

EGERIA NAJAS PLANCHON (HYDROCHARITACEAE) E O BALANÇO PARCIAL DE NITROGÊNIO E FÓSFORO EM UM RESERVATÓRIO TROPICAL NO SUDESTE DO BRASIL

Data de submissão: 23/02/2024

Data de aceite: 01/04/2024

Sofia Luiza Brito

Universidade do Estado de Minas Gerais -
UEMG Ibirité
Belo Horizonte - MG
<https://orcid.org/0000-0001-7611-8871>
<http://lattes.cnpq.br/7971536190458140>

Cristiane Machado de López

P&D 486 - Cemig/Hidroex
Belo Horizonte, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3777184486712636>

Cláudia Kazumi Fujita

Instituto de Química - UNESP Araraquara
Araraquara, SP, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7932597932972882>

Fernanda Cássia Guidastre

Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais - UEMG Frutal
Frutal, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4395155174183783>

Marília Assunção Mendonça

Programa de Pós-Graduação em
Microbiologia Agropecuária - UNESP
Jaboticabal
Frutal, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2205389947615971>

Marcelo de Ávila Chaves

Universidade FUMEC
Belo Horizonte, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3143133360344462>

Magda Karla Barcelos Greco

Fio D'Água Consultoria Ambiental
Belo Horizonte, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3900498216172819>

Maria Margarida Granate Sá e Melo Marques

Econsult Estudos Ambientais
Guarujá, SP, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2148797071300094>

Marcela David de Carvalho

Cemig GT
Belo Horizonte, MG, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0192804607036048>

RESUMO: A espécie com maior distribuição no reservatório de Volta Grande (MG/SP) é *Egeria najas*, a qual exerce influência na dinâmica de nitrogênio e fósforo. Para avaliar esta influência foi realizada uma interpolação determinística das concentrações de nitrogênio e fósforo totais para os períodos de seca e chuva, bem como determinado o teor de tais nutrientes na coluna d'água, em *E. najas* e no sedimento. Com a série temporal também foi possível calcular o balanço de massa parcial de nitrogênio e fósforo totais para o reservatório de Volta Grande no período

estudado. As concentrações médias de nitrogênio total foram maiores no período de chuva ($388,9 \mu\text{g.L}^{-1}$) do que na seca ($174,26 \mu\text{g.L}^{-1}$). Por outro lado, as concentrações médias de fósforo total foram maiores no período de seca ($17,03 \mu\text{g.L}^{-1}$) do que na chuva ($9,15 \mu\text{g.L}^{-1}$). Maiores teores médios de nitrogênio total foram observados em *E. najas* (32,1 ppm), enquanto os teores de fósforo foram maiores no sedimento (29,8 ppm). No período de estudo (julho/2013 a maio/2015) o reservatório de Volta Grande acumulou 3.690,35 toneladas de nitrogênio e 150,06 toneladas de fósforo. Apesar acúmulo de nutrientes, a região lacustre do reservatório de Volta Grande ainda mantém baixas concentrações de fósforo e nitrogênio total, devido provavelmente à sedimentação e a incorporação por *Egeria najas*, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: macrófita, nutrientes, vazão, eutrofização

EGERIA NAJAS PLANCHON (HYDROCHARITACEAE) AND THE NITROGEN AND PHOSPHORUS PARTIAL BALANCE IN A TROPICAL RESERVOIR IN SOUTHEAST BRAZIL

ABSTRACT: The species with largest distribution in Volta Grande Reservoir (MG/SP, Brazil) is *Egeria najas*, which influences the dynamics of nitrogen and phosphorus. To assess this influence, a deterministic interpolation of concentrations of total nitrogen and phosphorus was performed for dry and rainy seasons, as well as the content of such nutrients in water column, *E. najas* and sediment. With time series it was also possible to calculate the partial mass balance of total nitrogen and phosphorus for Volta Grande Reservoir in the studied period. Mean concentrations of total nitrogen were higher in rainy season ($388.9 \mu\text{g.L}^{-1}$) than in dry season ($174.26 \mu\text{g.L}^{-1}$). Otherwise, mean concentrations of total phosphorus were higher in dry season ($17.03 \mu\text{g.L}^{-1}$) than in rainy season ($9.15 \mu\text{g.L}^{-1}$). Higher mean contents of total nitrogen were observed in *E. najas* (32.1 ppm), while phosphorus contents were higher in sediment (29.8 ppm). During the study period (July/2013 to May/2015) Volta Grande Reservoir retained 3,690.35 tons of nitrogen and 150.06 tons of phosphorus. Despite the accumulation of nutrients, the lacustrine region of Volta Grande Reservoir still maintains low concentrations of total phosphorus and nitrogen, probably due to sedimentation and incorporation by *Egeria najas*, respectively.

KEYWORDS: macrophyte, nutrients, flow, eutrophication

INTRODUÇÃO

Os gradientes longitudinais, físicos, químicos e biológicos de um reservatório resultam da influência hidrodinâmica e morfológica da bacia. Se a maior fonte externa de nutrientes é um único e grande rio, a dinâmica do fluxo atua modificando a qualidade da água ao longo de um contínuo de tempo e distância, em que a concentração de fósforo apresenta um padrão geral de diminuição, a partir da montante em direção à barragem. Os padrões longitudinais são mais conspícuos em reservatórios com taxas constantes de sedimentação e com um fluxo não dispersivo. Entretanto, se o reservatório recebe fluxo de nutrientes de vários pontos, os padrões espaço-temporais tornam-se mais complexos (Ford, 1990).

O crescente aporte de fósforo a um corpo d'água geralmente acarreta desequilíbrio ambiental, podendo gerar um aumento da produção primária ocasionando a eutrofização. As fontes antrópicas de fósforo podem ser de origem difusa (agricultura) ou pontual (efluentes urbanos ou industriais) (Esteves, 2011). A eutrofização implica na diminuição da qualidade da água, sendo observado o crescimento excessivo de alguns grupos de organismos em detrimento de outros. Em ambientes eutrofizados é comum observar florações de cianobactérias, crescimento acentuado de macrófitas e mudanças na composição do zooplâncton e dos organismos bentônicos (Hutchinson, 1975; Gibson *et al.* 1996; Pinto-Coelho, 1998).

A eutrofização em rios tende a ser menos crítica que nos corpos d'água lênticos, porque as cargas de nutrientes são rapidamente removidas, uma vez que o percentual de água recebido ou renovado, em função do volume existente na calha, é muito maior quando comparado com os lagos (Neiff, 1996). Por outro lado, os reservatórios artificiais mostram taxas muito mais elevadas de eutrofização que os lagos naturais (Stiling, 1996).

A qualidade da água e a produtividade de um reservatório são controladas pela quantidade e qualidade da carga externa e interna de nutrientes. A natureza das entradas externas de nutrientes reflete, por sua vez, o clima da região, a morfologia do reservatório, o tipo de solo e o uso e ocupação da bacia (Kennedy & Walker, 1990).

A determinação da retenção e da exportação de nutrientes em reservatórios tornou-se necessária para prever e monitorar o processo de eutrofização e propor estratégias de manejo para os mesmos (Carney *et al.*, 1993; Yong *et al.*, 1996). Essa determinação baseia-se, sobretudo, nas estimativas dos aportes de nutrientes pelos tributários e da saída de nutrientes do reservatório, via vazão. Outros fatores também alteram esse balanço, como por exemplo, as cargas devidas à precipitação, o tipo e uso do solo da bacia hidrográfica em que se situa o corpo d'água estudado (Krug, 1993; Svendsen & Krovang, 1993). Os processos bióticos e abióticos dentro do reservatório também influenciam a dinâmica dos nutrientes, já que eles podem ser rapidamente assimilados pelos organismos ou sedimentar-se e tornarem-se, temporariamente, ou não, indisponíveis à biota (Straskraba *et al.*, 1995).

No reservatório de Volta Grande (MG/SP, Brasil) a espécie com maior distribuição registrada foi a macrófita submersa *Egeria najas*. Pertence à família Hydrocharitaceae, nativa da América do Sul (Amaral *et al.*, 2008, Pott & Pott, 2000), é uma das espécies que causam prejuízos na geração de energia hidrelétrica (Bini & Thomaz, 2005), sendo aquela porém, com menos estudos ecológicos dentro de seu gênero, especialmente nos habitats onde é nativa (Sousa *et al.*, 2009).

A hipótese deste trabalho é que a macrófita *Egeria najas* afeta a dinâmica de nitrogênio e fósforo no reservatório de Volta Grande (MG/SP) tornando estes dois nutrientes pouco disponíveis na coluna d'água e retardando, de certa forma, o processo de eutrofização. Para tanto, avaliou-se os gradientes longitudinais no entendimento do processo de eutrofização, teores de nitrogênio e fósforo em *E. najas* e no sedimentos, bem como o balanço parcial de massa destes dois nutrientes no reservatório.

ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Volta Grande (Figura 1) situa-se na divisa dos Estados de Minas Gerais (MG) e São Paulo (SP), no baixo do Rio Grande, considerado um reservatório de médio porte, com área inundada de 222 km² e volume de 22,44 x 10⁹ m³ (CEMIG, 2017). A principal característica hidrológica desse corpo de água é seu baixo tempo de residência (2,48 dias). O lago foi formado em 1974 e em sua bacia (7.305 km²) vivem aproximadamente 345.000 habitantes sendo a maioria deles (330.000) em áreas urbanas. A despeito dessa alta concentração urbana, a atividade agrícola existente na bacia é muito intensa ocupando sempre percentuais acima de 50% da área total dos municípios (IBGE, 2016). A pluviosidade média anual da região atinge 1598,0 mm, com temperaturas médias variando entre 19°C (seca) e 23°C (chuva) (SOUSA et al., 2009).

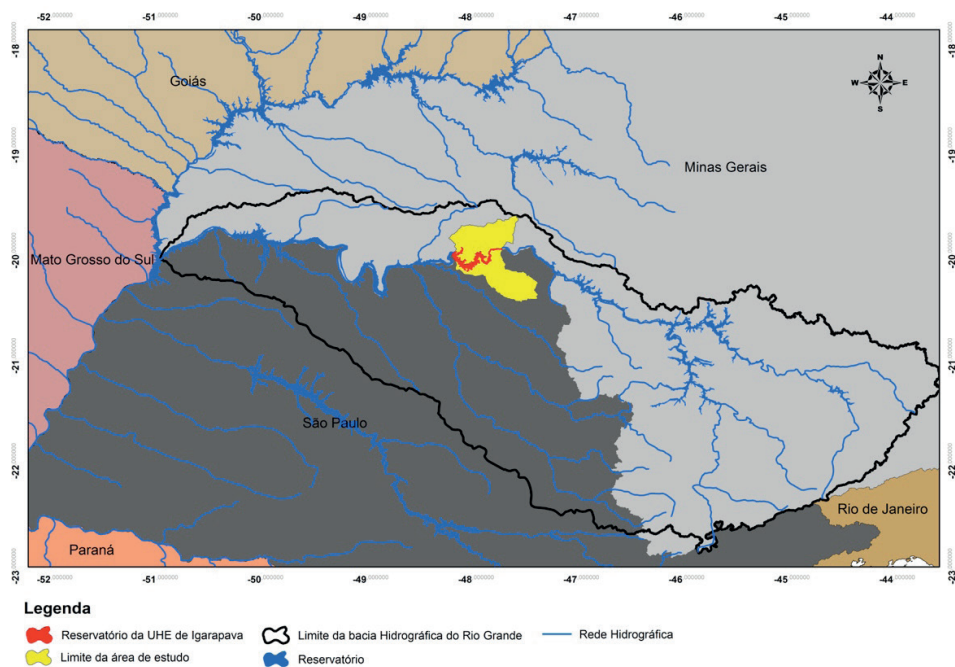


Figura 1 – Reservatório de Volta Grande (em vermelho) e sua área de contribuição direta (em amarelo), na bacia do Rio Grande entre os estados de MG e SP, Brasil.

Fonte: IGTEC (2015).

O reservatório de Volta Grande é caracterizado por águas bem oxigenadas (média de 7,9 mg.L⁻¹) e pH próximo de neutro; a temperatura média da água varia entre 23,9°C na estação seca a 27,7°C na chuvosa. A transparência apresentou aumento na profundidade do disco de Secchi, da região de transição (média de 2,93 metros) para a região limnética

(média de 7,07 metros). Os valores médios de condutividade eléctrica ($45 \mu\text{S.cm}^{-1}$), turbidez (1,4 NTU) e sólidos totais dissolvidos (29mg.L^{-1}) e o alto potencial redox (223 mV) corroboram este aumento da transparência. Os valores médios de clorofila-a ($0,63 \mu\text{g.L}^{-1}$) foram baixos, indicando boa qualidade da água. Contudo, o número de coliformes totais (NMP 1222 cél.100mL⁻¹ reflete o impacto da presença humana no entorno do reservatório (Brito et al., 2018).

Os principais problemas ambientais observados no reservatório de Volta Grande são a escassa ocorrência de vegetação ciliar, o aporte difuso de adubos e defensivos provenientes das atividades agrícolas no entorno, como o da cana-de-açúcar, a presença de gado nas margens e consumo de água pelas culturas irrigadas por pivô (milho e feijão), presentes de forma mais intensa nos trechos médio e inferior. As fontes de poluição pontuais ocorrem principalmente pela proximidade de áreas urbanas (esgoto doméstico e resíduos sólidos). No trecho superior, existe um pólo industrial com 14 indústrias, sendo metade delas de fertilizantes, o que provoca contaminação por intermédio da drenagem de superfície; atividades como a dragagem de areia foi também verificada a causar a ressuspensão de sólidos e nutrientes. Outro impacto relevante foi a introdução de espécies exóticas de peixes (*Oreochromis niloticus*, *Ictalurus punctatus*, *Clarias gariepinus*) e moluscos (*Limnoperna fortunei*, *Corbicula* sp., *Melanoides tuberculatus*, *Physa* sp. e *Biomphalaria straminea*) comprometendo a biodiversidade no reservatório.

O reservatório possui uma macroflora aquática diversificada, sendo registrados 18 táxons de macrófitas aquáticas pertencentes a 15 famílias (P&D 486, 2016). Algumas espécies registradas são de ampla distribuição em reservatórios das regiões tropicais e subtropicais como por exemplo: *Eichhornia crassipes*, *Salvinia auriculata*, *Pistia stratiotes*, *Typha domingensis*, *Myriophyllum aquaticum*, *Bacopa verticillata*, *Hedychium coronarium*. O predomínio de *Egeria najas*, se dá especialmente em locais de pequena profundidade onde a incidência de luz permite o amplo crescimento da espécie. Também foram observados bancos da planta em grande parte da região de transição do reservatório, especialmente as áreas de foz de rios e riachos (P&D 486, 2016). A espécie flutuante *Eichhornia crassipes*, apesar de acumular mais biomassa por área, tem sua distribuição restrita a áreas com menor influência de ventos e ondas nos remansos e braços do reservatório.

METODOLOGIA

A rede de amostragem na área de influência do reservatório de Volta Grande foi composta pelos transectos 1 a 5, cada um abrangendo três pontos de coleta: calha central (A), margem direita (B) e margem esquerda (C). A localização de cada transecto foi determinada pelas principais bacias de contribuição lateral e sua influência no reservatório (Figura 1). Dois transectos estão localizados na região limnética: 1 - próximo à barragem e 2 - próximo ao município de Miguelópolis. Dois transectos na região de transição: 3 - área

de atividade agrícola mais intensa e 4 – sob influência do Rio do Carmo, maior bacia de contribuição do reservatório. O transecto 5 encontra-se na região lótica, trecho superior do reservatório, à jusante do distrito industrial de Uberaba. Além destes 5 transectos, três pontos de referência foram amostrados para dar subsídio aos cálculos do balanço de massa de nitrogênio e fósforo: ponto M – à montante, no trecho lótico do Rio Grande, ponto A – no córrego Água Comprida (receptor dos efluentes tratados da cidade de Uberaba) e ponto J – demarcado à jusante da barragem (figura 2).



Figura 2 – Pontos amostrais no reservatório de Volta Grande, entre MG e SP, Brasil.

Fonte: IGTEC (2015).

A série temporal do projeto englobou dados de oito coletas: julho/2013, outubro/2013, janeiro/2014, maio/2014, julho/2014, novembro/2014, janeiro/2015 e maio/2015. Em todas as coletas foram retiradas amostras para análise de parâmetros físicos, químicos da água e das comunidades planctônica e bentônica (Brito et al., 2018).

Todas as amostras de água para determinação de nitrogênio total e fósforo total foram coletadas na subsuperfície diretamente nos frascos que foram acondicionados e resfriados. As análises foram realizadas, seguindo as recomendações especificadas no Standard Methods of Water and Wastewater cujos códigos das análises são os seguintes: Nitrogênio Total: Method- 4500- P. B e Method- 4500-N.C; Fósforo Total: Method- 4500- P. B e Method - 4500- P .E (APHA, 2012).

Interpolação Determinística de Nitrogênio e Fósforo Totais

Para a interpolação determinística, além dos pontos da rede amostral rotineira (18 pontos), foram acrescidos 28 pontos de amostragem (N1 a N28) sendo que nestes as coletas foram realizadas em julho/2014 e janeiro/2015, representativos dos períodos de seca e chuva, respectivamente. Desta forma, foram amostrados 46 pontos no reservatório de Volta Grande (Figura 1), a representar um amplo conjunto de dados que permitiu a interpolação criando uma superfície contínua para as concentrações de nitrogênio e fósforo total. Dentro deste conjunto de dados, os valores de concentração de nitrogênio e fósforo dos pontos a montante e a jusante no reservatório de Volta Grande foram adotados também para o cálculo de balanço de massa.

Para a criação da superfície contínua utilizou-se o interpolador IDW (Inverse Distance Weighted) utiliza o modelo estatístico denominado Inverso das Distâncias. O modelo baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Dessa forma atribui maior peso para as amostras mais próximas do que para as amostras mais distantes do ponto a ser interpolado (ArcGIS, 2015).

Determinação do Teor de Nitrogênio e Fósforo Totais na Macrófita *Egeria najas* e no Sedimento

Na coleta do mês de maio/2015, em três pontos da rede amostral rotineira, situados nos trechos superior, médio e inferior (4A, 2B e 1B, respectivamente) foram coletadas amostras de *E. najas*, sedimento e água superficial para análise de nitrogênio e fósforo totais. Estes pontos foram selecionados devido à presença de extensos bancos de *E. najas* detectados durante o projeto. A macrófita foi coletada por meio de gancho e suavemente lavada para remoção de sedimento, perifíton ou macroinvertebrados bentônicos aderidos à planta. Em seguida as amostras da macrófita foram acondicionada em saco plástico com um pouco de água do próprio local. As amostras de sedimento foram coletadas com draga do tipo Eckman com 225 cm² de área. As amostras de macrófita e sedimento foram coletadas em réplicas. Para a determinação de nitrogênio e fósforo totais na água superficial, as réplicas foram coletadas na subsuperfície diretamente nos frascos de polietileno.

Em laboratório, as amostras de macrófita foram limpas através de sucessivas lavagens, enxaguadas com água corrente, sendo mais uma vez verificada se havia a presença de perifíton, sedimento ou organismos associados. As plantas foram acondicionadas em bandejas e secas em estufa com circulação de ar forçado a 60°C por 48 horas. As amostras de sedimento foram acondicionadas e secas, a temperatura ambiente, e peneiradas em malha de 250 mm.

As amostras de água superficial foram analisadas nos laboratórios da UNESCO-HidroEX, segundo as recomendações especificadas no Standard Methods of Water and

Wastewater (APHA, 2012). As amostras de macrófita e sedimento foram analisadas no laboratório de Química Analítica, UNESP - Araraquara (SP). As amostras foram digeridas em meio ácido, para oxidação de todos os compostos orgânicos e levadas a mufla, onde foram queimadas a 500°C, por 3 horas. Para a determinação de nitrogênio total, as amostras foram digeridas com persulfato de potássio convertendo o nitrogênio orgânico em nitrito. Após a digestão, a concentração de nitrito foi determinada, adaptando-se a metodologia descrita por Ebina *et al.* (1983) e modificado por Belini (2007). O método adotado para a análise de fósforo foi adaptado do proposto por Eisenrich *et.al* (1975) e modificado por Belini (2007).

Balanço de Massa Parcial de Nitrogênio e Fósforo Totais

A partir da série temporal foram determinadas as cargas parciais aportadas e exportadas de fósforo total e nitrogênio total pelo reservatório de Volta Grande. Foram utilizadas as variações temporais das vazões afluentes (ponto M - rio Grande) e defluentes (ponto J - jusante), no período de julho/2013 a maio/2015 (Cemig, 2015). Para determinar o aporte mensal de nutrientes utilizaram-se as vazões mensais multiplicadas pelas concentrações de nutrientes de cada ponto analisado. Os dados foram expressos em toneladas por mês. O balanço de massa temporal de nutrientes foi determinado pelas diferenças de importação e exportação dos nutrientes (Greco, 2002).

RESULTADOS

Distribuição de *Egeria najas* no Reservatório de Volta Grande

Durante as coletas, em todos os pontos amostrados bem como ao longo de todo o reservatório foi registrada a presença/ausência de *Egeria najas* (figura 3). Desta forma, foi possível confirmar o predomínio desta macrófita no reservatório de Volta Grande, constatando-se sua presença desde a área fluvial até em remanços da região limnética.

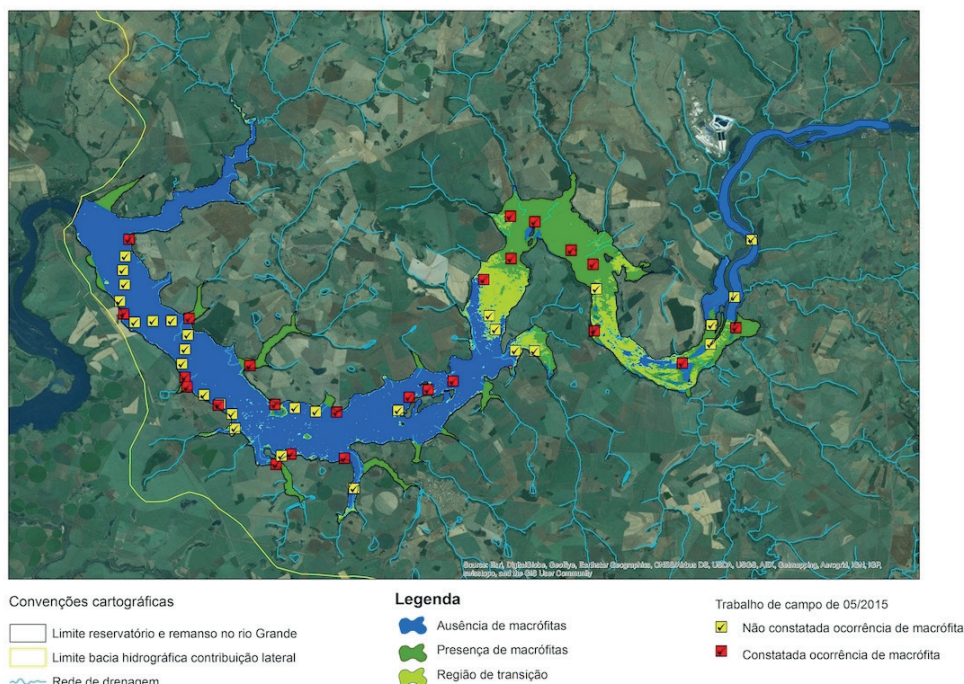


Figura 3 – Distribuição espacial de *Egeria najas* no reservatório de Volta Grande (MG/SP).

Interpolação Determinística de Nitrogênio e Fósforo Totais

No período de seca (julho/2014) (Figura 4), a maioria dos pontos apresentou menores concentrações de nitrogênio total que no período de chuva (Figura 5), com valores médios de $174,26 \mu\text{g.L}^{-1}$. A maior concentração foi registrada no ponto 3C ($800,11 \mu\text{g.L}^{-1}$) onde se observou intensa atividade agrícola, e os demais pontos apresentaram concentrações inferiores $320 \mu\text{g.L}^{-1}$. A diferença entre as concentrações dos dois períodos foi significativa (teste t pareado: $t = 7,650$; $p < 0,0001$). A comparação das concentrações de nitrogênio total no período seco (Figura 4) e chuvoso (Figura 5) reflete a importância do carreamento superficial na variação da qualidade das águas no reservatório de Volta Grande.

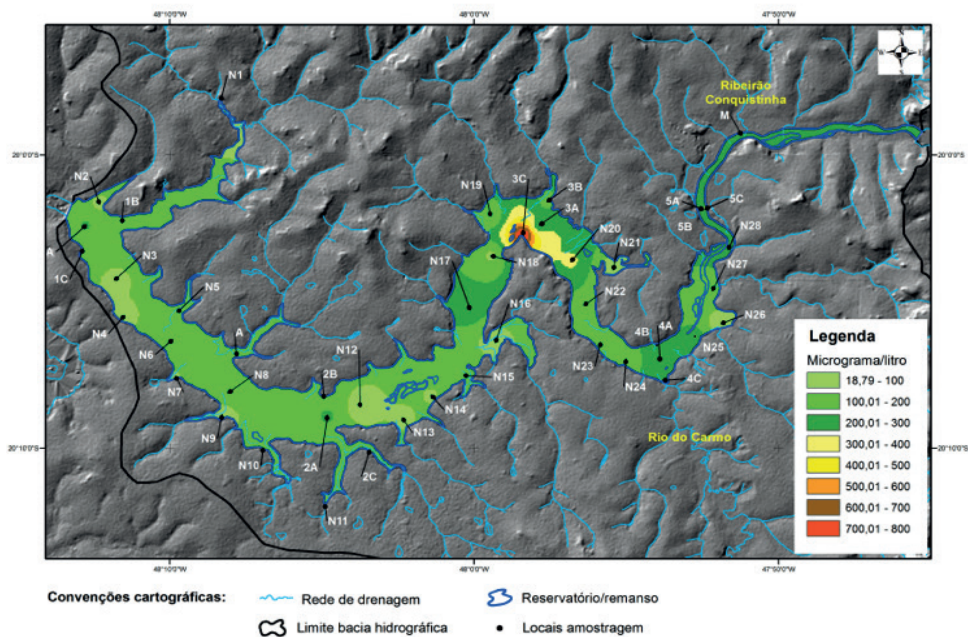


Figura 4 - Variação espacial da concentração de nitrogênio total no reservatório de Volta Grande em julho/2014.

A concentração média de nitrogênio total (Figura 5) no período chuvoso foi de 388,91 $\mu\text{g.L}^{-1}$, sendo os maiores valores observados nos pontos N25 (829,99 $\mu\text{g.L}^{-1}$), onde se observa a intensiva atividade de dragagem e o término dos bancos de *Eichhornia* e *Typha* na margem direita; N21 (544,06 $\mu\text{g.L}^{-1}$) localizada num braço do reservatório com marcante presença de veredas e *E. najas*; N15 (606,28 $\mu\text{g.L}^{-1}$) situado na margem esquerda, sob influência de pastagem e a atividade agrícola (Figura 5). Os pontos N13 e N12 (625,71 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e 595,90 $\mu\text{g.L}^{-1}$ respectivamente) sofrem a influência da área urbana da cidade de Miguelópolis, SP. Os pontos no trecho inferior do reservatório de Volta Grande N10, N9, N7, N6 e N4 que oscilaram entre os valores de 533,79 a 620,75 $\mu\text{g.L}^{-1}$, também foram influenciados pela concentração de pivôs, além das lavouras de cana-de-açúcar na margem paulista. Novamente na foz do córrego Água Comprida – ponto A (521,62 $\mu\text{g.L}^{-1}$), observa-se a atividade pecuária e da urbanização do município de Água Comprida que devem atuar na elevação da concentração de nitrogênio total.

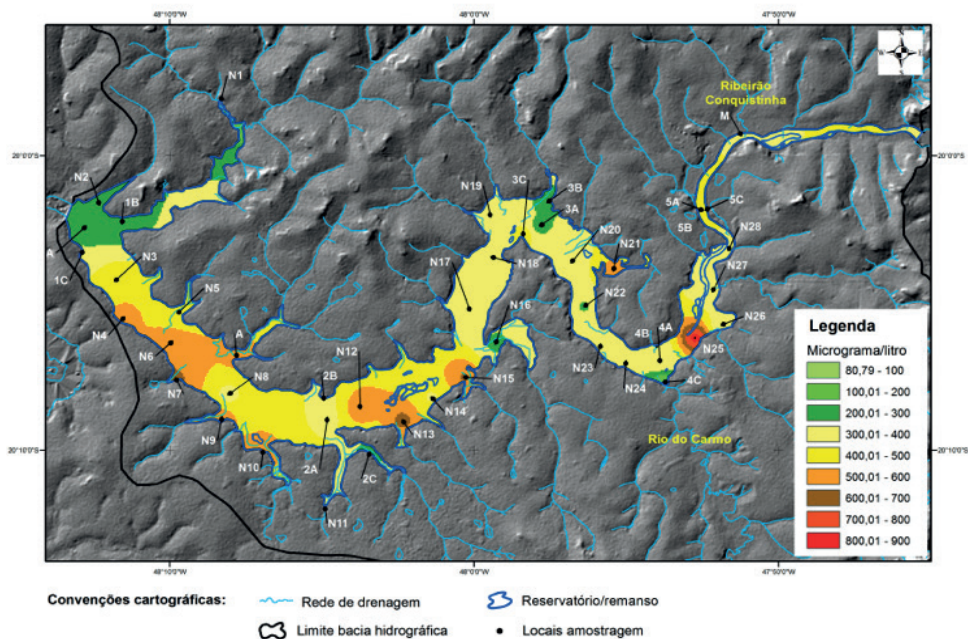


Figura 5 - Variação espacial da concentração de nitrogênio total no reservatório de Volta Grande em janeiro/2015.

A concentração média de fósforo total no período de seca do ciclo hidrológico ($17,03 \mu\text{g.L}^{-1}$) foi maior que a do período de chuva ($9,25 \mu\text{g.L}^{-1}$); esta diferença foi averiguada pelo teste t de Student pareado, sendo significativa ($t = 4,518$; $p < 0,0001$).

No período de seca (julho/2014, Figura 6) as maiores concentrações de fósforo total foram observadas nos pontos N16 ($42,78 \mu\text{g.L}^{-1}$), seguido do ponto de referência A ($34,45 \mu\text{g.L}^{-1}$), localizado na desembocadura do córrego Água Comprida, e pelo ponto 5C ($33,06 \mu\text{g.L}^{-1}$) no trecho fluvial do sistema. Valores intermediários foram observados nos três pontos do transecto 4, com amplitude de variação de $28,90 \mu\text{g.L}^{-1}$ a $32,37 \mu\text{g.L}^{-1}$. O ponto 3A, sob influência do ribeirão Ponte Alta, apresentou a concentração de $26,81 \mu\text{g.L}^{-1}$. Os demais pontos da rede de amostragem apresentaram valores abaixo de $24,00 \mu\text{g.L}^{-1}$.

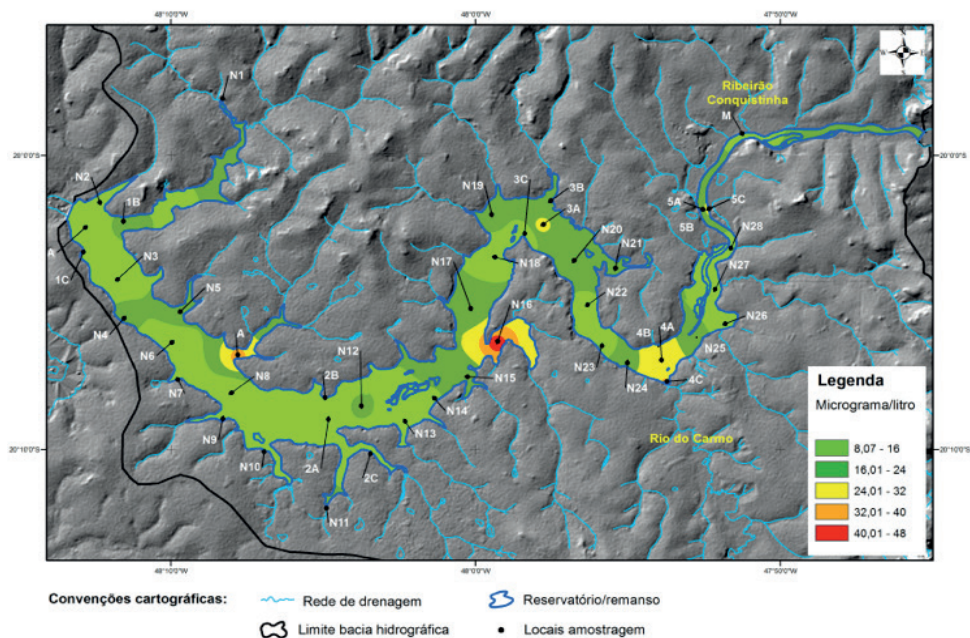


Figura 6 - Variação espacial da concentração de fósforo total no reservatório de Volta Grande em julho/2014.

No período chuvoso (Figura 7) representado pelo mês de janeiro/2015, os valores mais elevados foram registrados no ponto 3C (42,11 $\mu\text{g.L}^{-1}$), sendo seguido pelos pontos N5 (40,08 $\mu\text{g.L}^{-1}$) e N12 (sob influência da área urbana de Miguelópolis) (27,10 $\mu\text{g.L}^{-1}$). Os demais pontos apresentaram valores abaixo da concentração de 20,00 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

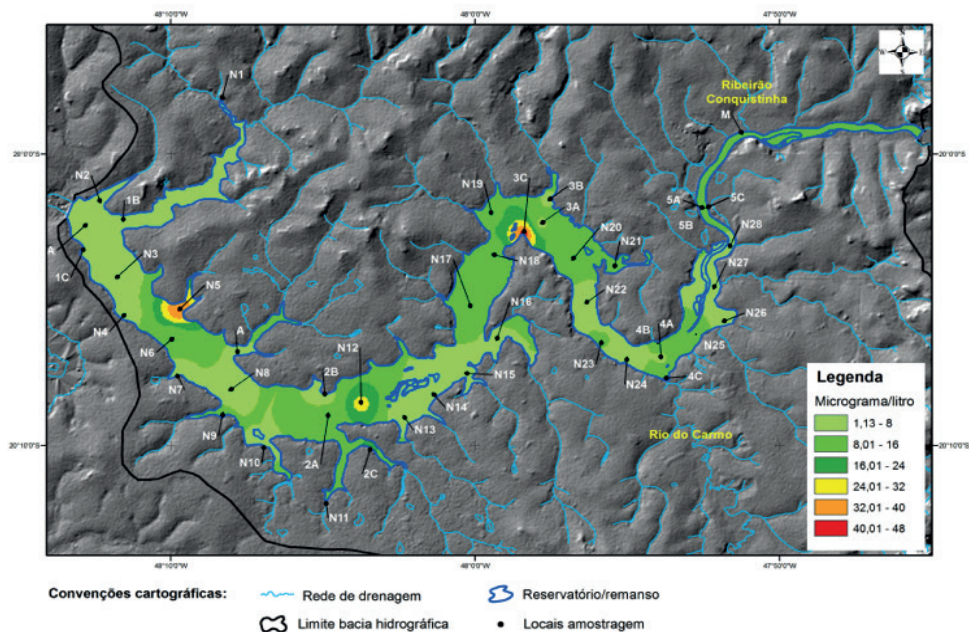


Figura 7 - Variação espacial da concentração de fósforo total no reservatório de Volta Grande em janeiro/2015.

As maiores concentrações de fósforo observadas são reflexo das atividades agropecuárias e industriais desenvolvidas nas bacias de contribuição a que cada ponto de amostragem está relacionado. A alta concentração de agricultura intensiva agricultura pelo sistema de pivô na margem esquerda, de forma mais representativa no trecho médio do reservatório, provavelmente influenciou de forma direta as altas concentrações nos pontos N16 e 3A, na campanha de julho/2014. No período de chuva, janeiro/2015, observa-se a influência da agricultura na margem esquerda, bem como da pecuária e silvicultura (seringueira) na margem direita em N5 e da área urbana (Miguelópolis) em N12.

Além disso, no ponto A na margem direita do reservatório, foi observada forte influência da atividade pecuária. O distrito industrial localizado a montante do transecto 5, é caracterizado pelo grande número de empresas de fertilizantes, o que caracteriza um maior aporte de fósforo neste trecho. O transecto 4 recebe influência da foz do rio do Carmo, maior tributário da margem esquerda do reservatório, com a maior bacia de contribuição lateral apresentando atividade de cafeicultura nas cabeceiras e cana-de-açúcar no trecho médio e inferior.

Da mesma forma, o fósforo total refletiu a influência da intensa atividade agrícola no trecho médio, da margem esquerda do reservatório, dado a concentração de pivôs, como também observado para a variável de nitrogênio total.

Determinação do Teor de Nitrogênio e Fósforo Totais na Macrófita *Egeria najas* e no Sedimento

Os teores médios de nitrogênio no sedimento e *E. najas* foram, respectivamente, 1,5 ppm e 32,1 ppm (Figura 8). A notação de ppm é equivalente a mg.L^{-1} de modo que é possível comparar com a concentração média de nitrogênio total na água superficial, cujo valor médio foi de 0,97 mg.L^{-1} .

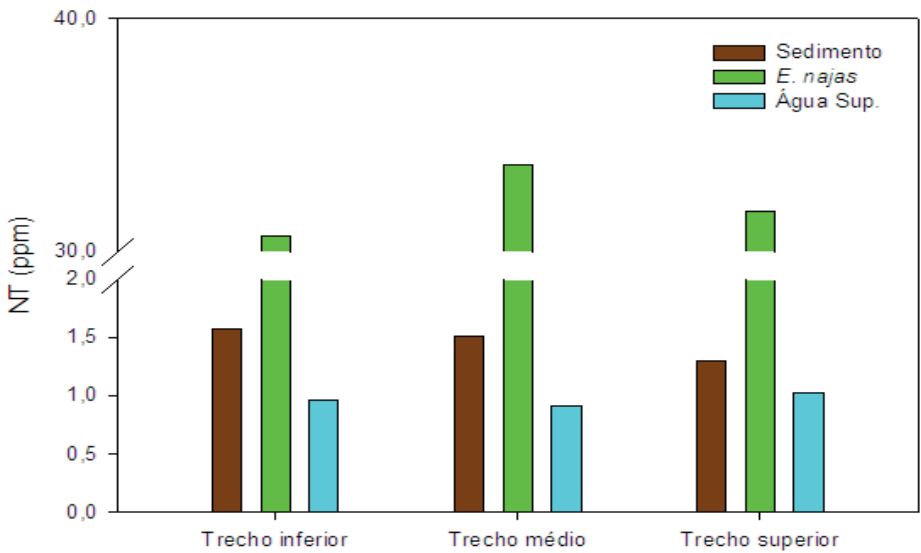


Figura 8 – Teor de nitrogênio total determinado para sedimento, *E. najas* e água superficial nos trechos inferior, médio e superior do reservatório de Volta Grande.

Para o fósforo total, o teor médio foi 29,8 ppm no sedimento e 2,5 ppm em *E. najas* (Figura 9). A concentração média na água superficial foi de 0,027 mg.L^{-1} . Ao contrário do nitrogênio, pode-se observar maior acúmulo de fósforo no sedimento em relação à macrófita.

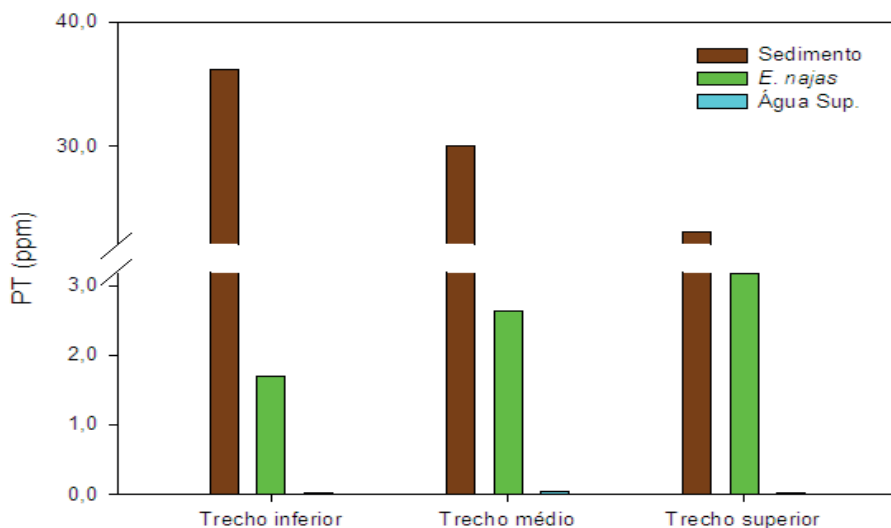


Figura 9 – Teor de fósforo total determinado para sedimento, *E. najas* e água superficial nos trechos inferior, médio e superior do reservatório de Volta Grande.

Balanço de Massa Parcial de Nitrogênio e Fósforo Totais

O reservatório de Volta Grande é do tipo fio d'água e apresenta normalmente pequenas variações da sua cota. Entretanto, o período de estiagem intensificado nos anos de 2013 a 2015, que levou à chamada “crise hídrica” na região Sudeste do país, aliado às necessidades do setor elétrico, alterou o sistema de operação do reservatório. Na Figura 10 pode ser observada a variação das vazões afluentes e defluentes do reservatório de Volta Grande no período em estudo. Observa-se que no período de janeiro/2014 a janeiro/2015 a vazão defluente foi maior que a vazão afluente, o que significa dizer que foi turbinada mais água do que chegou ao reservatório. As menores vazões registradas foram no período compreendido entre maio/2014 e julho/2014, vazões que variaram entre 244 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (afluente) e 295,69 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (defluente).

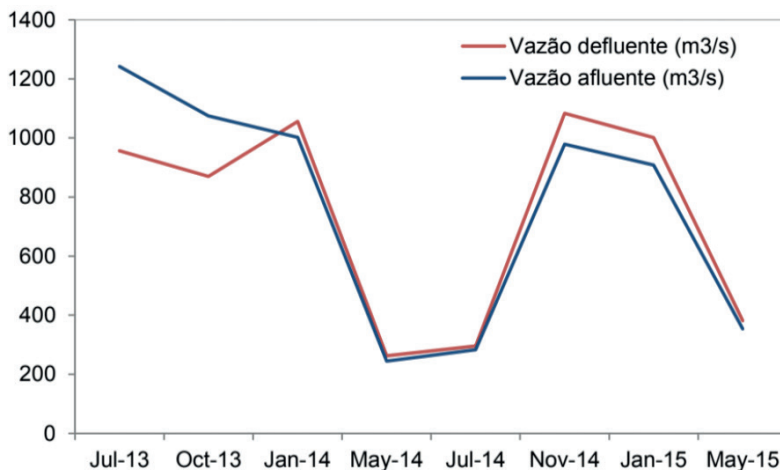


Figura 10 - Série de vazões afluente e defluente (m^3/s), no período de julho/13 a maio/15, para o reservatório de Volta Grande, Rio Grande (SP/MG).

A carga de nitrogênio total recebida pelo reservatório via rio Grande variou de 198,89 (julho/2014) a 3.575,40 (julho/2013) ton. mês^{-1} (Figura 11). A importação de nitrogênio foi superior à exportação, a única exceção foi observada no mês de maio/2015 quando o sistema perdeu 172,08 ton. mês^{-1} , sendo julho/2013 o mês que ocorreu o maior acúmulo 2.243,40 ton. mês^{-1} , seguido de novembro/2014 com 650,3 ton. mês^{-1} . O balanço total indica que para todo o período estudado o reservatório acumulou aproximadamente 3.690,35 ton. de nitrogênio total.

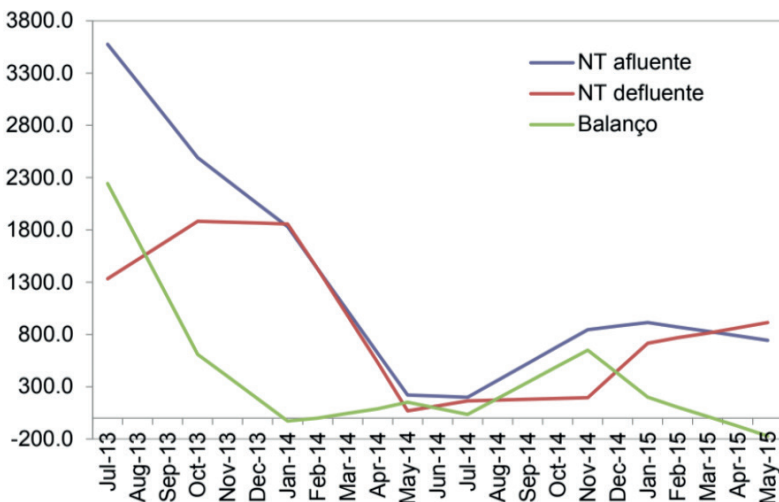


Figura 11 - Variação mensal da carga de nitrogênio (ton./mês) e balanço de massa, no período de julho/13 a maio/15, para o reservatório de Volta Grande, Rio Grande (SP/MG).

O aporte mensal de fósforo via rio Grande é alto, sendo registrada a carga mínima de 3,40 toneladas de fósforo/mês em julho/2013 e máxima de 174,34 toneladas de fósforo/mês em novembro/2014. A exportação de fósforo oscilou entre 0,02 a 139,00 toneladas de fósforo por mês (Figura 12). O reservatório reteve mais fósforo de novembro/2014 a maio/2015, sendo que janeiro/2015 foi o mês que o sistema mais reteve esse nutriente (74,5 ton/mês). O balanço de massa para todo o período em estudo indica que o reservatório acumulou 150,06 ton. de fósforo.

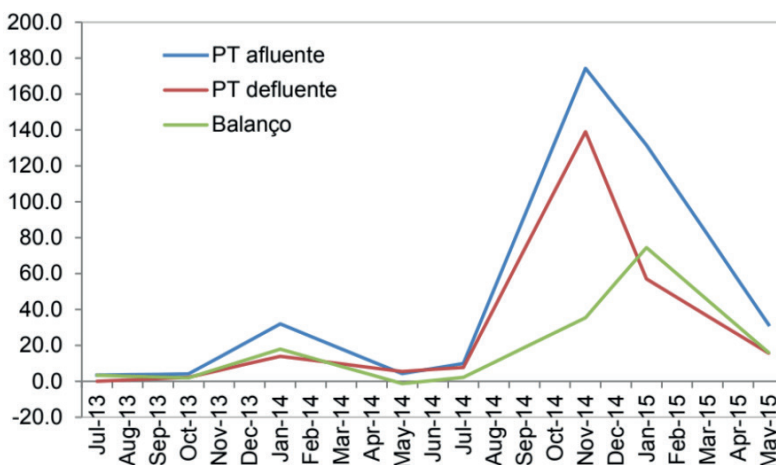


Figura 12 - Variação mensal da carga de fósforo (ton./mês) e balanço de massa, no período de julho/13 a maio/15, para o reservatório de Volta Grande. Rio Grande (SP/MG).

DISCUSSÃO

As áreas que mais contribuíram para o aporte de carga de fósforo e nitrogênio no reservatório de Volta Grande ocorreram na margem esquerda, em virtude da alta concentração de culturas agrícolas intensivas de cana-de-açúcar, em especial, lavouras irrigadas de milho e feijão. O trecho de influência na área urbana de Miguelópolis (22.226 hab.) também contribuiu no aporte de nutrientes. Em relação aos tributários, o mais representativo foi o rio do Carmo, em virtude da abrangência de sua bacia de drenagem. Na margem direita os tributários que mais contribuíram foram o ribeirão Ponte Alta e o córrego Água Comprida, devido à influência das áreas urbanas de Uberaba (333.783 hab.) e Água Comprida (2.025 hab.), bem como das atividades pecuárias e silviculturais, sendo desta forma os principais alvos para gestão e controle.

O crescimento excessivo de macrófitas submersas e flutuantes no reservatório de Volta Grande, concentra-se em regiões com influências de cargas externas de nutrientes: A exemplo de *E. najas* na desembocadura do rio do Carmo no transecto 4, à jusante do transecto 5 e distrito industrial de Uberaba onde foi observado um extenso banco de *E.*

crassipes e *E. azurea*. Além disso, neste ambiente predominam condições que favorecem o crescimento de *E. najas* como a transparência da água e baixa turbidez. Segundo Petracco (2006), na lagoa do Óleo (SP) as maiores taxas produção primária desta espécie foram observadas no período chuvoso, quando há maior disponibilidade de luz. De fato, as hidrocaritáceas formam densos bancos como uma estratégia para absorver grandes quantidades de luz.. No reservatório de Itaipu a profundidade ótima de crescimento encontrada para *E. najas* foi de 1,5m (Bini *et al.*, 2010).

Outra característica importante do reservatório que favorece o desenvolvimento das macrófitas submersas, atribui-se à sua tipologia, uma vez que a menor variação dos níveis causa menos exposição das plantas, permitindo crescimento constante e manutenção dos bancos (Thomaz, 2006). Para alguns autores (Bini & Thomaz, 2005; Pierini & Thomaz, 2009; Sousa *et al.*, 2009) condutividade, transparência ou coeficiente de atenuação da luz e pista de vento (fetch) estão entre os fatores mais importantes para determinar a distribuição de *E. najas* em reservatórios e rios. De fato, em pontos mais profundos como na região limnética de Volta Grande (figura 3) não foi observada sua ocorrência devido a limitação luminosa, assim como nas regiões abertas do reservatório quando a pista de vento causa variações significativas na turbulência das águas. Uma correlação positiva entre a profundidade máxima (Z_{máx}) e o fetch foi verificada por Hudon *et al.*, 2000, onde foi observado a colonização por *E. najas* em áreas de maior profundidade quando expostas à maior turbulência.

Após análise de nitrogênio total em *E. najas* foi constatado teor até vinte vezes maior nesta macrófita em relação ao sedimento. O nitrogênio é um elemento abundante em biomoléculas, podendo representar até 10% da biomassa de células vivas durante a fase de crescimento (Esteves, 2011). O nitrogênio é um nutriente que está relacionado aos mais importantes processos fisiológicos que ocorrem nas plantas, tais como fotossíntese, respiração desenvolvimento e atividade das raízes, absorção iônica de outros nutrientes, crescimento, diferenciação celular e genética, portanto, além de ser constituinte dos aminoácidos livres e protéicos, o nitrogênio está presente em outros compostos nitrogenados importantes, como as bases nitrogenadas (purinas e pirimidinas), os ácidos nucleicos (DNA e RNA), que perfazem cerca de 10% do total do nitrogênio na planta. Outras formas amino solúveis chegam a compor 5% do N das plantas. A fração presente como NO₃⁻ e NH₄⁺ geralmente representa baixa porcentagem (Bredemeier & Mundstock, 2000; Mengel & Kirby, 2001).

Em águas bem oxigenadas, como as do reservatório de Volta Grande (média de 7,8 mg.L⁻¹), a lixiviação e a desassimilação em macrófitas podem ser rápidas, resultando em menor acúmulo no sedimento em relação à biomassa viva (Bianchini Jr., 2003). As macrófitas submersas podem assimilar altas concentrações de nutrientes dos sedimentos, sendo estes acumulados nos tecidos da planta. Contudo, existem controvérsias de qual a maior fonte de nutrientes para macrófitas aquáticas enraizadas, se o sedimento ou a

água. As macrófitas submersas exibem grande plasticidade fenotípica e são adaptadas para absorver e translocar nutrientes do sedimento para as folhas, principalmente em condições limitantes (Barko *et al.*, 1991). No reservatório de Itaipu, especialmente durante a ocorrência de densos bancos de *E. najas*, Bini et al. (2010) também observaram grande influência desta macrófita nas concentrações de nitrogênio e nenhum efeito significativo em relação nas concentrações de fósforo.

Segundo Thomaz et al. (2007), durante o crescimento, *E. najas* absorve nitrogênio e fósforo tanto da coluna d'água quanto do sedimento, especialmente deste último, quando há escassez no vegetal. Os autores também observaram grande afinidade desta macrófita pelo nitrogênio, cujos tecidos apresentaram alta saturação mesmo em baixas concentrações deste nutriente, sendo esta uma vantagem competitiva em ambientes relativamente pobres sobre espécies típicas de ambientes mais eutróficos. No reservatório de Volta Grande, também foi observada maior concentração de nitrogênio em *E. najas* do que na água superficial ou no sedimento.

Ao contrário do nitrogênio, pode-se observar o acúmulo de fósforo no sedimento em relação à macrófita. As águas bem oxigenadas do reservatório favoreceram a formação de complexos insolúveis do fósforo com o ferro, acumulando este no sedimento (Esteves, 2011). Este processo ocorreu ao longo de todo o reservatório, sendo os teores crescentes em direção à barragem (trecho inferior). O trecho superior do reservatório está sob influência do distrito industrial de Uberaba, onde sete das quatorze indústrias são de produção de fertilizantes. Neste trecho o teor de fósforo em *E. najas* foi maior (3,17 ppm) de forma a amortizar a carga alóctone.

O presente estudo demonstrou que o reservatório acumulou tanto fósforo (150 ton.) quanto nitrogênio (3.690 ton.), durante o período analisado. Estes nutrientes podem ser imobilizados no sedimento ou inseridos nos ciclos biológicos que alteram a dominância de alguns grupos florísticos e faunísticos, destacando as algas ou macrófitas aquáticas que podem ter seu crescimento potencializado de forma invasiva (Bini & Thomaz, 2005). No reservatório de Volta Grande os valores acumulados foram superiores aos estimados por Henry *et al.* (1999), para o reservatório de Jurumirim (SP), o qual acumulou 24,6 ton.ano⁻¹ de fósforo em dois anos estudados, e exportou 733 e 844 ton.ano⁻¹ de nitrogênio nos anos de 1992 e 1993, respectivamente.

A retenção de fósforo de Volta Grande foi inferior a estimada para o reservatório hipereutrófico da Pampulha (MG), que em 1998 reteve 521 toneladas de fósforo (Tôres, 1999). Na represa da Pampulha, a estimativa obtida em relação ao nitrogênio foi que as formas orgânicas são retidas e as inorgânicas exportadas; enquanto para o fósforo todas formas são incorporadas ao sistema (Barbosa *et al.*, 1998). Para o lago Paranoá (DF), foi estimado que 80% do fósforo recebido era retido, cerca de 92,0 ton.ano⁻¹ (Cordeiro Netto & Dutra Filho, 1981). Quando comparado a estudo realizado por Greco (2002), as porcentagens de retenção de fósforo (34,8%) e nitrogênio total (24,3%) no reservatório

de Volta Grande foram menores que as observadas atualmente (37,3% e 38,3%, respectivamente). Contudo, estes valores ainda são menores do que 56% na represa de Barra Bonita (Braga *et al.*, 1998) e que 96% e 79% estimados para a Pampulha (Barbosa *et al.*, 1998 e Tôrres, 1999, respectivamente). O baixo tempo de residência da água em Volta Grande deve ser o fator preponderante dessa diferença.

Apesar do elevado acúmulo de nutrientes, a região lacustre do reservatório ainda mantém baixas concentrações de fósforo e nitrogênio total, devido provavelmente à sedimentação e a incorporação por *Egeria najas*, respectivamente. Além disso, é sabido que ao decompor, macrófitas aquáticas liberam grande quantidade de nutrientes na água, especialmente carbono, nitrogênio e fósforo (Esteves, 2001). Apesar destas taxas serem altas em *E. najas*, devido ao menor conteúdo de compostos resistentes como celulose e lignina, esta rápida decomposição proporciona pouca exportação de seus bancos para outras regiões nos reservatórios tropicais (Carvalho *et al.*, 2005).

De acordo com os Índices aplicados de Estado Trófico (IET) e de Qualidade de Água em Reservatório (IQAR), o reservatório de Volta Grande encontra-se na categoria oligotrófico (Brito *et al.*, 2018). Essa condição de qualidade da água tem sido mantida pela grande capacidade do sistema em absorver os elevados aportes externos de fósforo e nitrogênio. O atual estado trófico é, no entanto, transitório e depende de diversos mecanismos relacionados ao metabolismo de organismos planctônicos, bentônicos e de macrófitas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto P&D 486 Cemig/Hidroex – Pesquisa, Controle de Qualidade de Água e Revitalização do Rio Grande, pelo financiamento deste estudo.

REFERÊNCIAS

Amaral, M.C.E., Bittrich, V., Faria, A.D., Anderson, L.O., Aona, L.Y.S. 2008. **Guia de Campo para Plantas Aquáticas e Palustres do Estado de São Paulo**. Ribeirão Preto: Holos. 452p.

APHA - American Public Health Association. 2012. **Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater**. Eugene W. Rice, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri (eds.) American Public Health Association, American Public Works Association, Water Environment Federation. 22nd Edition.

ArcGIS. 2015. **How IDW Works**. ESRI - Environmental Systems Research Institute. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>

Barbosa, F., Garcia, F.C., Marques, M., Nascimento, F.A. 1998. **Nitrogen and phosphorus balance in a eutrophic reservoir in Minas Gerais: a first approach**. Rev. Bras. Biol., 58: 233-239.

Barko, J. W., Gunninson, D., Carpenter, S. R. 1991. **Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics**. Aquat. Bot., 41: 41– 65.

Belini, F. L. 2007. **Concentração de Metais-Pesados, Nitrogênio e Fósforo em Cinco Espécies de Macrófitas na Zona Litorânea da Lagoa Silvana (Caratinga, MG), em Relação à Composição Química da Água e Sedimentos.** Dissertação. Unileste. 113p.

Bini, L.M.; Thomaz, S.M. 2005. **Prediction of *Egeria najas* and *Egeria densa* occurrence in a large subtropical reservoir (Itaipu Reservoir, Brazil-Paraguay).** Aquatic Botany, 83: 227–238.

Bini, L.M.; Thomaz, S.M.; Carvalho, P. 2010. **Limnological effects of *Egeria najas* Planchon (Hydrocharitaceae) in the arms of Itaipu Reservoir (Brazil, Paraguay).** Limnology, 11: 39–47.

Bianchini Jr., I. 2003. **Modelos de crescimento e decomposição de macrófitas aquáticas.** In: Thomaz, S. M.; Bini, L. M. Ecologia e Manejo de Macrófitas Aquáticas. Maringá: EDUEM. p. 85-126.

Braga, B., Rocha, O & Tundisi, J. 1998. **Dams and the environment: the brasilian experience.** Water Resour. Dev., 14: 127-40.

Brito, S. L.; Lopez, C. M. ; Souza, G. C. T. ; Francischetti, S. ; Marques, M. M. ; Guarda, V. L. M. ; Greco, M. B. ; Carvalho, M. D. **Índice Plâncton Bentônico para Avaliação de Qualidade de Água no Rio Grande - MG/SP.** In: Ecologia, Evolução e Diversidade. 1 ed. Ponta Grossa : Atena Editora, 2018, v.1, p. 33-49.

Carney, H.J., Binford, M.W., Marin, R.R., Goldman, C.R. 1993. **Nitrogen and phosphorus dynamics and retention in ecotones of Lake Titicaca, Bolivia/Peru.** Hydrobiologia, 251: 39-47.

Carvalho, P.; Thomaz, S.M.; Bini, L.M. 2005. **Effects of Temperature on Decomposition of a Potential Nuisance Species: the Submerged Aquatic Macrophyte *Egeria najas* Planchon (Hydrocharitaceae).** Braz. J. Biol., 65(1): 51-60.

Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. **Usinas Hidrelétricas da Cemig.** Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidreletricas.aspx> Acesso em: 25. jul. 2017.

Cordeiro Netto, O M. & Dutra Filho, D. 1981. **O aporte de fósforo ao Lago Paranoá.** XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza (CE), pp. 1-19.

Ebina, J.; Tsutsui, Y.; Shirai, T. 1983. **Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxidissulfate oxidation.** Wat. Res. 17: 1721-1726. Embrapa,

Eisenreich, S.J. 1975. **A simplified phosphorous analysis technique.** Environmental Letters. n. 9, p. 43-53.

Esteves, F. A. 2011. **Fundamentos de Limnologia.** 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 826 p.

Ford, D. E. 1990. **Reservoir transport Processes.** In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel & F. E. Payne (eds). Reservoir Limnology: ecological perspectives. John Wiley & Sons, New York, pp:15-41.

Gibson, C. E., Foy, R. H. & Bailey-Watts, A. E. 1996. **An analysis of the total phosphorus cycle in some temperate lakes: the response to enrichment.** Fresch. Biol., 35: 525-532.

Greco, M. K. B., 2002. **Balanço de Massa de Fósforo, Evolução da Eutrofização e o Crescimento de Macrófitas Flutuantes no Reservatório de Volta Grande (MG,SP)**. Universidade Federal de Minas Gerais. 158p.

Henry, R. (ed.) 1999. **Ecologia dos Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais**. Botucatu: FUNDIBIO, FAPESP. 799p.

Hutchinson, G. E., 1975. **A treatise on limnology**. Vol. I. Chemistry of lakes. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1015p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012. **IBGE, Cidades**. Disponível em <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>.

Kennedy, R. H. & Walker W. W. 1990. **Reservoir nutrient dynamics**. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel & F. E. Payne (eds). *Reservoir Limnology: ecological perspectives*. John Wiley & Sons, New York, pp: 109-131.

Krug, A. 1993. **Drainage history and land use pattern of a Swedish river system-their importance for undertanging nitrogen and phosphorus load**. *Hydrobiologia*, 251: 285- 296.

Neiff, J. J. 1996. **Large rives of South America: toward the new approach**. *Verh. Internrt. Verein. Limnol.*, 26: 167-180.

P&D 486. 2016. **Projeto de Pesquisa, Controle da Qualidade das Águas e Revitalização do Rio Grande**. Relatório Final. Belo Horizonte: Cemig/Hidroex. 205 p.

Petracco, P. 2006. **Efeito das Variáveis Abióticas na Produção Primária de *Egeria najas* e *Utricularia breviscapa* da Lagoa do Óleo (Estação Ecológica de Jataí, Luiz Antônio - SP)**. Tese de Doutorado. São Carlos: UFSCAR. 145p.

Pierini, S.A. & Thomaz, S.M. 2009. **Effects of Limnological and Morphometric Factors Upon Z_{min} , Z_{max} and Width of *Egeria* spp Stands in a Tropical Reservoir**. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52(2): 387-396.

Pinto-Coelho, R.M. 1998. **Effects of eutrophication on seasonal patterns of mesozooplankton in a tropical reservoir: a 4-year study in Pampulha lake, Brazil**. *Freshwat. Biol.* 40: 159- 173.

Pott, V.J. & Pott, A. 2000. **Plantas Aquáticas do Pantanal**. Brasília: Embrapa. 404p.

Santos, G.B. & Formagio, P.S. 2000. **Estrutura da ictiofauna dos reservatórios do Rio Grande com ênfase no estabelecimento de peixes piscívoros exóticos**. *Inf. Agro.*, 21; 98-106.

Sousa, R.S., Costa, R.A., Assunção, H.F. & Melo, S.C. 2009. **Variações Pluviométricas no Triângulo Mineiro-MG**. *Geonordeste*, Ano XX, n. 2 179-201.

Sousa, W. T. Z.; Thomaz, S. M.; Murphy, K. J.; Silveira, M. J. ; Mormul, R. P. 2009. **Environmental predictors of the occurrence of exotic *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle and native *Egeria najas* Planchon in a sub-tropical river floodplain: the Upper River Paraná, Brazil**. *Hydrobiologia*, 632:65–78.

Stiling, P.D. 1996. **Ecology – Theories and applications**. 2a ed. Prentice Hall, New Jersey, 539p.

- Straskraba, M., Dostalkova, I., Hejzlar, J. & Vyhnaek, V. 1995. **The effect of reservoir on phosphorus concentration.** Int. Revue. Ges. Hydrobiol., 80: 403-413.
- Svendsen, L. M. & Krovang, B. 1993. **Retention of nitrogen and phosphorus in a danish lowland river system: implications for the export from the watershed.** Hydrobiologia: 251: 123-135.
- Thomaz, S. M. 2006. **Fatores que afetam a distribuição e o desenvolvimento de macrófitas aquáticas em reservatório: uma análise em diferentes escalas.** In: Nogueira, M. G.; Henry, R.; Jorcin, A. (Orgs.). Ecologia de reservatório: Impactos potenciais, ações de manejo e sistema cascata. 2.ed. São Carlos: Rima, p. 165-181.
- Thomaz, S.M.; Chambers, P.A.; Pierini, S.A.; Pereira, G. 2007. **Effects of phosphorus and nitrogen amendments on the growth of *Egeria najas*.** Aquatic Botany 86: 191–196.
- Tôrres, I.C. 1999. **Determinação da Influência dos tributários na qualidade da água da represa da Pampulha.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG. 117p.
- Young, W. J., Marton, F. M. & Davis, J. R. 1996. **Nutrient exports and land use in Australian catchments.** J. Environ. Manag., 47: 165-183.