

Impacto da dinâmica de estratificação térmica sobre a qualidade de água em sistema em cascata – estudo de caso no semiárido brasileiro

Impact of thermal stratification dynamics on water quality in a cascade system – a case study in the Brazilian semiarid region


- **Data de entrada:**
05/05/2022
- **Data de aprovação:**
26/03/2023

Josefa Marciana Barbosa de França^{1*} | José Capelo Neto¹ | Allan Clemente¹ | Walt Disney Paulino¹ | Zulene Almada Teixeira¹


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.017>

ORCID ID

França JMB  <https://orcid.org/0000-0001-6167-0655>

Capelo Neto J  <https://orcid.org/0000-0002-7669-7153>

Clemente A  <https://orcid.org/0000-0003-4364-5362>

Paulino WD  <https://orcid.org/0000-0002-9371-8577>

Resumo

O presente estudo focou no aporte de cargas dos macronutrientes (NT e PT) e na influência da estratificação do Reservatório Castanhão em relação à transposição de água do Canal da Integração até o ponto a jusante do Reservatório Curral Velho. A metodologia de análise baseou-se na análise da perfilagem da coluna de água e na aplicação de testes estatísticos. Verificou-se um padrão sazonal da variável da temperatura, com processos de estratificação no primeiro semestre e desestratificação no segundo. O OD e pH apresentaram estratificação irregular. A CE e os SDT não estabeleceram nenhum padrão. Identificou-se que existem diferenças significativas entre a temperatura, OD e pH, em relação aos pontos Castanhão e CIN21, o que ocasionou a desoxigenação nos pontos CIN21 e CIN08, e a oxigenação natural foi constatada a 43,50km. Com relação às cargas de nutrientes NT e PT, essas têm tendência a oscilar conforme a vazão liberada a partir do gerenciamento do reservatório.

Palavras-chave: Transferência de água. Reservatórios em cascata. Cargas de nutrientes.

Abstract

The present study focused on the input of macronutrient loads (NT and PT) and on the influence of the stratification of the Castanhão Reservoir in relation to the transposition of water from the Integration Channel to the point downstream of the Curral Velho Reservoir. The analysis methodology was based on the analysis of the water column profiling and the application of statistical tests. A seasonal pattern of variable the temperature was verified, with processes of stratification in the first semester and destratification in the second. The OD and pH showed irregular stratification. The EC and SDTs do not set any standards. It was identified that there are significant differences between the temperature, DO and pH, in relation to Castanhão and CIN21 points, which caused deoxygenation at CIN21 and CIN08 points and natural oxygenation was observed at 43.50km. With respect to NT and PT nutrient loads, these trends fluctuate with release from reservoir management.

Keywords: Water transfer. Cascading reservoirs. Loads of nutrients.

¹ Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autora correspondente:** marciana.fran@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Barragens e transferências de água já existem há milhares de anos, mas apenas nos últimos 50-75 anos tornaram-se massivas em tamanho e alcance. Estima-se que mais de 45.000 barragens com alturas superiores a 15m de altura são registradas no mundo e que centenas de milhares de barragens menores tenham sido construídas em rios e fazendas. Avalia-se que, no hemisfério norte, apenas 23% da vazão em 139 dos maiores rios não foi afetada por reservatórios (DYNESIUS; NILSSON, 1994).

A qualidade da água superficial de uma região é determinada pela topografia local, hidrologia e hidrogeologia na área de captação, agregado a fatores climáticos e influências antropogênicas, como atividades urbanas, industriais e agrícolas (LOPES et al., 2018). A deterioração da qualidade da água é um problema comum em reservatórios cercados por atividades antrópicas que recebem altas cargas de sólidos suspensos, matéria orgânica e nutrientes (ROSSEL; FUENTE, 2015).

Ao transformar um trecho de um rio em um reservatório, ocorre a desaceleração do fluxo subsequentemente, onde o rio passa de um sistema dominado por produção alóctones para um sistema mais lacustre, onde predomina a produção autóctone de matéria orgânica, aumentando a produção primária in situ, e altera os ciclos biogeoquímicos do carbono (C), fósforo (P), azoto (N) e silício (Si), (FRIEDL; WUEST, 2002; KUNZ et al., 2011). Muitos são os desafios para a gestão dos reservatórios situados em regiões tropicais, pois a qualidade da água, associada ao represamento, ocasiona diversas alterações relacionadas aos processos de estratificação térmica e química da coluna de água (BOEHRER; SCHULTZE, 2008).

Compreender os efeitos das mudanças de longo e curto prazo em diferentes escalas espaciais tem se mostrado extremamente difícil (ORMEROD; JENKINS, 1994). Padrões e processos podem ser

altamente específicos da bacia hidrográfica, e é preciso ter cautela sobre a transferibilidade dos resultados para diferentes escalas espaciais e temporais e para outros locais (NEAL, et al., 1997; SOULSBY, et al., 2000). No entanto, mudanças hidroquímicas ao longo de eventos hidrológicos, estações e períodos de tempo mais longos podem fornecer informações valiosas sobre os processos externos e internos que influenciam a hidroquímica da bacia hidrográfica (SOULSBY, 2001).

À medida que conjuntos de dados biológicos de longo prazo se tornam disponíveis e técnicas estatísticas multivariadas são desenvolvidas, insights sobre respostas biológicas também estão se tornando possíveis (SOULSBY, 2001). Técnicas estatísticas multivariadas têm sido aplicadas para caracterizar e avaliar a qualidade da água doce. A interpretação de matrizes de dados de qualidade da água para extração de informações úteis e gestão eficaz das águas superficiais pode ser abordada por meio do uso de métodos estatísticos multivariados, como regressão, análise discriminante (DA), análise de cluster (CA), análise de componentes principais (PCA) e análise fatorial (FA) (JUAHIR et al., 2010).

Corpos de águas localizados em áreas de baixa latitude, como as zonas tropicais, são fundamentalmente imprevisíveis ou sazonais, e pesquisas assinalam que nessas regiões os processos de estratificação são predominantemente oligomíticos (misturando irregularmente) ou polimíticos (misturando muitas vezes por ano) (BOEHRER; SCHULTZE, 2008). Contudo, a pouca disponibilidade de dados de reservatórios inseridos em áreas tropicais e subtropicais dificulta as investigações limnológicas nestes ecossistemas (GRANZOTTI et al., 2018).

Estudar os processos de estratificação em reservatórios é fundamental para entender as diversas alterações físicas e químicas no corpo

d'água, como distribuição de gases dissolvidos e nutrientes na água; assim como acúmulo de substâncias e elementos químicos no hipolímnio, o que ocasiona a formação de substâncias redutoras, e, por conseguinte, a desoxigenação desta camada favorece eventos de eutrofização, devido à recirculação interna (BENETTI et al., 2006; LOPES et al., 2018).

A estratificação térmica é um fator importante na regulação de processos químicos e biológicos, já que as diferenças de densidade influenciam a mistura vertical e a distribuição de organismos, de substâncias químicas, de íons e de partículas, que além de outras consequências, podem alterar a distribuição do fitoplâncton no perfil vertical da coluna d'água de reservatórios (BECKER et al., 2008).

Em reservatórios de regiões tropicais é comum a ocorrência de estratificação e desestratificação térmica diária, e a principal hipótese que explica essa condição é o resfriamento do ar nos períodos noturnos e a forte incidência solar durante o dia (BARBOSA; TUNDISI, 1980). Quando esses reservatórios liberam água para um sistema a jusante, através de uma tomada d'água no fundo do reservatório, essa variabilidade diária pode implicar na liberação de águas hipolimnéticas mais frias e anóxicas e impactar na qualidade da água do rio e canal por centenas de quilômetros, portanto pode ser uma fonte de degradação ambiental, destruindo serviços ecossistêmicos e econômicos prestados às comunidades ribeirinhas (KUNZ et al., 2011).

O monitoramento de ecossistemas aquáticos é uma ferramenta importante para a gestão ambiental, pois fornece informações que facilitam o diagnóstico da qualidade das águas líticas e lênticas, permitindo identificar os principais impactos responsáveis pela degradação dos recursos hídricos. Compreender como os fatores antrópi-

cos e naturais controlam a qualidade da água e como as relações mudam ao longo do tempo e do espaço ajudará os gestores de recursos hídricos a direcionar escalas e fatores apropriados para a melhoria de seus esforços de gestão da qualidade da água.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar o impacto da estratificação térmica do Reservatório Castanhão em relação aos parâmetros limnológicos relacionados à eutrofização de corpos hídricos no início do macrosistema em cascata da região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. As hipóteses testadas foram: (a) a estratificação térmica do Açude Castanhão interfere na qualidade da água do sistema a jusante, (b) as concentrações de nutrientes não apresentam diferenças significativas entre os diversos pontos estudados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O Castanhão, maior reservatório do Ceará, foi construído em 2003 e está localizado no município de Alto Santo com capacidade de armazenamento de 6.700hm³. A principal finalidade desse manancial é manter a transposição de água pelo Canal da Integração para atender aos múltiplos usos, principalmente o abastecimento humano da Região Metropolitana de Fortaleza. Na liberação pelas comportas de fundo do açude Castanhão, parte vai por gravidade para o Rio Jaguaribe e o restante é bombeado para o Canal da Integração (Fig. 1). O sistema de monitoramento das vazões do Canal de Integração é mensurado pela quantidade de horas trabalhadas pelas bombas situadas na estação de bombeamento (EB Castanhão), localizada a jusante do reservatório (Fig. 1).

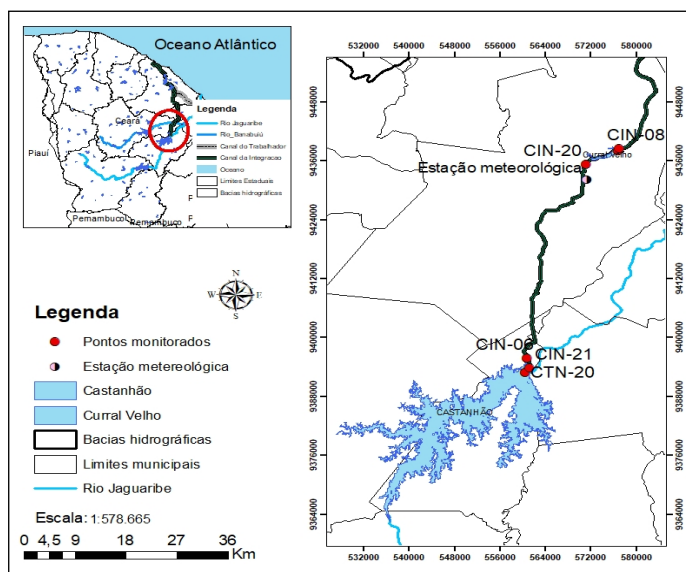


Figura 1 - Mapa de localização dos reservatórios no sistema em cascata Fortaleza.

2.2 Estudo das vazões e da qualidade da água

O estudo contemplou seis pontos de monitoramento, iniciando no Reservatório Castanhão até o ponto localizado a jusante do Reservatório Cur-

ral Velho, denominado de CIN08. As coordenadas de localização da campanha de monitoramento, ano de construção, volume e área das bacias hidrográficas dos reservatórios, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de localização dos pontos de monitoramento, volume e área da hidráulica dos açudes considerados no estudo

| Número | Descrição | Coordenadas (UTM 24M -Sirgas 2000) | | Ano de construção | Volume (hm ³) | Área da bacia hidrográfica (Km ²) |
|--------|--------------------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------|---|
| | | E | N | | | |
| 1 | Castanhão (Superfície e fundo) | 560.466 | 9.392.963 | 2003 | 6.700 | 44.723,30 |
| 2 | CIN21 | 561.214 | 9.393.802 | - | - | - |
| 3 | CIN06 | 560.737 | 9.395.806 | - | - | - |
| 4 | CIN20 | 571.149 | 9.435.426 | - | - | - |
| 5 | Curral Velho | 576.873 | 9.438.016 | 2007 | 12,17 | 83,47 |
| 6 | CIN08 | 577.017 | 9.438.537 | - | - | - |

Foram realizadas doze campanhas para o monitoramento da qualidade da água, com frequência trimestral, no período de 2017 a 2019. As coletas foram feitas a 30 cm da superfície nos reservatórios Castanhão e Curral Velho e nos quatro trechos dos Canal da Integração. No período em análise, a coluna de água do Castanhão tinha aproximadamente 19 m de profundidade, locali-

zado próximo à estrutura dos taludes de barramento da tomada de água. As variáveis analisadas e os métodos utilizados são citados na Tabela 2. Essas informações foram obtidas dos bancos de dados da Cogerh. Os dados climatológicos: precipitação, velocidade do vento e insolação foram retirados do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 2 - Variáveis qualitativas analisadas no período de 2017 a 2019

| Variáveis | Sigla | LQ | Método |
|--|-------|------|---|
| Condutividade elétrica (mS.cm ⁻¹) | CE | 0,01 | Sonda YSI 6600 |
| Cianobactérias (Células.mL ⁻¹) | | - | Câmara de Sedgewick-Rafter - Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 2012 |
| Fósforo total (mg.L ⁻¹) | PT | 0,01 | Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-P-E) – APHA, 201 |
| Nitrogênio total (mg.L ⁻¹) | NT | 0,94 | Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-NO3--E) – APHA, 2012. |
| Oxigênio dissolvido (mg.L ⁻¹) | OD | 0,05 | Sonda YSI 6600 |
| pH | pH | 0,01 | Sonda YSI 6600 |
| Sólidos dissolvidos totais (mg.L ⁻¹) | SDT | 2,00 | Gravimetria (2540 D) e Cálculo – APHA, 2012. |
| Temperatura da água (°C) | T | 0,01 | Sonda YSI 6600 |

LQ - Limite de Quantificação.

Fonte: COGERH.

2.3 Análise estatística

Para a representação gráfica dos dados empregou-se o Boxplot, ou Box-and-Whisker plot. O Boxplot é particularmente útil para comparar várias amostras em um mesmo gráfico (FRERY; CRIBARI-NETO, 2011).

O programa Rstudio foi aplicado para o teste de normalidade dos dados, a partir do gráfico QQ-plot, e pelo teste de Shapiro-Wilks. Considerou-se normal o conjunto de dados que apresentam todos os pontos dentro dos limites do gráfico e também p-valor maior do que a significância adotada de 5%. Utilizou-se o teste T para identificar diferenças significativas entre as variáveis ambientais, caso os dados atendam aos requisitos de normalidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dados climatológicos

Com relação aos dados climatológicos (Fig. 2A), observa-se que as precipitações concentraram-

-se principalmente no primeiro semestre dos três anos (2017, 2018 e 2019) em análise, com valores médios de 698, 802 e 676 mm, respectivamente. Nos anos de 2017 a 2019, as precipitações ficaram abaixo da média (800 mm) para o estado do Ceará (INMET, 2019). O valor médio da velocidade dos ventos (Fig. 2B) foi aproximadamente de 2,50m.s. Ocorreram valores atípicos, com aumentos nos meses de janeiro a março de 2019, com conseqüente redução até o mês de julho, quando retornaram próximo ao valor médio. Observaram-se também maiores períodos de insolação no primeiro semestre dos anos de 2017 e 2018, atingindo valores de 6h diárias, enquanto no segundo semestre esses valores foram menores. Em 2019, ocorreram picos de insolação de até 11h nos meses de janeiro e fevereiro. Nos meses subsequentes, a frequência reduziu-se a um valor médio abaixo de 6h diárias e com variabilidades mais intensas até o final do período chuvoso (Julho). Após isso, a insolação reduziu a variabilidade e estabilizou novamente em torno das 6h diárias (Fig. 2C).



Figura 2 - Dados climatológicos da área de estudo: precipitação (A), velocidade do vento (B) e insolação (C)

3.2 Dinâmica de estratificação do reservatório Castanhão

O perfil vertical da temperatura de água do reservatório Castanhão apresentou estratificação sazonal no primeiro semestre dos anos avaliados (Fig. 3). Nesses períodos, a água mais fria concentrou-se na camada mais profunda, ou hipólímnio, enquanto as temperaturas mais elevadas foram registradas na camada superior, epilímnio. No segundo semestre, houve uma menor tendência de estratificação térmica, além de menores temperaturas abaixo da média no primeiro semestre. Nesses períodos de estratificação sazonal, observaram-se (Tabela 3) os maiores gradientes térmicos médios nos meses de março/2017 (1,39 °C), abril/2018 (1,60 °C) e março/2019 (1,26 °C).

Esses pequenos gradientes térmicos verticais da água podem induzir elevada estabilidade à estratificação uma vez que, por exemplo, a diferença de densidade da água entre 29° e 30°C é 3,7 vezes maior que a variação entre 6 e 7°C, ou seja, em regiões tropicais não há necessidade de grandes diferenças de temperatura entre as sucessivas camadas para que se estabeleça uma estratificação térmica estável (NOGUEIRA, 1991). Pesquisas realizadas em 54 dos maiores reservatórios localizados em baixa latitude avaliaram que, apesar de existir ambiguidade na literatura em relação ao comportamento da estratificação dos corpos d'água nos trópicos, a maioria dos reservatórios em baixa latitude apresentou estratificação sazonal (WINTER et al., 2019).

A estratificação química do oxigênio dissolvido (OD) e do pH apresentou comportamentos similares, exibindo um padrão semelhante ao da estratificação térmica. A desestratificação térmica

do segundo semestre de 2017, entretanto, não foi suficiente para elevar os níveis de OD nem do pH do hipólímnio. Pode-se visualizar, também na Fig. 3, que o OD na camada de fundo atingiu valores próximos a zero nos períodos em que ocorreu a estratificação térmica. Já no segundo semestre dos anos 2018 e 2019, a desestratificação térmica foi suficiente para elevar o oxigênio e o pH na camada inferior, e o fator que pode ter contribuído para a desestratificação em 2019 dessas duas variáveis, menor insolação na área de estudo e a maior intensidade do vento.

No ano de 2018, a precipitação pluviométrica ficou próxima à média histórica e foi maior do que nos outros dois anos estudados. Em 2019, foi registrada maior velocidade do vento no segundo semestre.

Não foram observados processos bem definidos de estratificação química com relação à condutividade elétrica (CE) e sólidos dissolvidos totais (SDT), conforme ocorrido com a estratificação térmica, mostrando que essas variáveis são menos sensíveis aos efeitos das diferenças de temperatura entre camadas. Um ponto importante a se observar é que a variabilidade sazonal foi observada após a ocorrência das precipitações pluviométricas (802mm) da primeira metade de 2018, momento em que houve uma diminuição expressiva de ambos os parâmetros quando comparados ao ano de 2017. A tendência de redução SDT e CE, após o período de chuvas, ocorreu em 12 pontos da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns, onde SDT variou de 5,9 a 80,6mg.L⁻¹ (chuva) e 5,8 a 68,0mg.L⁻¹ (seca) e a condutividade elétrica (CE) apresentou variação de 13,33 a 168,80ms.cm⁻¹ (chuva) e 13,3 a 142,7ms.cm⁻¹ (seca) (RIBEIRO et al., 2016).

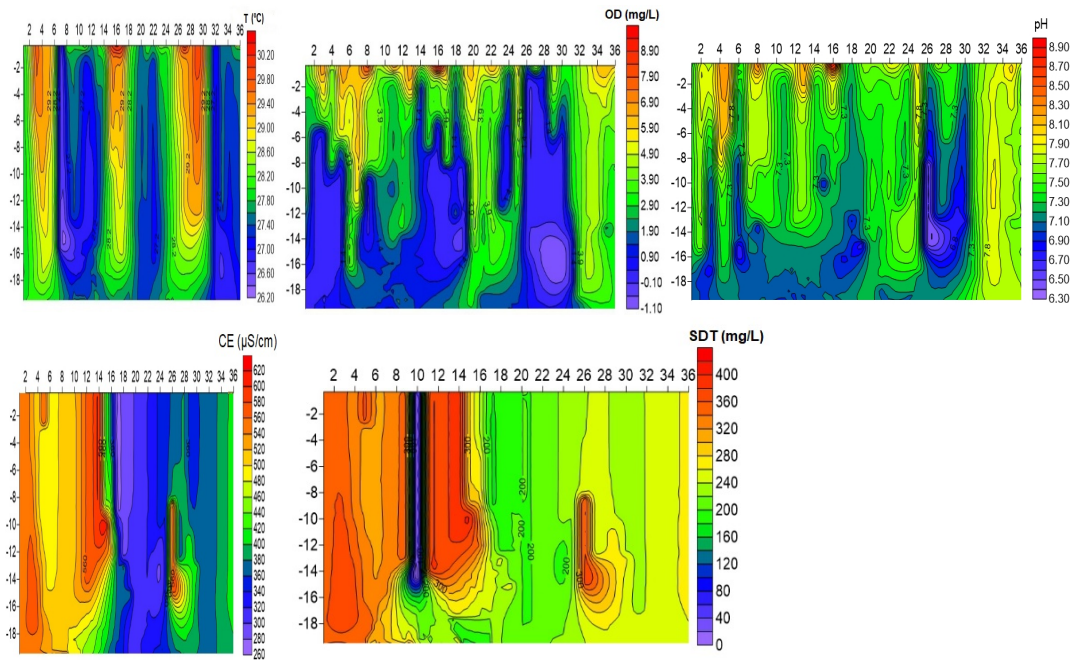


Figura 3 - Perfil da coluna da água das variáveis ambientais: temperatura da água, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais para o período de 2017 a 2019. O eixo Y representa a profundidade e o X o mês de monitoramento

Tabela 3 - Variáveis limnológicas para os períodos de estratificação do Castanhão

| Período (mês.ano) | Valores | Temperatura (°C) | OD (mg.L) | pH | CE (mS.cm) | SDT (mg.L) |
|-------------------|-----------|------------------|-----------|------|------------|------------|
| Março/2017 | Máximo | 29,71 | 6,89 | 7,71 | 533 | 346 |
| | Mínimo | 28,32 | 0,35 | 6,76 | 568 | 369 |
| | Diferença | 1,39 | 6,54 | 0,95 | -35 | -23 |
| Abril/2018 | Máximo | 30,23 | 9,86 | 8,95 | 368 | 240 |
| | Mínimo | 28,72 | 0,19 | 7,17 | 521 | 340 |
| | Diferença | 1,60 | 9,67 | 1,78 | -153 | -100 |
| Março/2019 | Máximo | 30,33 | 5,08 | 7,74 | 374 | 243 |
| | Mínimo | 29,07 | 0,21 | 7,04 | 384 | 250 |
| | Diferença | 1,26 | 4,87 | 0,7 | -10 | -7 |

3.3 Análise da qualidade de água do sistema de transferência de água

A análise estatística dos dados de fósforo (P) e nitrogênio (N) nos pontos Castanhão superficial x Castanhão fundo (Tabela 4) não apontou diferença significativa no período em análise. Nos anos de 2017 a 2019, o volume de armazenamento do Castanhão era muito baixo, próximo a 6% para o período chuvos e volume menor no período de estiagem. Assim, para o período estudado, constatou-se que o abastecimento do sistema com água da camada superficial liberaria quantidades

similares de nutrientes que a água retirada pela descarga de fundo em funcionamento.

No lago Baikal, na Rússia siberiana, a extensão do esgotamento dos nutrientes das águas superficiais e a magnitude da biomassa e da produtividade do fitoplâncton foram fortemente correlacionadas com o grau de estratificação térmica (GOLDMAN et al., 1996). Su et al. (2019) relataram que a estratificação de oxigênio dissolvido influenciou notavelmente na quantidade e na especiação de N durante os verões no Lago Longjing, China. No hipolimnio, NH⁴⁺ contribuiu

com quase 85% no lago. Além disso, aproximadamente 70% do N_2O foram acumulados no hipolimnio. Nesses dois casos, há de se observar que a estratificação em lagos temperados ocorreu por longos períodos de tempo, propiciando tempo suficiente para que os nutrientes fossem diminuídos ou extintos nas camadas superiores, o que não acontece em lagos localizados no semiárido brasileiro, onde o período de estratificação/desestratificação é diário.

Salienta-se, entretanto, que esse resultado pode estar restrito à situação atual de baixa disponibilidade hídrica, não representando o comportamento de períodos com maiores volumes acumulados. Conforme monitoramento da COGERH (2019), desde a construção no ano de 2003, o reservatório Castanhão atingiu a cota máxima (106 m – cota de sangria) apenas no ano de 2004. Nos três anos em análise (2017 a 2019), a maior recarga foi de $582,99\text{hm}^3$, atingiu apenas 8,60% da capacidade total, no primeiro semestre de 2018. Em dezembro de 2019, final do período em análise, o armazenamento permaneceu baixa $187,37\text{hm}^3$ (2,8%).

Os pontos Castanhão Superfície x CIN21 (jusante da barragem do Castanhão) tampouco apresentaram diferença significativa para P e N, nem do

número de cianobactérias. Por outro lado, as variáveis OD, pH e temperatura apresentaram diferenças significativas (Tabela 4), corroborando o comportamento dos perfis da coluna de água onde se constatou processo de estratificação para essas variáveis na maioria do período estudado.

Com base nos resultados do teste T (Fig. 16), pode-se visualizar que a liberação de água pela camada hipolimnética forçou uma baixa concentração de oxigênio dissolvido nos pontos CIN21 e CIN06, atingindo valores mínimos de 1,03 e 1,62 mg L^{-1} e médios de 2,62 e 4,35 mg L^{-1} , respectivamente. Esses resultados são considerados abaixo do recomendado (5,00 mg L^{-1}) para corpos lóticos de acordo com BRASIL (2011). Um processo de reoxigenação natural foi identificado no ponto CIN20 (mínimo: 3,69 mg L^{-1} e médio: 6,91 mg L^{-1}), localizado a aproximadamente 43,50 km a jusante do Reservatório Castanhão (Fig. 16). O pH apresentou comportamento similar ao identificado com o OD. Com relação à temperatura, a estrutura de concreto e a reduzida liberação de vazão no período em análise, assim como as elevadas insolações na área em estudo, ocasionaram o aumento da temperatura da água ao longo do Canal da Integração (Fig. 4).

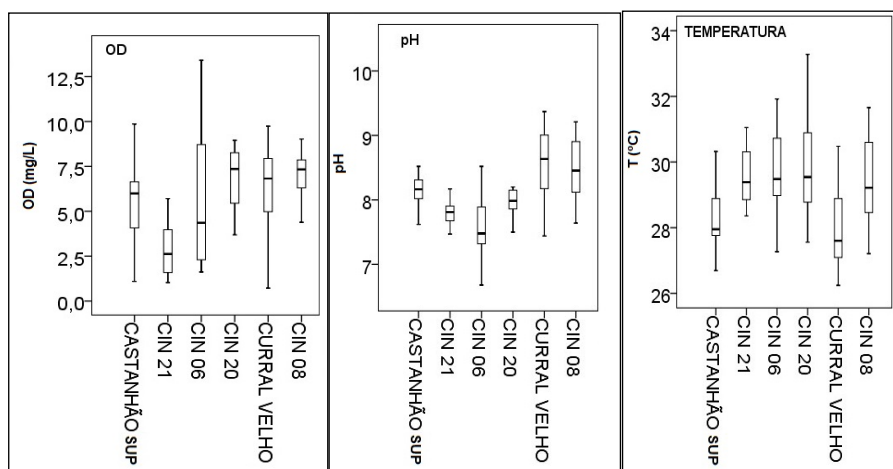


Figura 4 - OD, pH e temperatura médios nos pontos analisados para os anos de 2017 - 2019.

Conforme estudos realizados por Langbein e Durum (1967), a velocidade da recuperação do oxigênio dissolvido depende da profundidade do rio, das áreas de superfície, da turbulência e fatores climáticos. Pesquisas realizadas em dois reservatórios, Blue Ridge e Chatuge, no vale do Tennessee (EUA), com vazões médias de 17 e 13 m³ s⁻¹, constataram valores mínimos de oxigênio de 3,4 e 1,3 mg L⁻¹, com impactos identificados até uma distância de 24 e 11 km a jusante dos reservatórios, respectivamente, atingindo nesses pontos uma reoxigenação de 6,0 mg L⁻¹ (HIGGINS; BROCK, 1999). Resultados de outro estudo realizado no rio Pelagus, a mais de 150 km a jusante da barragem, mostraram baixa concentração de oxigênio dissolvido quando o vertedouro do reservatório a montante foi fechado (LING et al., 2017).

Dados de campo das regiões subtropical da Austrália e tropical da Malásia sugerem que, na prática, a hipóxia pode se estender a dezenas ou centenas de quilômetros a jusante da barragem (WALKER et al., 1978; WERA et al., 2019). Pesquisas realizadas em 20 barragens no vale do Tennessee (EUA), com mais de 500 km de extensão de canais e rios, mostraram que esses corpos lóticos eram adversamente impactados pela liberação da água da camada profunda dos reservatórios a montante com baixo teor de oxigênio dissolvido, impactando adversamente a qualidade da água liberada, o habitat aquático da biota e a recreação (HIGGINS; BROCK, 1999). Nesses reservatórios, a baixa concentração de OD das águas foram mitigadas com a utilização, injeção de ar e oxigênio por meio de difusores (HIGGINS & BROCK, 1999).

Uma prática adotada para reduzir a captação de cianobactérias em reservatórios destinados ao abastecimento humano é a retirada multiníveis (CHÍCHARO et al., 2006). Descargas multiníveis foram aplicadas para prevenir floração de cianobactérias que outrora atormentaram um estuário em Portugal (CHÍCHARO et al., 2006). Processo semelhante também foi observado em reservatórios tropicais, como é o caso do lago Paranoá em Brasília (STARLING et al., 2002; CORRÊA, 2011). Mesmo após a instalação e funcionamento das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) na sua bacia hidrográfica, que diminuiram significativamente a entrada de fósforo, o reservatório continuou apresentando altos valores de clorofila-a, que só foram plenamente reduzidos com a adoção da técnica de eco-hidrologia denominada “flushing”, com a abertura frequente das comportas com objetivo de descartar a camada superficial da água e conseqüentemente a biomassa algal que se perpetuava devido ao processo de alimentação interna de fósforo advinda dos sedimentos (STARLING et al., 2002; CORRÊA, 2011).

A comparação dos pontos Curral Velho x CIN08 (jusante do Curral Velho) apresentou diferença significativa em relação à temperatura, o que indica que o reservatório apresenta estratificação térmica. E os pontos Castanhão Superficial x Curral Velho não apresentaram diferença significativa para a maioria das variáveis, com exceção da temperatura (Tabela 13), indicando que as variáveis analisadas não mudam significativamente e que o corpo hídrico controlador da qualidade da água é o Açude Castanhão, o corpo hídrico de maior porte.

Tabela 4 - Resultado do Teste U para as variáveis ambientais

| Pontos: Castanhão superfície x Castanhão fundo | | |
|--|---------|-------------------|
| Variável | p-valor | Diferença |
| PT | 0,426 | Não significativa |
| NT | 0,843 | Não significativa |

Continua...

Tabela 4 - Continuação...

| Pontos: Castanhão superfície x CIN21 | | |
|---|---------|----------------------|
| Variável | p-valor | Diferença |
| Cianobactérias | 0,931 | Não significativa |
| NT | 0,225 | Não significativa |
| OD | 0,006 | Significativa |
| PT | 0,603 | Não significativa |
| pH | 0,023 | Significativa |
| Temperatura | 0,004 | Significativa |
| Pontos: Curral velho x CIN08 | | |
| Variável | p-valor | Diferença |
| Cianobactérias | 0,885 | Não significativa |
| NT | 0,751 | Não significativa |
| OD | 0,665 | Não significativa |
| PT | 0,665 | Não significativa |
| pH | 0,795 | Não significativa |
| Temperatura | 0,019 | Significativa |
| Pontos: Castanhão superfície x Curral Velho | | |
| Variável | p-valor | Diferença |
| Cianobactérias | 0,403 | Não significativa |
| NT | 0,061 | Não significativa |
| OD | 0,403 | Não significativa |
| PT | 0,402 | Não significativa |
| pH | 0,057 | Não significativa |
| Temperatura | 0,285 | Não significativa |

3.4 Estimativa das cargas de nutrientes provenientes do reservatório Castanhão

A vazão média da operação realizada nos três anos em análise foi de 7.350 L s⁻¹ (COGERH, 2019). Conforme se pode visualizar na Fig. 5A, a contribuição de nitrogênio total (NT) que aportou para o Canal da Integração registrada nos três anos foi contro-

lada pela variação da vazão. O maior valor registrado de carga de nitrogênio (55,96 ton mês⁻¹) foi em abril de 2017, quando a vazão era de 9.819 L s⁻¹. Em outubro de 2018 ocorreu o segundo maior aporte (47 ton mês⁻¹), cuja vazão registrada foi de 12.230 L s⁻¹. Em abril de 2019, registrou-se a menor carga de NT (11,92 ton mês⁻¹), com aporte de vazão de 1.814 L s⁻¹.

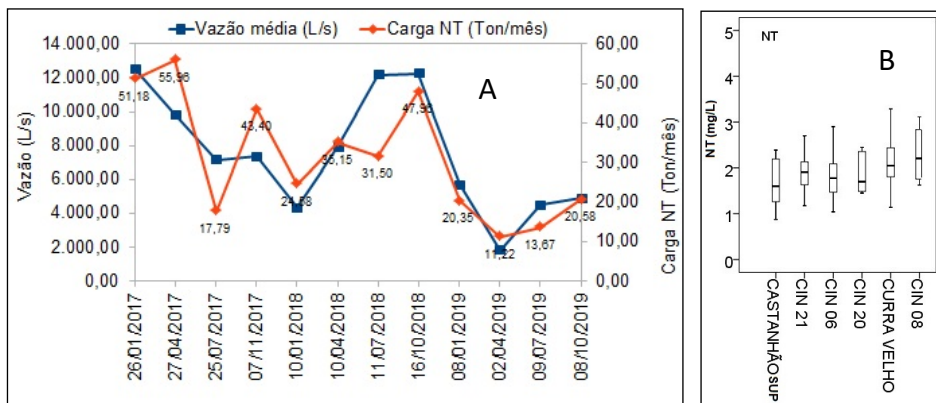


Figura 5 - Carga de NT do Castanhão para o Canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de NT para o período em análise (B).

Com base na análise realizada neste estudo, não foi possível identificar ligação entre o período de chuvas e o aumento da carga de nutrientes provenientes das bacias hidrográficas de contribuição. Neste período, ocorreram pequenas recargas volumétricas para o reservatório Castanhão. Adverte-se que todos os resultados médios de

NT (Fig. 5B) atenderam aos valores recomendados para os ambientes lóticos ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), mas não para os lênticos ($1,27 \text{ mg L}^{-1}$), conforme a legislação em vigor para a classe 2 (BRASIL, 2009). Adicionalmente, pode-se observar na Tabela 5 que o nitrogênio total não apresentou diferença significativa ao longo do trecho monitorado.

Tabela 5 - Resultados do Teste T para o nitrogênio nos pontos monitorados

| Teste T para o nitrogênio total | | | | | |
|---------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------------|
| Pontos N | Castanhão_Sup | CIN 21 | CIN 06 | CIN 20 | Curral Velho |
| CIN 21 | 1 | - | - | - | - |
| CIN 06 | 1 | 1 | - | - | - |
| CIN 20 | 1 | 1 | 1 | - | - |
| Curral Velho | 0,62 | 1 | 1 | 1 | - |
| CIN 08 | 0,11 | 1 | 0,64 | 0,30 | 1 |

Com relação ao aporte de fósforo para o macro-sistema (Fig. 6A), identificou-se também que as cargas tendem a oscilar conforme a variação da vazão liberada pelo açude Castanhão. Os maiores valores registrados de carga de fósforo foram em janeiro de 2017 ($7,67 \text{ ton mês}^{-1}$) e outubro de 2018 ($4,88 \text{ ton mês}^{-1}$), e os menores em janeiro de 2018 ($1,03 \text{ ton mês}^{-1}$) e em abril de 2019 ($1,06 \text{ ton mês}^{-1}$). Enfatiza-se que todos os resul-

tados de fósforo total (Fig. 6B) estão muito acima dos valores recomendados para ambientes lóticos ($0,03 \text{ m L}^{-1}$) e lênticos ($0,05 \text{ m L}^{-1}$), conforme a legislação em vigor para a classe 2 (BRASIL, 2009). Assim como o que aconteceu com o nitrogênio, não foram observadas diferenças significativas para as concentrações de fósforo ao longo do trecho estudado, conforme dados apresentados na Tabela 6.

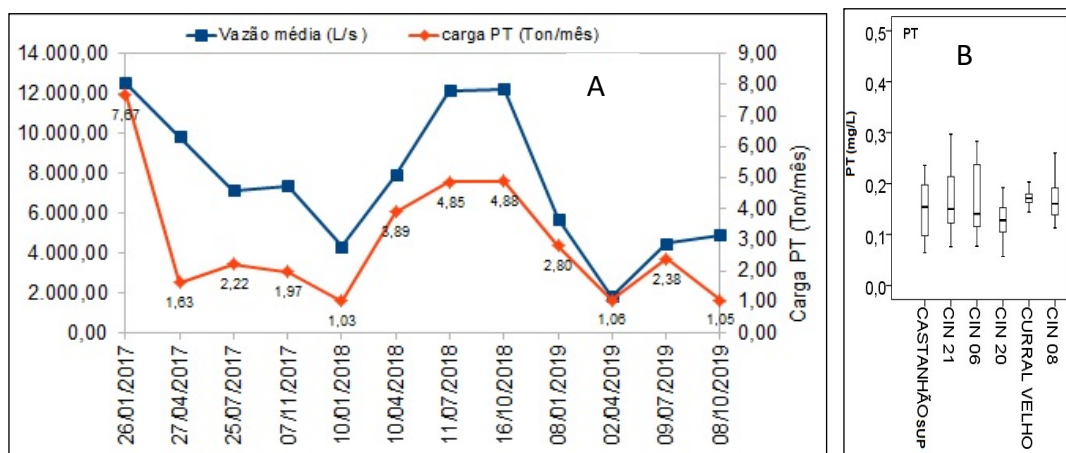


Figura 6 - Carga de PT do Castanhão para o Canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de PT para o período em análise (B)

Tabela 6 - Resultados do Teste T para o fósforo nos pontos monitorados

| Teste T para o fósforo | | | | | |
|------------------------|---------------|---------|--------|--------|--------------|
| Pontos | Castanhão_Sup | CIN-21_ | CIN-06 | CIN-20 | Curral Velho |
| CIN-21 | 1 | - | - | - | - |
| CIN-06 | 1 | 1 | - | - | - |
| CIN-20 | 1 | 1 | 1 | - | - |
| Curral Velho | 1 | 1 | 1 | 1 | - |
| CIN-08_ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Campos et al. (2000) avaliaram as transformações hidrológicas na Bacia do Rio Jaguaribe após a construção dos reservatórios e observaram que o sistema de reservatórios implantados até hoje regula até 85% das descargas naturais médias e menos de 1% flui para o oceano. Assim, a regulação na vazão de água do reservatório Castanhão induziu altas taxas de retenção de nitrogênio, fósforo total e sólidos suspensos. Essas cargas, que antes iam para o Oceano Atlântico, permanecem no continente (MOLISANI et al., 2013).

Vidal e Capelo (2014) identificaram que no Açude Gavião, localizado mais a jusante de toda infraestrutura da transposição estudada neste trabalho, ocorreu um elevado aporte de nitrogênio e fósforo vindo deste sistema e culminando com uma retenção de nitrogênio (121,42t) e de fósforo (28,06t) de janeiro a maio de 2011, contribuindo para o processo de eutrofização deste importante manancial.

4 CONCLUSÕES

Dentre os perfis analisados, a temperatura da água foi o único parâmetro que manteve um padrão termal sazonal de estratificação (primeiro semestre) para os três anos em análise. O OD e o pH apresentaram estratificação irregular, e as demais variáveis, CE e SDT, não apresentaram estratificação no período.

Constatou-se que a estratificação ocasionou a desoxigenação nos pontos CIN21 e CIN06. A oxig

enação natural no ambiente lótico foi identificada a 43,50Km a jusante do reservatório Castanhão, no ponto CIN20 (6,91mg/L), cujo resultado apresentou diferença significativa entre o ponto Castanhão Sup e CIN21 (jusante do Castanhão).

Em relação aos nutrientes, constatou-se que não existe diferença significativa entre a camada superficial e camada inferior do Reservatório Castanhão. Nesse período, o manejo operacional da vazão liberaria quantidades similares de nutrientes, caso a operação das vazões fosse multiníveis. Também não se identificou diferença significativa entre as variáveis: NT, PT, Temperatura, OD, pH e Cianobactérias dos Reservatórios Castanhão e Curral Velho, o que indica similaridade no processo de eutrofização entre ambos os reservatórios.

Apesar de ocorrer processos de estratificação da coluna de água com resfriamento da camada hipolimnética, a temperatura no Canal da Integração apresentou valores superiores aos registrados na camada superficial do Reservatório Castanhão. Esse fato se relaciona com os fluxos reduzidos e ao material da estrutura do canal artificial de concreto e processos de insolação.

Em relação às cargas de nitrogênio e fósforo, foi possível verificar que estas apresentaram tendência a variar conforme a vazão operada pelo sistema de gerenciamento, ou seja, na maioria das vezes, as cargas aumentaram em consequência do aumento da vazão operada.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à COGERH pelo apoio institucional concedido à pesquisa.

6 CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Conceitualização: França JMB e Capelo Neto J; **Metodologia:** Capelo Neto J e França JMB; **Investigação:** França JMB, Capelo Neto J e Clemente A; **Redação – Primeira versão:** França JMB e Capelo Neto J; **Redação – Revisão & Edição:** França JMB, Capelo Neto J e Teixeira, ZA; **Aquisição de dados:** Paulino WD; **Supervisão:** Capelo Neto J.

7 REFERÊNCIAS

BARBOSA, F. A. R.; TUNDISI, J. G. Primary production of phytoplankton and environmental characteristics of a shallow quaternary lake at eastern Brazil. *Arch. Hydrobiol.*, Stuttgart, v. 90, n. 2, p. 139-161.1980.

BECKER, V. et al. Phytoplankton equilibrium phases during thermalstratification in a deep subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, Oxford, v. 53, n. 5, p. 952-963. 2008.

BENETTI, A. D.; TUCCI, C. E. M., Uso de indicadores para avaliação de usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas com múltiplos aproveitamentos, *Revista de gestão de água da América Latina*. 3 (1) (2006) 73-83.

BOEHRER, B.; SCHULTZE, M.: Stratification of lakes, *Rev. Geophys.*, 46, RG2005, <https://doi.org/10.1029/2006RG000210>, 2008.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional de 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. *Diário Oficial da União* nº 053, de 18/03/2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C.; LUNA, R.; FRANCO, S. Hydrological Transformations in Jaguaribe River Basin during the 20th Century In: 20th Hydrological Days, 2000, Fort Collins, CO. Proceed-ings of the 20th Annual American Geophysical Union. FortCollins, Co: *Hydrology Days Publications*, 2000. v.1. p.221-227

CHÍCHARO, L.; CHÍCHARO, M. A.; BEN-HAMADOU, R. Use of a hydrotechnical infrastructure (Alqueva Dam) to regulate planktonic assemblages in the Guadiana estuary: Basis for sustainable water and ecosystem services management,

Estuar. Coast. *Shelf Sci.*, 70, 3–18, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.039>, 2006.

COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Resenha diária do monitoramento**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/uploads/documentos/28-10-2019-resenha-diaria-do-monitoramento-2017.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

CORRÊA, A. C. G. **Modelos qualitativos de simulação sobre a dinâmica do plâncton em diferentes estados de trofia no lago Paranoá, DF**. Dissertação (Mestrado em Ecologia. Universidade de Brasília - Brasília - DF, Julho, 2011. 140 p.

DYNESIUS, M.; NILSSON, C. 1994 Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world. *Science*, 266753–62

FRERY, A. C.; CRIBARI-NETO, F. **Elementos de Estatística Computacional Usando Plataformas de Software Livre/Gratuito**. 2ª impressão. 2011.

FRIEDL, G.; WÜEST, A. Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming, *Aquat. Sci.*, 64, 55–65, 2002.

GOLDMAN, C. R.; ELSER, J. J.; RICHARDS, R. C. et al. Thermal stratification, nutrient dynamics, and phytoplankton productivity during the onset of spring phytoplankton growth in Lake Baikal, Russia. *Hydrobiologia* 331, 9–24 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF00025403>

GRANZOTTI, R. V.; MIRANDA, L. E.; AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.: Downstream impacts of dams: shifts in benthic invertebrate fish assemblages, *Aquat. Sci.*, 80, 1–14, <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0579-y>, 2018.

HIGGINS, J. M.; BROCK, W. G.: Overview of Reservoir Release Improvements at 20 TVA Dams, *J. Energ. Eng.*, 125, 1–17, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(1999\)125:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(1999)125:1(1)), 1999.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações convencionais**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>. Acesso em: 15 nov. 2019.

JUAHIR, H.; ZAIN, S. M.; YUSOFF, M. K.; HANIDZA, T. I. T.; ARMI, A. S. M.; TORIMAN, M. E.; MOKHTAR, M., (2010). Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environ. Monit. Assess.*, 173 (1-4), 625–641.

KUNZ, M. J.; WÜEST, A.; WEHRLI, B.; LANDERT, J.; SENN, D. B. Impact of a large tropical reservoir on riverine transport of sediment, carbon, and nutrients to downstream wetlands, *Water Resour. Res.*, 47, 1–16, <https://doi.org/10.1029/2011WR010996>, 2011.

LANGBEIN, W.; DURUM, W.: The aeration capacity of streams, U.S. Dept. of the Interior. *Geological Survey*, <https://doi.org/10.3133/cir542>, 1967.

LOPES, S. M.; ARRUDA, N. M. B.; PAGIORO, T. A. Study of the stratification process at the reservoir of the hydroelectric power plant Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza (Capivari-Cachoeira),

- Paraná, Brazil. **Eclética Química Journal**, vol. 43, n. 2, 2018, 23-31.
- LING, T. Y.; GERUNSIN, N. SOO, C. L.; NYANTI, L.; SIM, S. F.; GRINANG, J. Seasonal Changes and Spatial Variation in Water Quality of a Large Young Tropical Reservoir and Its Downstream River. **Journal of Chemistry**, Volume 2017.
- MOLISANI, M.; BECKER, H.; BARROSO, H. S.; HIJO, C.; MONTE, T. M.; VASCONCELLOS, G. H.; LACERDA, L. D. The influence of castanhão reservoir on nutrient and suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe river (CE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, [s.l.], v. 73, n. 1, p. 115-123, fev. 2013.
- NEAL, C.; COLINA, T., COLINA, S. E REYNOLDS, B., 1997. Medidas de capacidade de neutralização de ácido em águas superficiais e subterrâneas no alto rio Severn, Plynlimon: da divisão do hidrograma aos caminhos do fluxo de água. **Hydrol. Terra Sist. Sei.**, 1, 687-696.
- NOGUEIRA, V. P. Q. A Qualidade da água em lagos e reservatórios. In: PORTO, R.L.L(org) Hidrologia Ambiental. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: **Associação Brasileira dos Recursos Hídricos**. (coleção ABRH de Recursos Hídricos; v 3), 1991.
- ORMEROD, S. J; JENKINS, A., (1994). Os efeitos biológicos dos episódios de ácido. In: Acidificação dos ecossistemas de água doce, CEW Steinberg e RF Wright (eds.). Dahlem Workshop Report No. 14, Wiley, **Chichester**, Reino Unido, 259-274.
- RIBEIRO, T. G.; BOAVENTURA, G. R.; CUNHA, L. S.; PIMENTA, S. M. Estudo da qualidade das águas por meio da correlação de parâmetros físico-químicos, Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns. **Geochimica Brasiliensis** 84 30(1): 84 - 94, 2016.
- ROSSEL, V.; FUENTE, A. DE LA., (2015). Assessing the link between environmental flow, hydropeaking operation and water quality of reservoirs," **Ecological Engineering**, vol. 85, pp. 26-38.
- SOULSBY, C., MALCOLM, R., HELLIWELL, R., FERRIER, RC E JENKINS, A., 2000. Hidrologia isotópica da bacia hidrográfica Allt a'Mharcaidh, Cairngorms, Escócia. **Hydrol. Processo.**, 14, 747-762.
- SOULSBY, C.; MALCOLM, R.; GIBBINS, C. DILKS, C., 2001. Seasonality, water quality trends and biological responses in four streams in the Cairngorm Mountains, Scotland. **Hydrology and Earth System Sciences**, 5(3), 433-450.
- SU, X.; H. E, Q.; MAO, Y. Dissolved oxygen stratification changes nitrogen speciation and transformation in a stratified lake. **Environ Sci Pollut Res** 26, 2898-2907 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3716-1>
- STARLING, F. L. R. M.; PEREIRA, C. E.; ANGELINI, R. **Modelagem Ecológica do Fósforo e Avaliação da Capacidade Suporte do Lago Paranoá frente à Ocupação da sua Bacia de Drenagem**. Relatório Técnico Final de Projeto de Pesquisa financiado pela Companhia Energética de Brasília (CEB), 2002. 162 p.
- WALKER, K. F.; HILLMAN, T. J.; WILLIAMS, W. D.: **Effects of impoundments on rivers: an Australian case study**, SIL Proceedings, 1922-2010, 20, 1695-1701, <https://doi.org/10.1080/03680770.1977.11896755>, 1978.
- WERA, F.; LING, T.; NYANTI, L.; SIM, S.; GRINANG, J.: Effects of opened and closed spillway operations of a large tropical hydroelectric dam on the water quality of the downstream river, **Hindawi J. Chem.**, 2019.
- VIDAL, T. F.; NETO, J. C. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatóriana região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.4, p.402-407, 2014.