taxas de evaporação. Tal carácter climático provoca técnicos e gestores quanto à elaboração de políticas públicas sustentáveis. Conforme Pereira Neto (2017) destaca, o maior desafio da gestão pública no trópico semiárido brasileiro é prover ações que possibilitem não só o atendimento de necessidades básicas de subsistência, mas que também propiciem o desenvolvimento econômico e regional.

Sob o complexo acima, a construção de reservatórios artificiais, denominados regionalmente de açudes, tem sido a solução mais empregada para encarar a vulnerabilidade hídrica no semiárido brasileiro (Costa; Dantas, 2012; Otoch *et al.*, 2019). A região apresenta a maior densidade de reservatórios com usos múltiplos do país, de forma que tais intervenções hidráulicas possam atender demandas hídricas de consumo humano, animal e de produção.

No caso do Estado do Ceará a construção de reservatórios é datada desde 1907 através do açude Acaraú Mirim. É aplicada até os dias atuais como forma de reserva hídrica e controle de vazões. A técnica de açudagem é particularmente importante para o Estado do Ceará, que conta com 164 de seus municípios no trópico semiárido brasileiro (SUDENE, 2017). Segundo dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), o Ceará possui 247 açudes de porte mais significativo, classificados de acordo com o porte como: macro (> 750 Hm³), grande (de 75 a 750 Hm³), médio (de 7.5 a 75 Hm³) e pequeno (< 7.5 Hm³) (SRH, 2022).

A região semiárida brasileira, bem como outras do planeta, está sob especial atenção quanto aos efeitos da tendência de mudança climática. O incremento do processo de aridização tem

impactos diversos, com destaque sobre a estabilidade do ciclo hidrológico e, por consequência, sobre aspectos qualitativos da água. Sob tal esteio, a grande quantidade de reservatórios do território cearense está mais vulnerável ao fenômeno da eutrofização (Wiegand *et al.*, 2021).

Caracterizado pelo enriquecimento do corpo aquático com nutrientes e consequente elevação da produtividade primária, a eutrofização é um processo complexo. É entendida como um fenômeno de consequências múltiplas, uma vez que a deterioração da qualidade da água tem implicações nas esferas ambiental, econômica e de saúde pública. Sob a ótica normativa de qualidade da água e seu uso preponderante, os limites orientadores devem ser considerados de acordo com a resolução CONAMA 357/05 (sumarizados na Tabela 1 para águas com salinidade $\leq 0,05\%$). Além de clorofila *a* e nutrientes a tabela 1 contém limites sobre a densidade de cianobactérias, procariontes fotossintetizantes e que têm relevante significado sanitário.

Tabela 1. Limites de parâmetros de qualidade de água referidos na CONAMA 357/05 que são relacionados com ao fenômeno de eutrofização.

Parâmetro	Classe 1 ¹	Classe 2 ²	Classe 3 ³
Clorofila <i>a</i> (µg/L)	10	30	60
Fósforo total (µg P/L)	20 ^a , 25 ^b e 100 ^c	30 ^a , 50 ^b e 100 ^c	50 ^a , 75 ^b e 150 ^c
Nitrogênio total ^d (mg N/L)	1.27 ^a e 2.18 ^b	1.27 ^a e 2.18 ^b	1.27 ^a e 2.18 ^b
Cianobactérias (células/mL)	20000	50000	100000

¹Água destinada ao abastecimento após tratamento simplificado, ²Água destinada ao abastecimento após tratamento convencional, ³Água destinada ao abastecimento após tratamento convencional ou avançado, ^a ambiente lântico; ^b ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias e tributários diretos de ambiente lântico; ^c ambiente lótico; ^d situação em que N é nutriente limitante.

O grau de eutrofização tem métrica tradicional no índice de estado trófico (IET), proposto em estudo seminal de Carlson (1977), que assinala classes em intervalos normalizados. Emprega funções representadas a partir da transparência de disco de Secchi (DS), clorofila *a* e fósforo total. Inicialmente pensado em três grandes classes, em trabalho posterior Carlson e Simpson (1996) propuseram as classes Oligotrófica, Mesotrófica, Eutrófica e Hipereutrófica. A abordagem trouxe ao longo do tempo debates sobre adequabilidade, ajustes e comparações (*e.g.* Kratzer; Brezonik, 1981; Toledo *et al.*, 1983; Cunha *et al.*, 2013; Klippel; Macêdo; Branco, 2020; Cunha *et al.*, 2021).

Estudos como os de Walling *et al.* (2017), Sperotto *et al.* (2019) e Bhat *et al.* (2020) destacam a importância de investigações continuadas sobre a qualidade da água frente ao cenário de mudança climática. Para Moss *et al.* (2011) o aquecimento do clima e a eutrofização reforçam mutuamente os sintomas que os expressam, bem como os problemas que causam. Sob tal perspectiva se justifica o presente estudo.

Metodologia

Caracterização dos reservatórios e dados do estudo

O estudo foi conduzido em 14 reservatórios localizados no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1). Todos os reservatórios do estudo são destinados a usos múltiplos (abastecimento humano, industrial, irrigação e dessedentação de animais), com sumário de informações contidas na Tabela 2. Os reservatórios estão localizados em região descrita com domínio de dois tipos climáticos: semiárido quente (BSh, 37.7% da área do estado) e tropical de savana (As, 62.3% da área do estado), segundo Alvares *et al.* (2014). A grande maioria dos reservatórios do trópico semiárido apresenta profundidade reduzida, menor do que 25 metros e, neste caso, pode ser observada desestratificação, especialmente naqueles ecossistemas em que a atuação do vento é facilitada, portanto varia para cada reservatório (de Freitas Lima *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2017).

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) disponibilizou os dados do estudo para o período de 2015 a 2021, através de campanhas de coleta trimestral de amostras. As coletas ocorreram na zona lacustre de cada reservatório, em ponto próximo ao barramento e à profundidade de 30cm abaixo da superfície da água, no horário da manhã (por volta das 10h00).

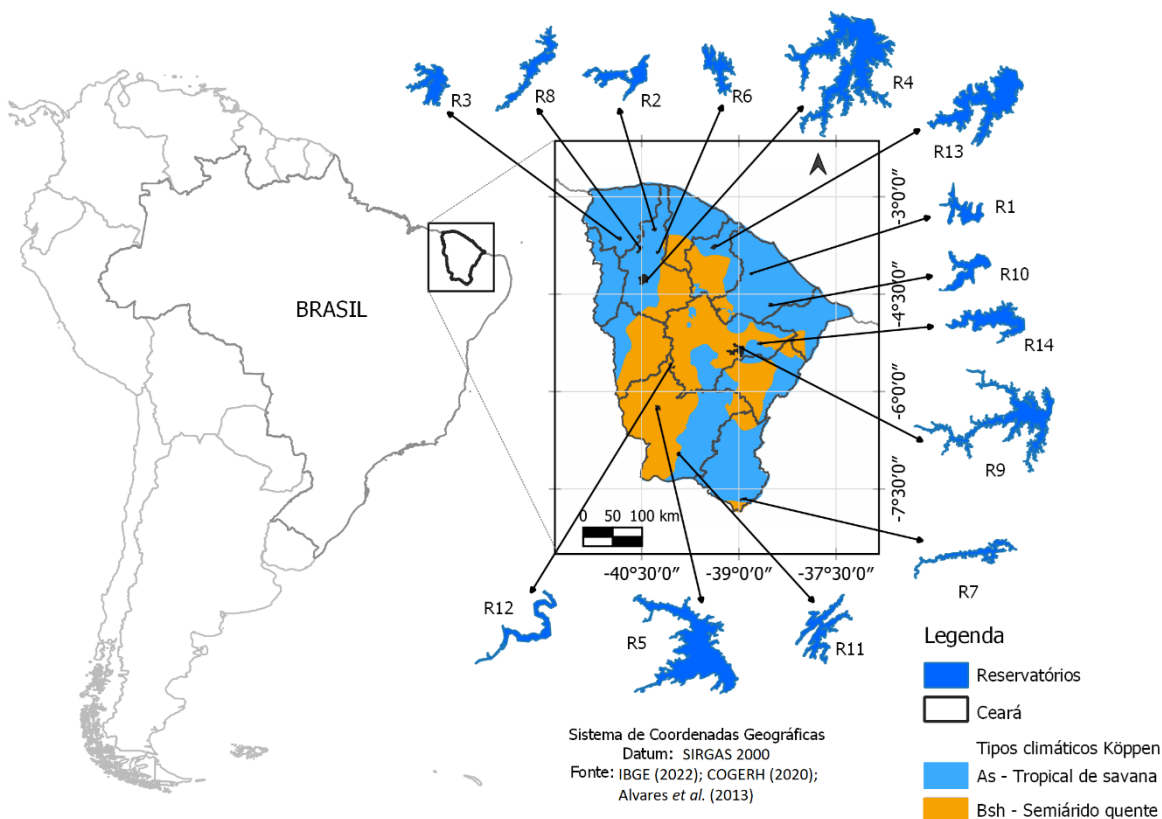


Figura 1. Mapa de localização dos reservatórios do estudo.

Tabela 2. Principais características dos reservatórios, volume total de armazenamento (V_T), profundidade máxima (H), porte¹ e localização².

Reservatório	Bacia	V_T (Hm ³)	H (m)	Porte	Localização E - N
Acarape do Meio - R ₁	Metropolitana	29.60	27.1	M	522.254-9.536.421
Acaraú Mirim - R ₂	Acaraú	36.71	13.0	M	357.908-9.612.424
Angicos - R ₃	Coreaú	56.05	14.0	M	297.763-9.597.943
Araras - R ₄	Acaraú	859.53	30.5	MC	339.149-9.534.550
Arneiroz II - R ₅	Alto Jaguaribe	187.70	25.0	G	365.223-9.307.088
Arrebita - R ₆	Acaraú	18.53	14.5	M	357.889-9.576.971
Atalho - R ₇	Salgado	72.55	35.0	M	511.655-9.155.375
Ayres de Sousa - R ₈	Acaraú	96.80	24.5	G	333.157-9.580.522
Banabuiú - R ₉	Banabuiú	1601.00	54.0	MC	508.724-9.411.109
Batente - R ₁₀	Metropolitana	37.00	11.6	M	556.704-9.485.892
Canoas - R ₁₁	Alto Jaguaribe	69.25	42.0	M	396.126-9.232.100
Capitão Mor - R ₁₂	Banabuiú	6.00	18.8	P	389.385-3.978.077
Caxitoré - R ₁₃	Curu	202.00	30.0	G	460.586-9.586.484
Cipoada - R ₁₄	Banabuiú	86.09	15.0	G	539.615-9.418.100

¹Porte: P = pequeno, M = médio, G = grande e MC – macro; ² Sistemas de Coordenadas UTM - Zona 24S, Datum SIRGAS 2000.
Fonte: SRH (2022).

As amostras foram armazenadas em frascos de vidro âmbar devidamente limpos e acondicionados em recipientes com gelo para preservação de seus conteúdos. Em laboratório as amostras foram analisadas para determinação dos parâmetros fósforo total (P), nitrogênio total (N), clorofila *a* (Cl_a) e contagem total de cianobactérias (CB).

Na determinação do fósforo total as amostras foram digeridas com persulfato de amônio e em seguida analisadas pelo método do ácido ascórbico. O nitrogênio total foi determinado pela soma das parcelas desse elemento obtida através do método Kjeldahl (nitrogênio Kjeldahl total), coluna redutora de cádmio (nitrito) e método da diazotização (nitrito). A clorofila *a* foi determinada por método espectrofotométrico, após extração a frio do fitopigmento em solução de acetona a 90%. A densidade de cianobactérias foi por contagem total de células em câmara de Sedgwick-Rafter. Os procedimentos analíticos empregados estão descritos em APHA (2005).

No local da coleta foi determinada a transparência com disco de Secchi (DS). Somaram-se aos dados de qualidade de água informações relativas à fração de volume disponível nos reservatórios no momento da coleta (VD) e à precipitação observada na área do reservatório (P_P), obtidas em SRH (2022).

Enfoque

O trabalho foi concentrado na avaliação do estado trófico dos reservatórios em relação à fração de volume disponível e à precipitação anual. Além de sumário estatístico descritivo, a investigação abordou a associação entre variáveis. O cômputo do IET foi obtido de acordo com Carlson e Simpson (1996). As equações dos subíndices são apresentadas abaixo (Equações 1 a 3). O índice final agregado ($IET_{Cla,P,DS}$) é dado pela média dos subíndices (Equação 4). Na Tabela 3 estão valores referentes a classes e intervalos do IET.

$$IET_P = 14.42.\ln(P) + 4.15 \quad (1)$$

$$IET_{Cla} = 9,81.\ln(Cla) + 30.60 \quad (2)$$

$$IET_{DS} = 60.0 - 14.41.\ln(DS) \quad (3)$$

$$IET = (IET_P + IET_{Cla} + IET_{DS})/3 \quad (4)$$

Em que: densidade de cianobactérias (CB) é expressa como células/mL; clorofila *a* (*Cla*) em µg/L; fósforo total (P) em µg /L P, nitrogênio total (N) em mg/L N; DS é dado em m.

Tabela 3. Parâmetros, classes e intervalos para o cômputo do IET.

Grau de Trofia	IET	<i>Cla</i> (µg/L)	<i>P</i> (µg/L)	<i>DS</i> (m)
Oligotrófico	< 40	< 2.6	< 12	> 4.0
Mesotrófico	41 – 50	2.7 – 7.3	13 – 24	2.1 – 4.0
Eutrófico	51 – 70	7.4 – 56.0	25 - 96	0.4 – 2.0
Hipereutrófico	> 70	> 56.0	> 96	< 0.3

Fonte: adaptado de Carlson e Simpson (1996).

Utilizou-se a análise gráfica de acordo com Carlson e Havens (2005), para identificar relações entre as variáveis do estado trófico, fósforo total, nitrogênio total, clorofila *a* e transparência. Essa abordagem analisa os desvios entre os subíndices, de modo a estende as constatações além das análises com dados locais, aumentando assim o entendimento das relações entre nutrientes, biomassa algal e transparência.

Abordou-se ainda o efeito de nutriente limitante no processo de eutrofização. Para tanto, foram empregadas as faixas de N:P sugeridas por Guildford e Hecky (2000), com base em concentração molar. Os autores indicam as seguintes faixas: $N/P < 20$, $N/P > 50$ e $20 \leq N/P \leq 50$. No primeiro caso o nutriente limitante é o nitrogênio (N), no segundo é o fósforo (P) e no terceiro, há co-limitação de ambos.

Os achados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP). Na ACP parte-se da premissa de que a explicação da variabilidade total de um sistema com n variáveis só pode ser efetuada por n componentes principais. No entanto, parte dessa variabilidade pode ser explicada por um número r menor de componentes (*i.e.* $r \leq n$). Apesar da ACP ser uma técnica de análise poderosa, não é plenamente conclusiva, mesmo sendo considerada relevante em estudos de limnologia (*e.g.* Brito; Alves; Espirito Santo, 2014; Omondi *et al.*, 2014; Alves *et al.*, 2019; Finlay *et al.*, 2019). O uso da ACP, para ser mais efetivo, exige entendimento maduro sobre o objeto de estudo.

O critério para considerar o número de componentes principais foi de autovalor ≥ 1 . O teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de medida de adequação da amostragem também foi aplicado, para verificar se as correlações parciais entre as variáveis eram pequenas. O valor mínimo aceitável para indicar adequação segundo os autores Kaiser e Rice (1974) deve ser maior igual a 0,5, sendo este o limite adotado neste trabalho para o teste de KMO. Por fim, efetuou-se o teste de esfericidade de Bartlett para verificar se a variância das observações é homogênea. Para os níveis de significância de $p < 0.05$ os valores obtidos no teste de esfericidade de Bartlett indicam que a matriz é fatorável, descartando a hipótese nula de que a matriz de dados é semelhante a uma matriz identidade.

Os procedimentos sobre aplicação de métodos de análise multivariada estão pormenorizados em Hair *et al.* (2009). Aplicou-se a técnica de rotação ortogonal dos fatores pelo método Varimax, que distribui a carga dos fatores maximizando a dispersão, visando atingir um padrão fatorial mais simples, melhorando assim a interpretação dos resultados da ACP. As análises estatísticas foram executadas no software Jamovi (2020) versão 1.8.4.

Resultados e discussão

As frações de volume disponível nos reservatórios (VD) variaram distintamente entre as estruturas, com a seguinte ordem: $R_{14} < R_9 < R_{12} < R_{13} < R_7 < R_{11} < R_5 < R_4 < R_6 < R_{10} < R_8 < R_1 < R_3 < R_2$. A associação entre a precipitação anual observada e a fração de volume disponível apresentou coeficiente de correlação $r = 0.579$ ($\alpha = 0.05$), com base no conjunto de reservatórios. Quando o VD foi considerado em relação ao desvio de precipitação (P_p/P_{NORMAL}) o coeficiente de correlação foi menor ($r = 0.403$; $\alpha = 0.05$). É claro que o complexo hidroclimático não é representado somente por informações de estações pluviométricas. Quanto a isto importa observar que cada reservatório tem caráter próprio, a partir de atributos hidrológicos, morfométricos e de ocupação das bacias, conforme destacam Richardson *et al.* (2018). Somam-se ainda características de topografia, vegetação e pedologia.

O resumo dos parâmetros de qualidade da água nos reservatórios está na Tabela 4. Em espectro geral os reservatórios R₅, R₁₁ e R₁₂ apresentaram maiores concentrações de nutrientes e clorofila *a*. Por outro lado, e de modo geral, os reservatórios R₁, R₂ e R₈ de apresentaram menor grau de comprometimento qualitativo. Ao considerar a CONAMA 357/05 e padrões para Águas Classe 2 e Classe 3, os resultados mostraram maior grau de não conformidade em relação aos valores de fósforo (limites de 30 e 50 µg P/L, respectivamente) e à densidade de cianobactérias (limites de 5.0E+4 e 1.0E+5 células/mL, respectivamente).

Tabela 4: Resultados das variáveis de qualidade de água nos reservatórios do estudo.

Reservatório	N (mg N/L)	P (µg P/L)	Cl _a (µg/L)	DS (m)	CB (Cél/mL)
R ₁	0.99 (0.59)	74 (61)	14.8 (13.4)	1.14 (0.40)	2.75E+05 ^a (4.63E+04) ^b (5.77E+05) ^c
R ₂	0.60 (0.36)	50 (21)	12.7 (16.0)	1.39 (0.55)	3.64E+04 (1.76E+04) (4.42E+04)
R ₃	1.51 (0.91)	64 (49)	68.8 (57.23)	0.70 (0.36)	3.55E+05 (2.28E+05) (3.27E+05)
R ₄	1.95 (1.34)	118 (90)	74.5 (72.3)	1.02 (0.75)	3.60E+05 (1.55E+05) (5.27E+05)
R ₅	3.04 (1.21)	148 (57)	129.8 (74.9)	0.38 (0.14)	5.13E+05 (3.29+05) (4.50E+05)
R ₆	1.86 (1.61)	68 (33)	46.1 (53.0)	1.10 (0.83)	2.23E+05 (1.30E+05) (2.36E+05)
R ₇	1.50 (0.92)	59 (22)	62.6 (46.6)	0.69 (0.35)	6.80E+05 (1.72E+05) (2.08E+06)
R ₈	1.06 (0.32)	102 (84)	17.9 (16.9)	0.95 (0.53)	2.21E+05 (6.05E+04) (4.34E+05)
R ₉	2.00 (1.17)	108 (153)	24.9 (18.7)	1.02 (0.51)	1.19E+05 (4.92E+04) (1.72E+05)
R ₁₀	2.35 (1.36)	110 (77)	44.0 (22.6)	0.62 (0.24)	5.41E+05 (1.29E+05) (1.24E+06)
R ₁₁	2.60 (1.77)	121 (97)	87.5 (24.6)	0.90 (0.89)	3.69E+05 (1.44E+05) (8.13E+05)
R ₁₂	6.83 (5.60)	254 (169)	182.6 (171.0)	0.43 (0.27)	3.45E+05 (1.59E+05) (4.67E+05)
R ₁₃	1.79 (0.94)	71 (40)	37.8 (27.9)	1.04 (0.41)	1.77E+05 (9.85E+04) (2.39E+05)
R ₁₄	3.40 (3.29)	86 (57)	70.8 (70.7)	0.64 (0.24)	3.48E+05 (1.38E+05) (4.26E+05)

^a Média aritmética; ^b Média geométrica; ^c Desvio padrão.

Em teste ANOVA verificou-se não haver diferença significativa ($F < F_{crítico}; p > 0.05$) na comparação de concentrações representadas por valores de média aritmética com a média geométrica em ciclos anuais, para as variáveis VD, N, P, Cla e DS. Entretanto, para o caso da densidade de cianobactérias houve diferença ($p = 0.024$). Para o caso da variável CB, os valores de coeficiente de variação (CV) estiveram em intervalo muito elevado (0.9 a 3.0) e com assimetria positiva acentuada. Assim, para CB é recomendável o emprego de média geométrica.

A Figura 2 mostra a matriz de correlação de Pearson entre as variáveis do estudo, onde pode-se observar na parte central a diagonal com os gráficos de distribuição dos dados, todos possuem calda para direita, a correlação de Pearson é apresentada de forma gráfica na lateral inferior esquerda e em forma numérica na lateral superior direita.

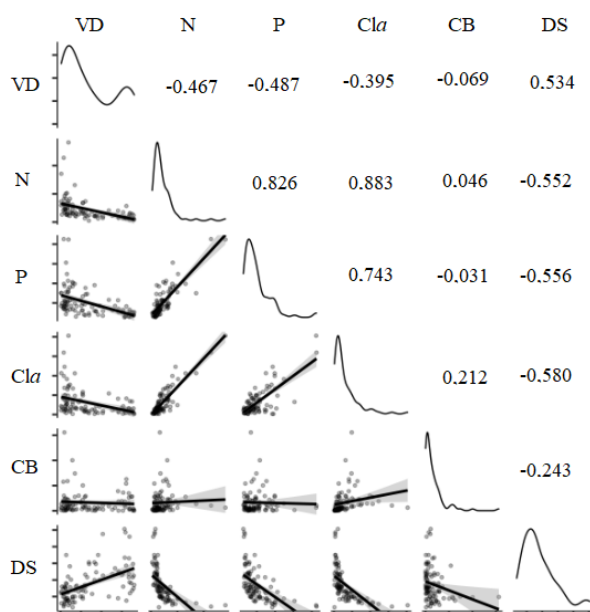


Figura 2. Matriz de correlação entre as variáveis do estudo com base em média anual (2015-2021).

O efeito climático é evidenciado a partir de correlação negativa entre VD e as concentrações de N e P ($p < 0.05$). Isso sugere acúmulo de nutrientes nos reservatórios em razão de intervalos de estiagem prolongada. O fenômeno pode ser corroborado por achados de Chen *et al.* (2019), que estudaram o lago Chenghai no sudoeste da China e Braga e Becker (2020) que estudaram um lago artificial no nordeste do Brasil. Em ambos foram verificadas alterações na composição de assembleias de fitoplâncton associadas à redução de VD, elevação no teor de nutrientes e da salinidade. Correlações elevadas entre nutrientes e clorofila *a* ratificam a combinação de tais

efeitos e de fenômenos ocorrentes no interior dos reservatórios, como visto também pelos autores Moura *et al.* (2020) e Qin *et al.* (2020). Ainda, observou-se um coeficiente de correlação ligeiramente superior entre N e Cl_a , comparado ao de P com o fitopigmento. O fato se deve à ciclagem complexa do fósforo, envolvido em diversos subprocessos químicos e bioquímicos no corpo d'água.

A elevação nas concentrações de nutrientes e conseqüente incremento da produtividade primária foram evidenciados no IET. Os resultados dos cálculos de IET indicam que há um predomínio de reservatórios em estado Eutrófico, como pode ser observado na (Figura 3). As correlações entre o IET final e os subíndices constituintes foram de 0.854; 0.875 e 0.921, para o IET_P , IET_{Cl_a} e IET_{DS} , respectivamente. Mais uma vez o suporte do clima é destacado nas correlações entre VD e/ou P_p em relação aos valores de IET. Os valores de r da correlação entre VD e os subíndices de P, Cl_a , e DS, foram -0.611; -0.464 e -0.542, respectivamente. Para P_p as correlações foram -0.465; -0.505 e -0.506, para os respectivos subíndices já mencionados.

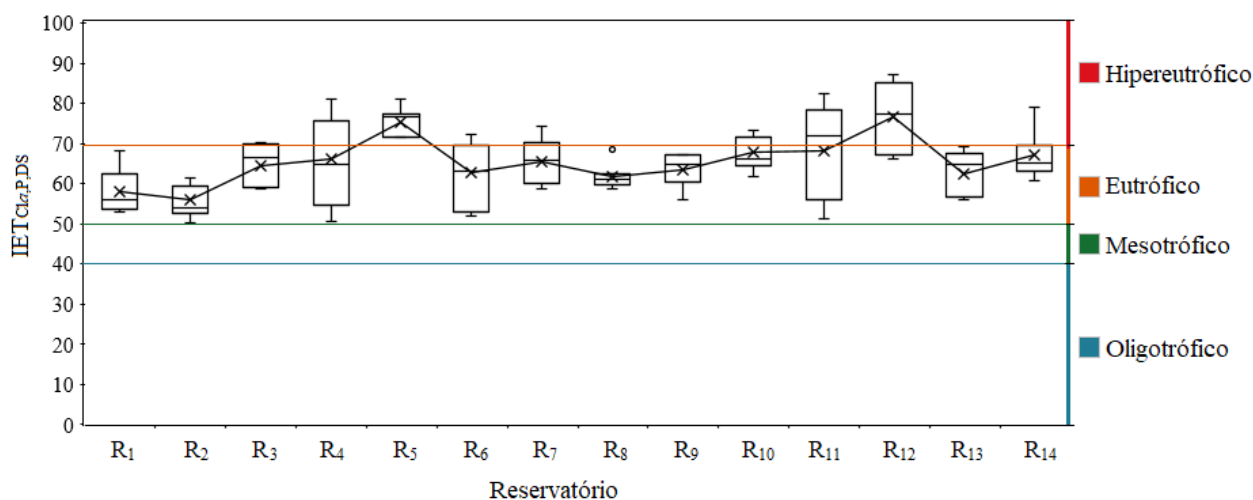


Figura 3. Variação do IET nos reservatórios do estudo (2015 a 2021).

A Figura 4 é baseada em Carlson e Havens (2005) e mostra o desvio dos subíndices IET_{DS} e IET_P em relação ao valor do IET_{Cl_a} . Conforme mostrado na figura 4 a maior parte das observações ficaram no domínio de partículas maiores e com limitação por P. Os referidos autores ressaltam que nesse quadrante as partículas maiores, e que contém Cl_a , podem estar associadas à formação de grupos filamentosos ou colônias, característicos de florações de cianobactérias. Isso é confirmado por maiores valores de CB (média geométrica de $3.74E+5$ células/mL).

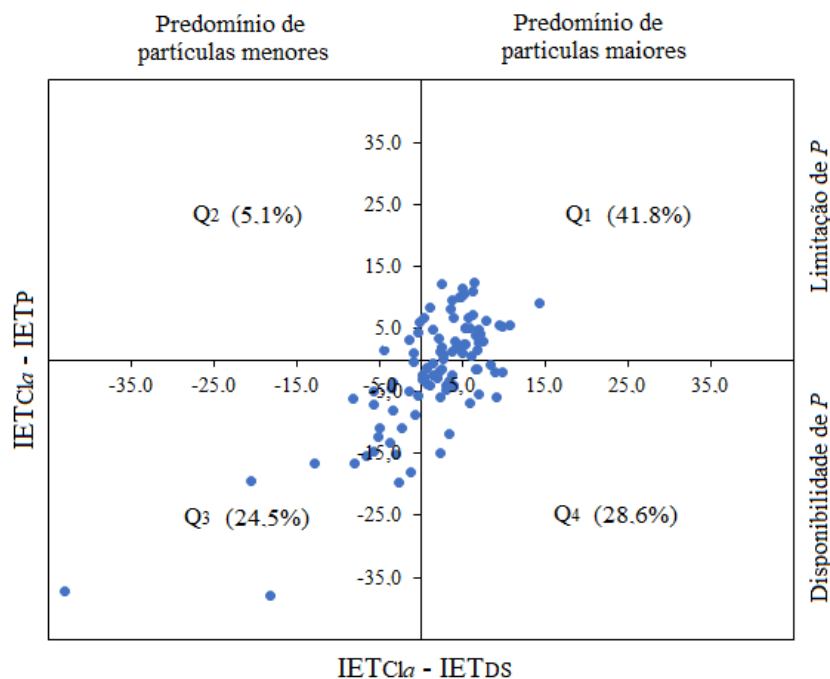


Figura 4. Gráfico de desvio do Índice de Estado Trófico com base anual (2015 a 2021).

No segundo quadrante as diferenças dos subíndices foram mais próximas de zero e a fração do total amostrado foi baixo. Em tal caso há sugestão de que a biomassa de algas domine a atenuação da luz. Entretanto, os próprios autores apontam a limitação da transparência (DS) como variável explicadora da atenuação da luz, que pode ser causada pela ocorrência de material coloidal. Esse material pode causar tanto cor como turbidez, e que não estão associadas às concentrações de clorofila a e fósforo.

No terceiro quadrante (Q_3) a atenuação da luz é atribuída em mais destaque ao material particulado não-algal. Dessa forma as partículas podem conter P, mas não $Cl\alpha$. Em paralelo, mesmo que ocorra associação entre o nutriente e a transparência, a transparência (DS) é variável limitada em relação à biomassa de algas. Isso é explicado pela limitação de luz disponível para atividade fotossintética. No último quadrante (Q_4) Carlson e Havens (2005) apontam que outros fatores, como o consumo por zooplâncton e limitação de nitrogênio, podem reduzir a quantidade de partículas menores.

A discussão sobre a razão entre nitrogênio e fósforo (N:P) e eutrofização parece ser um desafio no trópico semiárido brasileiro. Não foi observado um efeito destacado do aspecto clima, apesar da razão N:P apresentar correlação negativa com VD e P_p ($r = -0.250$ e $r = -0.233$,

respectivamente). Assim, optou-se por uma síntese baseada nos microdados, invés das médias dos ciclos anuais, com o propósito de reduzir o efeito de dispersão da informação. Os valores de N:P < 20 representaram 8.4% das observações. As faixas de 20 a 50 e > 50 responderam por 45.3 e 46.3%, respectivamente.

A Tabela 5 contém valores médios das variáveis do estudo nas faixas de razão N:P. Maior destaque pode ser dado à concentração de *Cl_a*, que cresceu a partir de razão de limitação por nitrogênio, seguindo para a de co-limitação e de limitação por fósforo. Portanto, o incremento da razão ocorre em função da intensa utilização de P com conseqüente acúmulo de N. Portanto, a limitação por fósforo (N:P > 50) é na verdade um caráter de desequilíbrio trófico mais acentuado.

Tabela 5. Valores médios das variáveis do estudo nas faixas de razão N:P.

Faixa de N:P	VD (%)	N (mg N/L)	P (mg P/L)	<i>Cl_a</i> (µg/L)	CB (cél/mL)	DS (m)
< 20 n = 33 (µ _{N/P} = 14)	32.4 ^a (22.5) ^b	0.84 (0.62)	0.137 (0.111)	28.3 (12.1)	1.05E+5 (4.40E+4)	0.91 (0.71)
20 a 50 n = 179 (µ _{N/P} = 36)	40.0 (23.3)	1.86 (1.39)	0.116 (0.089)	60.0 (29.0)	3.77E+5 (9.09E+4)	0.91 (0.74)
> 50 n = 183 (µ _{N/P} = 76)	29.2 (13.9)	2.86 (2.11)	0.082 (0.065)	70.8 (40.5)	3.14E+5 (1.47E+5)	0.80 (0.65)

^a Média aritmética, ^b desvio padrão.

Os resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) apontaram que a medida de adequação de amostragem pelo teste de KMO foi satisfatória, com valor de 0.774 para todo o conjunto de variáveis. Mais detalhadamente, os valores de KMO para cada variável apresentaram a seguinte ordem: CB (0.393) < *Cl_a* (0.733) < N (0.735) < VD (0.749) < P_p (0.786) < P (0.866) < DS (0.885). Os resultados mostram que somente o KMO de CB não se adequaria ao critério de valor limite (≥ 0.5), desta forma, neste estudo, o teste aponta que a variável CB possui menor associação enquanto descritor do fenômeno de eutrofização. O teste de Bartlett's ratificou a homogeneidade de variância com *p*-valor < 0.001.

A Figura 5 contém o gráfico de dispersão da ACP com duas componentes principais. O grau de especificidade (complemento do grau de comunalidade) deve ser < 0.5. A interpretação mais direta é que quanto maior a especificidade, menor a relevância da variável. Apesar de todas as variáveis atenderem ao critério mínimo, a ordem de relevância foi: N (0.140) < P (0.167) < CB (0.204) < *Cl_a* (0.223) < DS (0.370) < P_p (0.488) < VD (0.493). A importância das variáveis segue a mesma ordem para o conjunto das duas componentes variáveis.

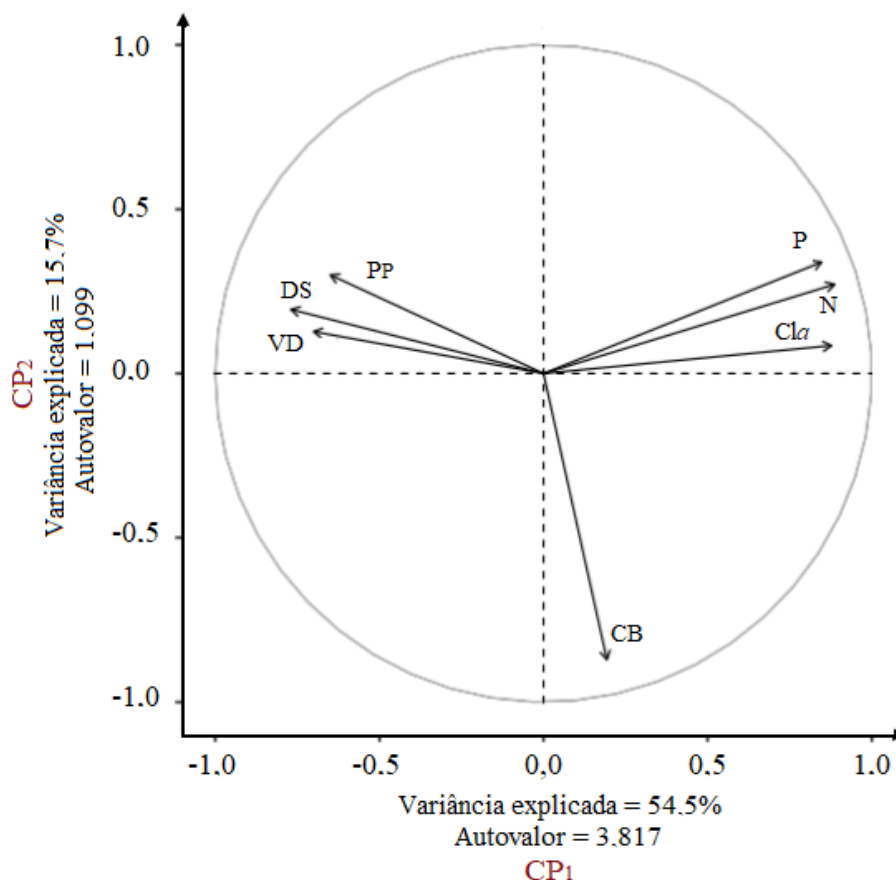


Figura 5. Gráfico de dispersão (Scatterplot) da ACP com as variáveis do estudo.

As cargas fatoriais da ACP foram computadas em rotação ortogonal *varimax*. Em ordem decrescente os resultados foram: N (0.927) > P (0.905) > Cla (0.871) na CP₁. Isso evidencia o acúmulo de nutrientes, de forma a explicar a elevação da produtividade primária. Na mesma componente o valor de carga fatorial de DS (-0.696) confirma a contraposição fenomenológica, pois a transparência sofre redução com o incremento de partículas na coluna líquida. O valor (absoluto) de DS foi menor, apontando presença de material particulado de origem distinta da biomassa algal. Em paralelo, as cargas de VD (-0.646) e P_p (-0.554) dão suporte ao efeito clima. Os valores receiptam, entretanto, que fenômenos internos dos reservatórios podem enfatizar o estado trófico, enquanto os elementos climáticos são menos intrínsecos. A carga de CB (-0.892) esteve concentrada na CP₂, confirmando o caráter de que esta variável é pouco dependente do estado trófico em si. Também, é possível que a escala de variação exija uma interpretação mais minudente.

Conclusão

O estudo tratou do grau de eutrofização em reservatórios localizados no semiárido brasileiro. Cotejou-se ainda o efeito da incerteza climática sobre o enriquecimento dos reservatórios por nutrientes, bem como sobre a densidade de cianobactérias. O estado trófico predominante em todos os reservatórios foi Eutrófico (IET = 66. ±8). Não houve distinção entre os resultados anuais baseados em média aritmética e geométrica. A variável fósforo apresentou peso um pouco maior na composição do índice, em razão de critério mais restritivo.

A fração de volume disponível (VD) nos reservatórios e a precipitação anual (P_p) mostraram efeito negativo sobre o estado trófico. Em análise bivariada por correlação, reduções de VD ou P_p implicaram incremento de nutrientes. No caso de análise multivariada, através de componentes principais (ACP), a interpretação de resultados foi assemelhada. Apesar disso, fenômenos internos ocorrentes na massa líquida, parecem ser mais enfáticos sobre o estado trófico, como por exemplo a disponibilização de fósforo da massa líquida, servindo de fonte nutricional para o reservatório, fenômeno esse observado pelos autores Moura *et al.* (2020), Cavalcante *et al.* (2022) e Rocha e Neto (2022). Portanto, os elementos climáticos são menos intrínsecos a isso, e devem ser entendidos de forma ordenada no tempo e como determinantes de agravamento da qualidade da água.

Os registros de cianobactérias apontaram correlações não significantes com nutrientes, transparência e variáveis de representação climática. Mesmo com Cl_a a correlação foi fraca. Isso foi ratificado no teste de adequação específica de amostras ($KMO_{CB} = 0.393$) na ACP, apesar do conjunto de variáveis atender ao critério mínimo de 0.5. Uma perspectiva mais elucidativa foi dada pela razão N:P, em que valores < 20 apontam densidades médias menores. A limitação por N parece ser um indicativo de degradação menor, pois tanto as concentrações de nutrientes quanto de clorofila *a* foram inferiores aos resultados de faixas de co-limitação e limitação por fósforo. Essa última aponta um caráter de desequilíbrio trófico mais destacado.

Referências

- Álvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.D.M., Sparovek, G. (2014) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22**(6), 711–728.
- Alves, M.T.R., Machado, K.B., Ferreira, M.E., Vieira, L.C.G., Nabout, J.C. (2019) A snapshot of the limnological features in tropical floodplain lakes: the relative influence of climate and land use. *Acta Limnologica Brasiliensia*. **31**, e10. <https://www.scielo.br/j/alb/a/iWGYcyZwHTbpPqhZBCJ88Sn/abstract/?lang=en>
- APHA (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21a Ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.
- Bhat, S.U., Mushtaq, S., Qayoom, U., Sabha, I. (2020) Water Quality Scenario of Kashmir Himalayan Springs - a Case Study of Baramulla District, Kashmir Valley. *Water Air Soil Pollut.* **231**(9), 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04796-4>

- Braga, G.G., Becker, V. (2020) Influence of water volume reduction on the phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake: a comparison of two morphofunctional approaches. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 92(1). <https://www.scielo.br/j/aabc/a/6rhf6dBSGCYDsyrZYDwDSJS/abstract/?lang=en>
- Brito, J.G.; Alves, L.F.; Espirito Santo, H.M.V. (2014) Seasonal and spatial variations in limnological conditions of a floodplain lake (Lake Catalão) connected to both the Solimões and Negro Rivers, Central Amazonia. *Acta Amazônica*, **44**(1), 121-133.
- Carlson, R.E. (1997) Trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**(2), 361-369. <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Carlson, R.E.; Simpson, L.A. (1996) Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. *North American Lake Management Society*. **96**.
- Carson, R.E.; Havens, K.E. (2005) Simple graphical methods for the interpretation of relationships between trophic state variables. *Lake and Reservoir Management*, **21**(1), 107-118.
- Cavalcante, H., Araújo, F., Becker, V., Lucena-Barbosa, JE (2022) Control of internal phosphorus loading using coagulants and clays in water and the sediment of a semiarid reservoir susceptible to resuspension. *Hidrobiologia*, **849**, 4059–4071. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04737-0>
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resolução CONAMA nº 357*, de 17 de março de 2005, Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>
- Chen, X., Liu, X., Peng, W., Dong, F., Chen, Q., Sun, Y., Wang, R. (2019) Hydroclimatic influence on the salinity and water volume of a plateau lake in southwest China. *Science of the Total Environment*, **659**, 746–755. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718348538>
- Costa, L. R. F.; Dantas, S. P. (2012) Clima e a problemática das secas no Ceará: um novo olhar sobre os grandes reservatórios e o avanço da desertificação. *Revista Geonorte*, Edição Especial 2. **2**(5), 1034 – 1042.
- Cunha, D. G. F., Finkler, N. R., Lamparelli, M. C., Calijuri, M. D. C., Dodds, W. K., Carlson, R. E. (2021) Characterizing Trophic State in Tropical/Subtropical Reservoirs: Deviations among Indexes in the Lower Latitudes. *Environmental Management*. **68**(4), 491–504. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-021-01521-7>
- Cunha, D. G. F.; Calijuri, M. C.; Lamparelli, M. C. A. (2013) trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). *Ecological Engineering*, **60**(1), 126-134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857413003091>
- de Freitas Lima, P., Sousa, MSR, Porfírio, AF, Almeida, BS, Freire, RHF, Santaella, ST (2015). Preliminary analysis on the use of Trophic State Indexes in a brazilian semiarid reservoir. *Acta Scientiarum. Ciências Biológicas*, **37**(3), 309-318.
- Finlay, K., Vogt, R. J., Simpson, G. L. e Leavitt, P. R. (2019) Seasonality of pCO₂ in a hard-water lake of the northern Great Plains: The legacy effects of climate and limnological conditions over 36 years. *Limnol. Oceanogr.* **64**(S1). <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/lno.11113>
- FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (s/f) *Portal Hidrológico*. ARH/CE, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Acesso em 25 set. 2022. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br>
- Guildford, S. J.; Hecky, R. E. (2000) Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography*, **45**(6), 1213-1223.
- Hair, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C. (2009) *Análise Multivariada de Dados*. 6a ed. Porto Alegre: Bookman. 688 pp.
- Kaiser, H. F. Rice, J. (1974) Little Jiffy, Mark Iv. *Educational and Psychological Measurement*, **34**, 111-117. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/001316447403400115?journalCode=epma>. Acesso em 08 fev. 2023.
- Klippel, G.; Macêdo, R. L.; Branco, C. W. C. (2020) Comparison of different trophic state indices applied to tropical reservoirs. *Lakes Reserv.* **25**, 214–229
- Kratzer, C. R.; Brezonik, P. L. A. (1981) Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin*, **17**(4), 713-715. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>

- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, RW, Jeppesen, E., Mazzeo, N., Scheffer, M. (2011) Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, **1**(2), 101-105. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.5268/IW-1.2.359>
- Moura, DS, Almeida, ASOD, Pestana, CJ, Girão, LG, Capelo-Neto, J. (2020) Potencial de carregamento interno de fósforo em reservatórios ao longo de uma bacia hidrográfica do semiárido. *RBRH*, **25**.
- Moura, DS, Neto, IEL, Clemente, A., Oliveira, S., Pestana, CJ, de Melo, MA, Capelo-Neto, J. (2020). Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. *Chemosphere*. **246**, 125686. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519329261>
- Omondi, R., Kembanya, E., Nyamweya, C., Ouma, H., Machua, SK, Ogari, Z. (2014) Recent limnological changes and their implication on fisheries in Lake Baringo, Kenya. *Journal of Ecology and Natural Environment*. **6**(5), 154-163. <https://repository.maseno.ac.ke/handle/123456789/3094>
- Otoch, B. C.; Studart, T. M. C.; Campos, J. N. B.; Portela, M. (2019) Gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas e a dependência da trajetória institucional: Nordeste Brasileiro e Austrália. *Recursos Hídricos (Lisboa)*, **40**, 43-51.
- Pereira Neto, C. M. (2017) Perspectivas da açudagem no semiárido brasileiro e suas implicações na região do Seridó Potiguar. *Sociedade e Natureza*, **29**(2), 285-294.
- Qin, B., Zhou, J., Elser, JJ, Gardner, WS, Deng, J., Brookes, JD (2020) Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in Lakes. *Environ. Sci. Technol.* **54**(6), 3191–3198. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05858>
- Richardson, J., Miller, C., Maberly, SC, Taylor, P., Globevnik, L., Hunter, P., Carvalho, L. (2018) Effects of multiple stressors on cyanobacteria abundance vary with lake type. *Global Change Biology*, **24**(11), 5044- 5055.
- Rocha, MDJD, Neto, IEL (2022) Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs. *Journal of Environmental Management*, **312**, 114983.
- Santos, JA, Marins, RV, Aguiar, JE, Challar, G., Silva, FA, Lacerda, LD (2017) Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions. *Journal of Limnology*, **76**(1).
- Sperotto, A., Molina, JL, Torresan, S., Critto, A., Pulido-Velazquez, M., Marcomini, A. (2019) Water quality sustainability evaluation under uncertainty: A multi-scenario analysis based on bayesian networks. *Sustainability*, **11**(17), 4764.
- SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (2017) *Resolução 115, 23/11/2017*. Aprova a Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL nº 107, e 27 de julho de 2017, 3 pp.
- The Jamovi Project (2020). Jamovi. (Version 1.8.4) [Computer Software]. Recuperado de <https://www.jamovi.org>
- Toledo, A.P.J., Talarico, M., Chinez, S.J., Agudo, E.G., (1983) A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais, *12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Camboriú, Brasil.
- Walling, B., Chaudhary, S., Dhanya, CT, Kumar, A. (2017) Estimation of environmental flow incorporating water quality and hypothetical climate change scenarios. *Environ Monit Assess*, **189**(5), 1-15. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-017-5942-2>
- Wiegand, M. C., Nascimento, A. T. P., Costa, A. C., Neto, I. E. L. (2021) Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. *Journal of Arid Enviroments*, **184**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196320302202>