

Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro

Anderson Felipe de Medeiros Bezerra*, Vanessa Becker*, Arthur Mattos*
andersonecologia@gmail.com; vbecker@ct.ufrn.br; armattos@ct.ufrn.br

Recebido: 29/12/11 - revisado: 22/02/12 - aceito: 13/03/14

RESUMO

O aumento do impacto antrópico sobre os ecossistemas aquáticos vem acelerando o processo de eutrofização, comprometendo os usos múltiplos de água dos lagos e reservatórios no Brasil e no mundo. Este fato faz parte da realidade dos reservatórios do semiárido do Estado do Rio Grande do Norte. O objetivo deste trabalho foi realizar o balanço de massa de fósforo durante um ciclo hidrológico e compreender a relação com o estado trófico em dois reservatórios tropicais localizados na região do semiárido do Rio Grande do Norte. Foram realizadas amostragens mensais, durante o período de seca (de junho a dezembro de 2010) e o período chuvoso (de janeiro a março de 2011). Em cada reservatório foram amostrados 3 pontos ao longo do eixo longitudinal, além dos rios contribuintes e da água de chuva durante o período chuvoso. As cargas de fósforo total e sólidos suspensos, recebidas pelos reservatórios através dos rios afluentes foram elevadas. Os afluentes podem estar atuando na manutenção do estado trófico dos reservatórios, e estes, como acumuladores de sólidos e nutrientes da bacia de drenagem, o que se relaciona com o uso e ocupação na área da bacia e com a qualidade da água.

Palavras Chaves: Balanço de massa, fósforo total, eutrofização, semiárido.

INTRODUÇÃO

A construção de reservatórios no semiárido brasileiro foi vital para a sua ocupação e desenvolvimento de atividades econômicas, capaz de aumentar a resistência do homem à seca, através do suprimento de água para abastecimento humano, dessedentação de animais, produção agrícola irrigada e desenvolvimento da piscicultura (FREITAS, 2008). No entanto a qualidade da água destes reservatórios frequentemente não está de acordo com as necessidades exigidas para usos múltiplos.

O uso indiscriminado de fertilizantes, os despejos de efluentes industriais e domésticos e os elevados índices de evaporação na região semiárida, contribuem significativamente para o acúmulo de fósforo e nitrogênio na água, alterando as características de qualidade das águas destinadas primordialmente ao abastecimento humano, sendo a eutrofização o principal problema destes recursos hídricos (CARPENTER, 2008; CHELLAPA et al., 2009).

Reservatórios em regiões semiáridas geralmente apresentam alta relação entre a área da bacia hidrográfica e a área do reservatório, devido à necessidade de manter o maior volume possível de água acumulada (THORNTON & RAST, 1993). Esta característica, juntamente com o uso e ocupação na bacia hidrográfica e os solos rasos de grande potencial erosivo influem diretamente na carga de sedimentos e nutrientes carreados para os reservatórios durante o período chuvoso.

As estimativas das cargas de sedimentos e nutrientes transportados pelos rios para os reservatórios são informações essenciais para a gestão adequada dos recursos hídricos visando à restauração de ambientes eutrofizados (TORRES et al. 2007). Para monitorar a qualidade desses mananciais são importantes as estimativas das cargas externas de nutrientes, elevando o estado trófico dos reservatórios acima de determinados limites considerados desejáveis para as respectivas classes de usos. As estimativas quantitativas são realizadas através de estudos de balanço de massa de fósforo envolvendo a drenagem de áreas florestais, agrícolas, pastoris e urbanas, além das precipitações pluviais (FREITAS et al, 2011). Estas estimativas de carga podem servir como alerta para tomada de decisão acerca da gestão de recursos hídricos nas bacias hidrográficas.

*Universidade Federal do Rio Grande do Norte

A proposta deste estudo foi estimar as cargas de fósforo total e material em suspensão (sólidos totais, fixos e voláteis), exportadas da bacia de drenagem de dois reservatórios da região semiárida do nordeste brasileiro, além de realizar o balanço de massa de fósforo total para determinar os seus respectivos coeficientes de retenção nos reservatórios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado em dois reservatórios localizados na bacia do Rio Seridó, inserida na região semiárida do Rio Grande do Norte (Figura 1): Gargalheiras (latitude 06°25'30" S e longitude 36°36'09" W) e o reservatório Cruzeta (latitude 06°24'32" S e longitude 36°48'01" W).

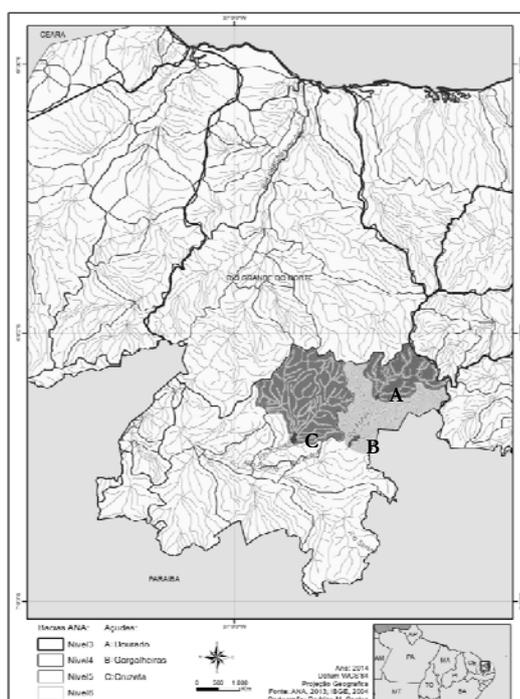


Figura 1 – Localização dos reservatórios Gargalheiras, Dourado (inserido na bacia do Gargalheiras) e Cruzeta.

O Gargalheiras abastece os municípios de Acari e Currais Novos, que fazem parte da microrregião do Seridó Oriental do estado do Rio Grande do Norte. Apresenta a montante na sua bacia de drenagem o reservatório Dourado, que

representa 22,4% da área total da bacia. O Gargalheiras teve sua construção concluída em 1959 e se originou da barragem do rio Acauã (MESQUITA, 2009).

Já o reservatório Cruzeta foi concluído em 1929 para abastecimento do município de mesmo nome, tendo como principais rios contribuintes o Rio Quimproró, Rio do Meio e Rio Salgado, cujas sub-bacias representam 95% da área total da bacia de drenagem (FREITAS, 2011).

Os reservatórios apresentam características morfológicas distintas, principalmente com relação à área da bacia de drenagem e do volume máximo de armazenamento (tabela 1).

Tabela 1 - Área da bacia hidrográfica (BH), área máxima da bacia hidráulica (A), capacidade máxima de acumulação de água (V), a profundidade média (Z) na cota máxima e a profundidade máxima (Zmáx) dos dois reservatórios estudados.

Reservatório	BH (km ²)	A (km ²)	V (10 ⁶ m ³)	Z (m)	Zmáx (m)
Gargalheiras	2.400,00	8,05	44,4	5,5	20,0
Cruzeta	1.010,00	6,16	23,5	3,8	8,0

A região tem um clima muito quente e semiárido (tendendo a árido), tipo estepe, descrita assim pela classificação de Köppen (1928) como clima do tipo *BShw'h'*. A região estudada possui pluviosidade média anual de 500 mm, contrapondo-se com a evaporação potencial que é da ordem de 2000 mm/ano, possuindo uma umidade relativa média anual de 64% (SEMARH, 2011). A região também está passando pelo processo de desertificação por causa das condições climáticas da região, e também pelo modelo econômico tradicional, baseado no extrativismo de lenha e na pecuária.

A maior parte do ano a região sofre com a escassez de água, mas nos primeiros meses do ano, em geral entre fevereiro e maio, ocorrem índices pluviométricos elevados com precipitações superiores a 100 mm. O semiárido apresenta ainda taxas elevadas de evaporação e de evapotranspiração. Essas características climáticas causam uma alta variabilidade no volume dos reservatórios, causando assim, em períodos de seca, a redução da qualidade da água dos reservatórios à medida que os nutrientes são concentrados com a

perda do volume de água por evaporação (COSTA et al., 2009).

Amostragem

Coletas mensais de água foram realizadas nos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta no período de junho de 2010 a abril de 2011, compreendendo um período de seca (junho a dezembro de 2010) e um período chuvoso (janeiro a abril de 2011). As coletas foram realizadas em três pontos ao longo do eixo longitudinal do reservatório: próximo à barragem (P1) na região central do reservatório (P2) e próximo à desembocadura do principal tributário (P3). No ponto próximo à barragem, por ser mais profundo (18 metros em Gargalheiras e 8 metros em Cruzeta no período de estudo), foram coletadas amostras no epilímnio e no hipolímnio. Coletas nos rios tributários e na água da chuva foram realizadas durante o período chuvoso.

As amostragens foram realizadas no período da manhã no reservatório Gargalheiras (09:00 às 12:00h) e no período da tarde no reservatório Cruzeta (13:00 às 15:00h). A transparência da água foi medida com o auxílio do disco de Secchi (30 cm de diâmetro). As amostras de água para análise de nutrientes, clorofila-*a* e sólidos suspensos foram coletadas com auxílio de uma garrafa de Van Dorn, ao longo de toda coluna d'água, para uma maior representatividade dos dados, e assim integrada para a retirada de subamostras.

Análise das amostras

As concentrações de fósforo total foram determinadas colorimetricamente pelo método de Valderrama (1981) e o fósforo reativo solúvel (FRS) foi determinado pelo método de Murphy & Rilley (1962). As concentrações de nitrogênio total foram determinadas através do método de Valderrama (1981) e Muller & Weidemann (1955), que se baseia na reação do nitrato com o salicilato de sódio.

Os sólidos em suspensão (totais, fixos e voláteis) foram analisados gravimetricamente por meio de filtros de fibra de vidro Whatman 934-AH (47mm; 1,5µm de porosidade) com secagem em estufa a 103°C e ignição em forno mufla a 550°C (APHA, 1998).

As concentrações de clorofila *a* foram determinadas através da extração com etanol 95%), segundo Jespersen & Christoffersen (1988), não sendo realizada a correção da feofitina, visto que a mesma reduz a acurácia e a precisão do resultado (STICH & BRINKER 2005).

Cálculo das cargas e coeficientes de exportação

Para o cálculo das cargas de fósforo total (PT) e sólidos suspensos totais (SST) nos reservatórios foi realizado o balanço hídrico para quantificação do volume total de água recebido por cada reservatório durante o período de estudo multiplicando-se a vazão de entrada de água (m³/mês) pela concentração média de fósforo (gP.m⁻³) e de sólidos totais (kgSST.m⁻³) na água que entra nos reservatórios. Foram feitas coletas de água no rio Acauã (95% da área total da bacia do Gargalheiras) e nos rios Quimproró, Rio do Meio e Rio Salgado (95% da área total da bacia de drenagem do Cruzeta). Além dos rios foram coletadas amostras de água de chuva para detecção da concentração de fósforo que entra diretamente no reservatório pela chuva, multiplicando-se a concentração na água de chuva pelo volume precipitado sobre a área do espelho d'água em cada mês.

O cálculo da vazão afluyente (Q_{rio}) foi realizado através da equação 1 (Gomes Filho et al. 1999) onde Q_{rio} representa a vazão do rio principal a ser calculada; ΔV é o volume do reservatório no fim de cada mês observado; Q_{chuva} é a vazão que entra diretamente pela chuva em cada mês (área do espelho em m² multiplicada pela precipitação em metros); Q_{vert} é o volume perdido pelo vertimento (apenas nos meses em que ocorre o vertimento do reservatório); Q_{Evapo} é o volume total perdido no final de cada mês por evaporação (multiplica-se a área do espelho pela evaporação em cada mês) e $Q_{Demanda}$ representa a vazão total retirada para abastecimento e irrigação.

$$Q_{rio} = \Delta V - Q_{chuva} + Q_{vert} + Q_{Evapo} + Q_{Demanda} \quad (1)$$

Assim, multiplicando-se Q_{rio} pela concentração média de PT encontrada nos rios e Q_{chuva} pela concentração encontrada na água de chuva no período, encontra-se a carga total de entrada de fósforo em cada reservatório somando-se as duas cargas. Já a saída será determinada pela multiplicação da $Q_{Demanda}$ pela concentração média de PT na água de cada reservatório durante o período estudado. As cargas de saída foram calculadas considerando os volumes liberados para abastecimento (e irrigação no reservatório Cruzeta) e os volumes liberados pelo vertedouro (dados obtidos na CAERN - Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, e através da curva chave dos vertedouros). Durante o tempo monitorado

apenas o reservatório Cruzeta perdeu água por vertimento no final de março e durante o mês de abril de 2011. Os volumes de saída foram multiplicados pela concentração média de fósforo total e sólidos em suspensão encontrados nos pontos de saída de água. Para se determinar a carga de fósforo total sobre os reservatórios foram calculados os coeficientes de exportação de fósforo de cada bacia, $Le(P)$, dividindo-se a carga total de entrada do fósforo pela área de drenagem dos principais rios tributários, e com isso pode-se calcular a carga de fósforo sobre cada reservatório, conforme a equação 2, de acordo Toledo Jr. et al., (1983).

$$L(B) = AD \times Le(P) / AL \quad (2)$$

Onde: $L(B)$ representa a carga de fósforo total ou material em suspensão sobre o reservatório ($\text{ton}/\text{km}^2.\text{ano}$), considerando uma distribuição homogênea da carga afluyente sobre o espelho de água.; AD é área da bacia de drenagem (km^2); Le é coeficiente de exportação de fósforo total ($\text{ton}/\text{km}^2.\text{ano}$) e AL é a área da bacia hidráulica (km^2).

Análise de dados

Os dados de precipitação e variação volumétrica do reservatório, ao longo do período da pesquisa, foram obtidos junto ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS (escritórios da cidade de Cruzeta e Acari - RN) e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH-RN). Análises de regressão linear foram realizadas com auxílio do programa Statistica® (STATSOFT INC. 1996) assumindo um nível de significância de $\alpha = 0,05$. Os dados foram transformados em logarítimo para estabilizar a variância e normalizar os resíduos. Foram descritas as relações entre as concentrações de nutrientes (N e P), a transparência do disco de Secchi, a biomassa fitoplanctônica (Clorofila-a) e entre as concentrações de sólidos em suspensão.

RESULTADOS

No ano de 2010 precipitaram 740,6 mm de chuva, distribuídas principalmente no primeiro

semestre do ano, nos meses de janeiro, maio e junho. No segundo semestre foram poucas as chuvas na região Seridó, com exceção do mês de outubro, que obteve 91,8 mm. Durante o período de estudo (junho de 2010 a abril de 2011) precipitaram 1043,4 mm na região do reservatório Gargalheiras e 931,8 mm em Cruzeta. Os reservatórios perderam água no período de seca de 2010, mas nos primeiros meses de 2011 os reservatórios recuperaram parte do volume perdido devido ao período de chuvas (Figura 2). Em dezembro de 2010 o reservatório Gargalheiras estava com cerca de 50% da sua capacidade máxima, enquanto que Cruzeta estava com cerca de 30%. Em abril de 2011, após início do período chuvoso, os reservatórios Gargalheiras e Cruzeta atingiram respectivamente 72% e 100%. Os reservatórios apresentaram baixas profundidades médias no período (Tabela 2) e elevado tempo de residência. A redução do tempo de residência nas águas do reservatório Cruzeta em abril/2011 é dada pelo início do vertimento neste reservatório (Figura 3).

Tabela 2 - Volume médio de água (V), área média da bacia hidráulica no período (A) e profundidade média (Z), vazão média mensal de saída(Q), e tempo médio de residência da água (ρ) dos dois reservatórios entre junho de 2010 e abril de 2011.

Parâmetro	Gargalheiras	Cruzeta
V ($10^6.\text{m}^3$)	24,20	11,80
A (km^2)	5,90	4,40
V/A = Z(m)	4,10	2,60
Q ($10^6.\text{m}^3.\text{mês}^{-1}$)	1,90	3,90
$\rho = V/Q$ (dias)	462,42	119,88

As concentrações de fósforo total nos reservatórios aumentaram durante os meses de agosto a dezembro de 2010, à medida que a água é perdida por evaporação no período seco (máxima de 146,64 $\mu\text{g}.\text{l}^{-1}$ em Gargalheiras e 226,64 $\mu\text{g}.\text{l}^{-1}$ em Cruzeta). No entanto, no período chuvoso, as concentrações de fósforo nos reservatórios diminuíram após as primeiras chuvas carregarem as maiores cargas de fósforo para os reservatórios (figura 4).

Tabela 3 - Resultados das estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mínima e máxima) das variáveis monitoradas em Gargalheiras e Cruzeta nos períodos seco (junho a dezembro de 2010) e chuvoso (janeiro a abril 2011).

Parâmetro	Gargalheiras		Cruzeta	
	Seca	Chuva	Seca	Chuva
Secchi (m)	1,06 + 0,41 (0,50 - 2,10)	1,05 + 0,71 (0,15 - 2,50)	0,34 + 0,14 (0,10 - 0,62)	0,66 + 0,33 (0,18 - 1,15)
SST (mg.l-1)	13,38 + 14,54 (1,43 - 69,14)	16,04 + 13,63 (2,00 - 47,14)	30,86 + 58,27 (10,57 - 301,14)	33,53 + 54,21 (2,00 - 202,00)
SSF (mg.l-1)	5,12 + 4,30 (0,33 - 18,86)	6,17 + 11,55 (0,00 - 41,43)	17,37 + 14,23 (1,75 - 51,43)	22,94 + 51,78 (0,00 - 185,00)
SSV (mg.l-1)	8,25 + 14,61 (0,86 - 66,29)	9,87 + 8,94 (1,43 - 33,20)	30,50 + 54,23 (2,00 - 275,14)	10,59 + 9,22 (2,00 - 36,00)
PT (µg.l-1)	98,77 + 38,67 (19,69 - 163,79)	78,16 + 50,50 (39,50 - 223,79)	126,33 + 49,21 (49,31 - 252,71)	144,23 + 81,86 (56,64 - 264,14)
NT (µg.l-1)	645,93 + 228,64 (192,00 - 1118,50)	772,17 + 325,60 (380,50 - 1615,50)	1526,19 + 729,30 (483,50 - 2787,00)	953,94 + 125,49 (833,00 - 1185,50)
Razão N:P	9,58 + 9,68 (1,75 - 39,46)	11,27 + 4,05 (4,27 - 17,25)	14,61 + 11,37 (3,89 - 50,95)	9,57 + 6,32 (3,39 - 18,46)
FSR (µg.l-1)	23,35 + 16,46 (0,00 - 76,33)	14,71 + 17,33 (0,00 - 55,08)	25,58 + 18,73 (6,33 - 68,42)	29,93 + 26,65 (0,00 - 80,92)
Cl-a (µg.l-1)	13,02 + 13,94 (1,95 - 54,97)	43,32 + 58,93 (3,90 - 173,59)	65,96 + 58,89 (6,36 - 176,43)	36,76 + 25,81 (1,11 - 84,76)

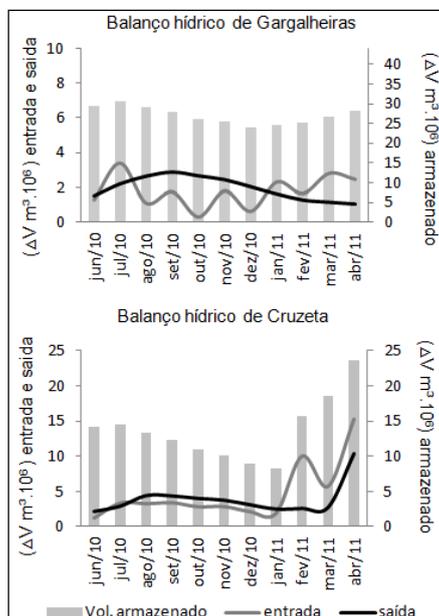


Figura 2 - Balanço hídrico dos reservatórios entre junho de 2010 e abril de 2011, com destaque para os volumes de entrada e saída e a variação do armazenamento no período.

A máxima concentração de nitrogênio total em Gargalheiras foi no mês de setembro/2010 (893,08 µg.l⁻¹) e em Cruzeta no mês de agosto/2010 (2570,75 µg.l⁻¹). Já as menores concentrações de NT foram encontradas no mês de outubro/2010 nos dois reservatórios (354,33 µg.l⁻¹ em Gargalheiras e 651,00 µg.l⁻¹ em Cruzeta). A razão N:P média em Gargalheiras se elevou durante o período de estudo, variando de 9,58 no período seco para 11,27 no período chuvoso. O inverso ocorreu em Cruzeta com a diminuição da razão N:P do período seco para o chuvoso, mas ambos os reservatórios apresentaram razão N:P média quase sempre abaixo da estabelecida por Redfield (1958) de 16:11 (tabela 3).

As concentrações de clorofila-a não acompanharam claramente as flutuações de fósforo total durante os meses estudados, apresentando máximas de 60,90 µg.l⁻¹ em março/2011 em Gargalheiras e 161,94 µg.l⁻¹ em Cruzeta no mês de junho/2010. O limite de classificação trófica do ambiente como eutrófico para regiões semiáridas é de 60 µg.l⁻¹ para fósforo total e 12 µg.l⁻¹ de clorofila-a (THORNTON & RAST, 1993). Assim, os

reservatórios foram classificados como eutróficos durante todo período de estudo

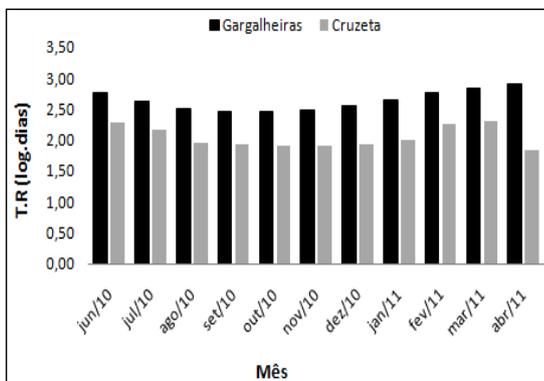


Figura 3 - Tempo de residência médio (T.R) da água nos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta, em logaritmo de dias, durante o período de Junho/2010 a abril/2011.

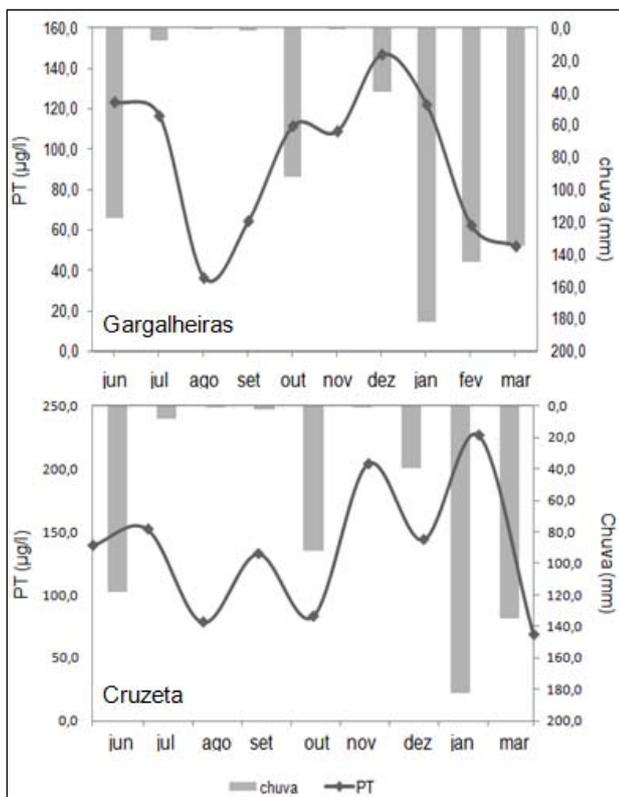


Figura 4 - Variação temporal das concentrações de fósforo total $\mu\text{g.l}^{-1}$ nos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta com relação à precipitação no período de junho/2010 a março/2011 (o mês de fevereiro em Cruzeta não é apresentado por falta de dados).

Os resultados das análises de regressão linear entre as variáveis limnológicas mostraram que houve uma relação negativa significativa entre as concentrações de fósforo solúvel reativo (FSR) e clorofila-a ($R^2=0,41$ e $P=0,0001$ em Gargalheiras e $R^2=0,50$ e $P=0,000023$ em Cruzeta). Esta relação negativa é explicada pelo rápido consumo do FSR pela produtividade primária nas camadas superiores da coluna d'água. Já a correlação da clorofila com o fósforo total não foi significativa durante o período de estudo nos dois reservatórios. Apenas no reservatório Gargalheiras observou-se uma fraca, porém, significativa relação positiva com a clorofila-a ($R^2=0,19$ e $P=0,015$).

Tabela 4 - Concentrações médias de sólidos em suspensão totais (SST), fixos (SSF), voláteis (SSV) e de fósforo total (PT) nos afluentes e na água precipitada sobre os reservatórios para o período chuvoso de 2011.

PERÍODO CHUVOSO 2011 (g.m3-1)		
Gargalheiras		
Parâmetro	Afluente	Precipitação
PT	0,44	0,016
SST	396,00	
SSF	336,00	
SSV	60,00	
Cruzeta		
Parâmetro	Afluente	Precipitação
PT	0,21	0,016
SST	169,00	
SSF	136,00	
SSV	33,00	

A transparência da água (profundidade do disco de Secchi) esteve negativamente correlacionada com os sólidos suspensos totais ($R^2=0,36$ e $p=0,00037$ - Gargalheiras; $R^2=0,53$ e $p<0,0001$ - Cruzeta) e fixos ($R^2=0,40$ e $P<0,0002$ - Gargalheiras; $R^2=0,45$ e $p=0,0001$ - Cruzeta), não apresentando correlação significativa com sólidos suspensos voláteis (SSV) e clorofila-a, indicando que a turbidez das águas de ambos os reservatórios devem-se, em sua maior parte, à fração mineral. Através das amostragens realizadas, foram estimadas concentrações médias de sólidos em suspensão e fósforo total, bem como a concentração média de fósforo total contida nas amostras de água de chuva, para o período chuvoso do ano de 2011 (tabela 4).

Através do balanço hídrico dos reservatórios foram realizadas as estimativas das cargas de entrada

de sólidos em suspensão e o balanço de massa de fósforo total. Os reservatórios Gargalheiras e Cruzeta receberam respectivamente 5.378,42 e 7.944,42 toneladas de sólidos suspensos totais, das quais 84,8% e 80,4% representaram as respectivas frações inorgânicas (sólidos suspensos fixos).

A carga recebida pelo reservatório Gargalheiras foi 60,21% menor do que a carga recebida pelo reservatório Cruzeta, mesmo possuindo uma bacia de drenagem maior do que a de Cruzeta. No entanto, a retenção em Gargalheiras é significativamente maior devido a uma menor proporção de retirada de água, principalmente porque o reservatório Cruzeta apresentar uma grande demanda no seu perímetro irrigado. Os coeficientes de exportação de fósforo ($L_{c(P)}$) da bacia de drenagem do reservatório Gargalheiras também foi bem menor do que o observado em Cruzeta (Tabela 5).

Tabela 5 – Cargas externas de Fósforo Total (PT) em toneladas por ano, coeficientes de retenção (%) e coeficientes de exportação (g/m².ano) da bacia de drenagem dos reservatórios Gargalheiras (GAR) e Cruzeta (CRU).

Balanço de PT	GAR	CRU
Carga (ton/ano)	6,13	10,18
% Retenção	95,75	60,19
(Le) g/m ² .ano	0,0034	0,0076
(LB) g/m ² .ano	1,03	2,30

DISCUSSÃO

A posição do reservatório é relevante no balanço de massa devido aos efeitos à montante e à jusante de um reservatório para o outro (TUNDISI, 1999). Reservatórios em cascata podem causar efeitos cumulativos nos sistemas a montante, sendo as cargas de sólidos e nutrientes recebidas com menor intensidade pelos sistemas a jusante (LOPES, 2009). Isto provavelmente foi observado no nosso estudo no reservatório Gargalheiras, pois mesmo possuindo uma relação AD (área de drenagem): AR (área do reservatório) maior do que a de Cruzeta (298,13 para Gargalheiras e 227,27 para Cruzeta), obteve um coeficiente de exportação 44,7% menor do que o de Cruzeta. Isso pode ter ocorrido pela presença do reservatório Dourado inserido em sua

bacia de drenagem (a montante), com capacidade de acumulação de 10,32 milhões de metros cúbicos de água. A área da bacia de drenagem do Dourado é de 501,84 km², o que representa 20,9% da área total da bacia de drenagem de Gargalheiras. Portanto, esta área de drenagem não contribuirá no aporte de sólidos e nutrientes para este reservatório, até o momento que Dourado começar a verter, o que não ocorreu durante o período deste estudo (SEMARH-RN). Portanto foi descontada a área da bacia de drenagem do reservatório Dourado para o cálculo do coeficiente de exportação de fósforo para o reservatório Gargalheiras durante o período deste estudo.

A retenção anual do fósforo total em Gargalheiras atingiu 95,75% do total de entrada pelos tributários, o que caracteriza o reservatório como um acumulador de fósforo durante a estação chuvosa, até que o reservatório comece a verter, o que não ocorreu no período. Retenção similar ocorreu no reservatório da Pampulha/MG o qual possui uma capacidade de retenção de 80,93% da carga anual de fósforo recebida pelos tributários (TORRES et al., 2007), mesmo possuindo um tempo de residência médio da água bem menor (76,8 dias) do que o observado em gargalheiras (462,42 dias).

Cruzeta possui um perímetro irrigado com uma área de 196 ha, onde são plantadas culturas de feijão, melancia, melão, mamão e tomate, que requerem bastante água no período seco (ARAÚJO, 2007). Durante os meses de janeiro/2007 e maio/2008, o perímetro irrigado retirou em média 1.485.345,60 m³.mês⁻¹ (FREITAS, 2008). No entanto o perímetro irrigado de Cruzeta poderia utilizar 520.000 m³/mês levando-se em consideração os níveis de garantia para o abastecimento humano e para irrigação iguais a 96% e 90%, respectivamente (RIGHETTO e GUIMARÃES, 2003). Assim, os volumes retirados no ano de 2007 e 2008 pelo perímetro irrigado superaram em quase 3 vezes os níveis de garantia. Considerando a descarga pelo perímetro irrigado medida por Freitas (2008), uma vez que não houve crescimento da área irrigada de 2008 para 2011 (DNOCS, 2011), pode-se concluir que esta grande demanda influencia na saída de PT do reservatório, diminuindo a sua taxa de retenção no período em comparação com a taxa de retenção do reservatório Gargalheiras, sendo 35% menor em Cruzeta.

Estudos realizados no Reservatório da Pampulha e no Lago das Garças, ambos lagos eutróficos localizados no estado de São Paulo/Brasil, demonstraram uma capacidade de retenção de 81% e 61%, respectivamente, da carga

anual de fósforo trazida pelos tributários, corroborando com a tendência de elevada retenção deste nutriente em reservatórios urbanos eutrofizados (TORRES et al., 2007; HENRY et al., 2004).

Um estudo na bacia do reservatório Cruzeta encontrou um coeficiente de exportação de 0,029 $\text{gP}_{\text{total}}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$, com uma carga de 4,799 $\text{gP}_{\text{total}}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$, durante os anos de 2007 e 2008 (FREITAS, 2011). As diferenças nos valores das estimativas de carga de PT entre o estudo realizado por Freitas (2011) e por este estudo podem estar relacionadas com os períodos chuvosos dos anos de 2007 e 2008, os quais foram mais generosos do que o observado no ano de 2011, levando uma maior carga de nutrientes para o reservatório. São necessários estudos contínuos nos reservatórios da região semiárida para a observação de padrões de diminuição ou incremento das cargas externas recebidas pelos reservatórios.

A capacidade de assimilação das cargas recebidas pelos reservatórios é limitada e problemas como a eutrofização podem ocorrer em um período relativamente curto, dependendo da utilização e ocupação do solo na bacia de drenagem (FRIEDL; WUEST, 2002; JORGENSEN; VOLLENWEIDER, 1989). A recuperação da mata ciliar dos rios é uma estratégia importante na redução da carga difusa das bacias de drenagem, principalmente aquelas decorrentes da utilização de adubos e defensivos. A tendência de uma elevada retenção de nutrientes nos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta requer uma melhor gestão do sistema de abastecimento de água, tendo em vista um agravamento acelerado do processo de eutrofização e a perda da qualidade de água para o abastecimento dos municípios.

As perdas por sedimentação de fósforo não foram consideradas no balanço de massa, assim como a liberação de fósforo do sedimento (isto é, a carga interna), na forma diretamente assimilável pela comunidade primária. Esta carga interna pode facilitar o surgimento de Blooms de cianobactérias, como verificado em vários corpos d'água (HYENSTRAND et al. 1998; JOHNSTON and JACOBY 2003; WANG et al. 2005; PANOSSO, 2007). A resuspensão de partículas do sedimento que ocorre principalmente em reservatórios rasos, determina a quantidade de fósforo liberado para a água nas formas dissolvidas e particuladas (WELCH; COOKE, 2005). Portanto, a estimativa da taxa de sedimentação de fósforo particulado e o entendimento da composição química dos sedimentos pode ajudar a elucidar a dinâmica do ciclo biogeoquímico deste nutriente (LOPEZ et al.,

2006), sendo importante que estudos futuros ampliem o conhecimento desta via de fluxo, podendo ser usado para designar estratégias de gerenciamento dos recursos hídricos.

CONCLUSÃO

Apesar de não modificar o estado trófico dos reservatórios, as concentrações afluentes foram bastante elevadas. Os reservatórios atuaram como retentores de nutrientes e sólidos suspensos de suas bacias hidrográficas, sendo classificados como eutróficos durante todo período de estudo. O fósforo reativo solúvel (em Gargalheiras e Cruzeta) e os sólidos suspensos fixos (apenas em Cruzeta) foram fatores que se relacionaram com o estado trófico dos reservatórios, enquanto que as relações entre nutrientes totais e o crescimento fitoplancctônico foram pouco expressivas.

A capacidade da circulação de água e nutrientes dentro do reservatório, em relação a sua forma e volume armazenado podem ser fatores importantes para a dinâmica do ecossistema e determinação do estado trófico. Os resultados sugerem que, para entendimento da dinâmica do estado trófico dos reservatórios, é fundamental a realização de estudos que incluam a interface água/sedimento, possibilitando analisar se os reservatórios estão em condições susceptíveis para o processo de trocas, estimando a carga interna potencial do sistema e sua relação com a eutrofização e qualidade da água.

É recomendada a continuidade deste monitoramento durante um longo período de tempo, para que se identifiquem possíveis elevações das cargas recebidas pelos mananciais decorrentes do uso e ocupação do solo na bacia de drenagem. Os resultados podem servir como subsídio para proposição de políticas para ampliação do saneamento básico e projetos de recuperação de matas ciliares nas bacias hidrográficas dos reservatórios destinados ao abastecimento público que sofrem com a eutrofização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo financiamento do projeto MEVEMUC – Monitoramento das mudanças climáticas e

evaporação no semiárido do Rio Grande do Norte. Agradecemos também ao Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA/UFRN); ao Laboratório de Ecologia Aquática (LEA/UFRN), ao DNOCS/RN – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca; à SEMARH/RN – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte e à CAERN – Companhia de águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.

REFERÊNCIAS

- A.P.H.A. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste-water*. 20 ed. Washington: A.P.H.A., A.W.W.A. and W.E.F. Washington, D. C.
- ARAÚJO, C.A.B. (2007). *"Avaliação do desenvolvimento da região de Cruzeta (RN), através do uso intensivo de água na irrigação"*. Dissertação de Mestrado. Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento - LARHISA-UFRN.
- CARPENTER S. R. (2008). *"Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication"*. Center for Limnology, University of Wisconsin, Madison. PNAS/August 12,2008.
- CHELLAPPA, N. T., CÂMARA, F. R. A., ROCHA, O. (2009). *Phytoplankton community: indicator of water quality in the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir and Pataxó Channel, Rio Grande do Norte, Brazil*. Brazilian Journal of Biology, 2009.
- COSTA, I. A. S. ; CUNHA, S. R. S.; PANOSSO R.; ARAÚJO, M. F. F., MELO J. L. S.; ESKINAZI E. M. S. (2009). *Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte*. Brazilian Journal of Biology, 2009.
- DNOCS. Departamento Nacional de Obras contra Seca (informações da sede do município de Cruzeta/RN – 2011).
- FREITAS, F.R.S. (2008). *Eutrofização do Reservatório Cruzeta na bacia representativa do rio Seridó – RN* | Francisco Rafael Sousa Freitas. – Natal, RN, 2008. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 80 f. : il.
- FREITAS, F.R.S.; RIGHETTO A. M.; ATTAYDE J. L. (2011). *Cargas de fósforo total e material em suspensão em um reservatório do semi-árido brasileiro*. Oecologia Australis 15(3): 655-665, Setembro 2011.
- FRIEDL, G.; WÜEST, A. (2002) *Disrupting biogeochemical cycles: consequences of damming*. Aquatic Science, v. 64, n. 1, p. 55-65.
- GOMES FILHO, M. F. ; ARAGÃO, J. O R. ; SRINIVASAN, V. S. *Relações entre as TSM's Globais e os volumes dos principais reservatórios de água da Paraíba*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, p.74-81, 1999.
- HENRY, R., CARMO, C.F. & BICUDO, D.C. (2004). *Trothic status of a Brazilian urban reservoir and prognosis about the recovery of water quality*. Acta Limnology. Brasil, 13(3):251-262.
- HYENSTRAND, P., P. BLOMQUIST AND A. PETTERSSON. (1998). *Factors determining cyanobacterial success in aquatic systems — a literature review*. Arch. Hydrobiol. Spec. Issues; Adv. Limnol. 51:41–62.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – CENSO 2000/2010.
- JESPERSEN, A.M.; CHRISTOFFERSEN, K. (1988). *Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent*. Arch. Hydrobiol.109, pp. 445-454.
- JOHNSON, B. R., & JACOBY, J. M. (2003). *Cyanobacterial toxicity and migration in a mesotrophic lake in western Washington, USA*. Hydrobiologia,495, 79–91.
- JØRGENSEN, S. E.; VOLLENWEIDER, R. A. (1989). *Guidelines of lake management: principles of lake management*. Japan: ILEC/UNEP.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (1928). *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm.
- LOPEZ, P., E. NAVARRO, R. MARCE, J. ORDOÑEZ AND J. ARMENGOL (2006). *Elemental ratios in sediments as indicators of ecological processes in Spanish reservoirs*. Limnetica 25:499-512.
- MESQUITA, T.P.N, (2009). *Eutrofização e Capacidade de Carga de Fósforo de Seis Reservatórios da Bacia do Rio Seridó, Região Semi-Árida do Estado do RN*. Dissertação de mestrado (UFRN).
- MÜLLER, R.; WIEDEMANN, O. (1955). *Die Bestimmung des Nitrat-Ions in Wasser*. Von Wasser 22, 247p.
- PANOSSO, R.; COSTA, I.A.S.; SOUZA, N. R. de; ATTAYDE, J. L.; CUNHA, S. R. DE S.; GOMES, F. C. F (2007).

"Cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios do Estado do Rio Grande do Norte e o potencial controle das florações pela Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*)". Oecol. Bras. 11(3):433-449.

REDFIELD A. C. (1958). "The biological control of chemical factors in the environment". Amer. Sci. 46:205-221.

RIGHETTO, A. M. & GUIMARÃES JR. J. A. (2003). *Utilização ótima dos recursos hídricos superficiais do RN*. Porto Alegre: Revista Brasileira de Recursos Hídricos –ABRH, v. 8, n. 2, p32-45.

SEMARH-RN. Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Fonte: www.semarh.rn.gov.br – acesso em 05/01/2011, às 20:00 horas.

STATISTICA, 1996, Tulsa: Stat Soft, v. 3.

STICH, H., BRINKER, A., (2005). *Less is better: uncorrected versus pheopigment-corrected photometric chlorophyll-a estimation*. Archiv für Hydrobiologie 162, 111e120.

THORNTON, J.A. AND RAST, W. (1993). "A test of hypothesis relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes". In: Straskraba, M.; Tundisi, J.G. and Duncan, A. (eds.). Comparative reservoir limnology and water quality management 1-24. Kluwer Academic Publishers.

TOLEDO JR., A. P; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E. G. (1983). A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Camboriú-SC: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária E Ambiental, setembro de 1983. p 1-34.

TORRES, I.C; RESCK, R.P. & PINTO-COELHO, R.M. (2007). *Mass balance estimation of nitrogen, carbon, phosphorus and total suspended solids in the urban eutrophic, Pampulha reservoir, Brazil*. Acta Limnol. Bras., 19(1):79-91.

TUNDISI, J.G. (1999). *Reservatórios como sistemas complexos: Teoria, aplicações e perspectivas para usos múltiplos*. In Ecologia de reservatórios: estrutura, funções e aspectos sociais (R. Henry, ed.). Fundbio / Fapesp, Botucatu / São Paulo, p.19-38.

VALDERRAMA, J.C. (1981). *The simultaneous analysis of total nitrogen and phosphorus in natural waters*. Mar. Chem., v.10, p.109-122,1981.

WANG, S.H., A.R. DZIALOWSKI, J.O. MEYER, F. DENOYELLES, N.C. LIM,W.W. SPOTTS AND D.G. HUGGINS. (2005). *Relationships between cyanobacterial production and the physical and chemical properties of a Midwestern Reservoir, USA*. Hydrobiologia. 541:29-43.

WELCH, E.B. AND G.D. COOKE. (2005). *Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control*. Lake Reserv.Manage. 21:209-217.

Total Phosphorus Mass Balance And The Trophic State In Brazilian Semi-Arid Reservoirs

ABSTRACT

The increased anthropic impact on aquatic ecosystems has accelerated the eutrophication process compromising the multiple uses of water in lakes and reservoirs in Brazil and worldwide. This is part of the reality of reservoirs in the Semi-Arid of the state of Rio Grande do Norte. The purpose of this study was to perform the mass balance of phosphorus during a hydrogeological cycle and to understand the relationship with the trophic state in two tropical reservoirs located in the Semi-Arid region of Rio Grande do Norte. Monthly samplings were performed during the drought period (from June to December 2010) and the rainy period (from January to March 2011). In each reservoir, 3 points were sampled along the longitudinal axis, besides the contributing rivers and rainwater during the rainy period. High total phosphorus and suspended solids loads were received by the reservoirs from the tributary rivers. The tributaries may be acting to maintain the trophic state of the reservoirs, and these, as accumulators of solids and nutrients from the drainage basin, which is related to the use and occupation of the basin area and the water quality.

Key-words: Mass balance, total phosphorus, eutrophication, Semi-Arid.