

Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil)

Vulnerability towards eutrophication of two tropical lakes in both humid (Cuba) and semiarid (Brazil) climates

Mario Cesar Wiegand¹, Julio Iván González Piedra², José Carlos de Araújo³

RESUMO

Este artigo compara o estado de eutrofização e suas prováveis causas em dois reservatórios tropicais, um em clima úmido (La Juventud, Cuba) e o outro em clima semiárido (Marengo, Brasil). Após estimar o estado trófico dos dois reservatórios nas estações chuvosa e seca, avaliou-se a influência hidrológica e de uso do solo sobre o grau de trofia dos lagos. Concluiu-se que os lagos são, em média, mesotróficos. Porém, o lago tropical semiárido encontra-se eutrófico, enquanto que o úmido está oligotrófico. Considerando que há similitude entre os usos do solo nas duas bacias e que, na estação chuvosa, o aporte de nutrientes na bacia úmida é consideravelmente superior ao da semiárida, o maior estado trófico da bacia seca surpreende. A variável que melhor explica esse fenômeno é o tempo de residência da água, que influencia diretamente o tempo de residência do fósforo no lago. O elevado tempo de residência da água na bacia semiárida (três vezes superior ao do lago úmido) deve-se tanto ao reduzido coeficiente de escoamento superficial (93 versus 595 mm anuais na bacia úmida) quanto à excessiva evaporação da água armazenada no reservatório seco (quatro vezes superior à do reservatório úmido). Esses resultados indicam que lagos semiáridos são mais vulneráveis à eutrofização que os úmidos nos períodos de estio e que, portanto, o manejo de suas bacias deve ser mais restritivo à produção de nutrientes.

Palavras-chave: limnologia; uso e ocupação do solo; tempo de residência.

ABSTRACT

This manuscript compares the eutrophication status and its possible causes in two tropical reservoirs, one in humid climate (La Juventud, Cuba) and the other in semi-arid climate (Marengo, Brazil). After estimating the trophic state of the two reservoirs in rainy and dry seasons, we evaluated the influence of hydrology and of land use on reservoir trophic level. It was found that the semi-arid tropical reservoir was eutrophic, while the reservoir on humid climate was mesotrophic. Considering that there is similar land use in the two basins and that, in the rainy season, the nutrient input in the wet basin is considerably higher than the nutrient input in the semiarid basin, the higher trophic state of the semi-arid basin is surprising. The variable that best explains this phenomenon is the water residence time, which directly influences the phosphorus residence time in the reservoir. The high water residence time in the semiarid basin reservoir (three times that of the reservoir in humid climate) is due as much to the low runoff coefficient (93 versus 595 mm per year in the reservoir in humid climate) as to the excessive water evaporation in the semiarid reservoir (1.2 times that of the reservoir in humid climate). These results indicate that semiarid reservoirs are more vulnerable to eutrophication than reservoirs in humid climate in summer periods and, therefore, the management of their basins should be more restrictive to nutrient production.

Keywords: limnology; land use and occupation; residence time.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda hídrica na América Latina e no Caribe durante os últimos anos tem acelerado a construção de reservatórios artificiais para usos múltiplos da água (LIMA NETO; WIEGAND; de ARAÚJO, 2011; MAMEDE *et al.* 2012). Todavia, muitos desses reservatórios têm sofrido processo de eutrofização, interferindo nos usos para os quais

esses corpos d'água foram construídos (SALAS & MARTINO, 2001). O processo de eutrofização tem se tornado um impacto ambiental de ordem global, sendo um dos mais graves problemas relacionados com a conservação da água (SMITH & SCHINDLER, 2009). Eutrofização é o fenômeno pelo qual um ecossistema se torna cada vez mais produtivo pelo enriquecimento por nutrientes, principalmente fósforo

¹Doutor pela Universidade Federal do Ceará (UFC) - Fortaleza (CE), Brasil.

²Professor da Faculdade de Geografia da Universidade de Havana - Havana, Cuba.

³Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC - Fortaleza (CE), Brasil.

Endereço para correspondência: Mario Cesar Wiegand - Rua Sérgio Luís Otto, 20 - 82710-270 - Curitiba (PR), Brasil - E-mail: mcwiegand1@yahoo.com.br

Recebido: 21/08/14 - **Aceito:** 15/10/15 - **Reg. Abes:** 139527

e nitrogênio. Como consequência, os produtores primários são estimulados, gerando-se o crescimento excessivo de macrófitas e algas planctônicas (SMITH; JOYE; HOWARTH, 2006; WANG; WANG, 2009). Entre os principais impactos causados pela eutrofização estão o aumento da contaminação dos corpos hídricos por metais e substâncias tóxicas (liberadas por algas), a depleção do oxigênio dissolvido, a redução do espelho d'água, a morte de plantas e animais aquáticos (MORAES, 2009) e a produção de toxinas por algas cianofíceas (AZEVEDO *et al.*, 2002; VIANA *et al.*, 2009). Nyenje *et al.* (2010) relataram que 54% dos lagos e reservatórios na Ásia estão eutrofizados; na Europa, essa fração é de 53%; na América do Norte, 48%; na América do Sul, 41%; e, na África, 28%.

Há muitos fatores que regulam as mudanças em ecossistemas aquáticos. Como o processo de eutrofização está associado ao aporte de nutrientes, sua redução consiste na primeira meta para a recuperação ecológica dos ambientes atingidos (SCHINDLER *et al.*, 2008). Estudos de qualidade da água em várias regiões demonstraram que o clima, o uso do solo e a hidrologia das bacias hidrográficas são fatores que afetam diretamente suas características limnológicas (LEE *et al.*, 2010;

SOARES *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2010). No entanto, poucos trabalhos têm sido produzidos para avaliar a conexão entre essas características (JONES & ELLIOTT, 2007). Entre as variáveis de maior importância para a qualidade da água em reservatórios está o tempo de residência da água (BURFORD *et al.*, 2007; JONES & ELLIOTT, 2007) e de constituintes, como o fósforo. Assim, a finalidade deste estudo foi avaliar, comparativamente, a vulnerabilidade à eutrofização e os fatores intervinientes de dois reservatórios artificiais: um tropical semiárido, no Brasil, e outro tropical úmido, em Cuba.

ÁREAS DE ESTUDO

A localização das bacias investigadas é apresentada na Figura 1, e suas principais características encontram-se na Tabela 1. A área de estudo tropical semiárida corresponde ao açude Marengo e à sua bacia hidrográfica, localizados no estado de Ceará, Brasil, cuja superfície de drenagem é de 75 km². O clima é tropical quente semiárido, caracterizado por períodos de estiagem prolongados e variabilidade temporal das chuvas. A região, que possui temperatura média anual de 27 °C, está

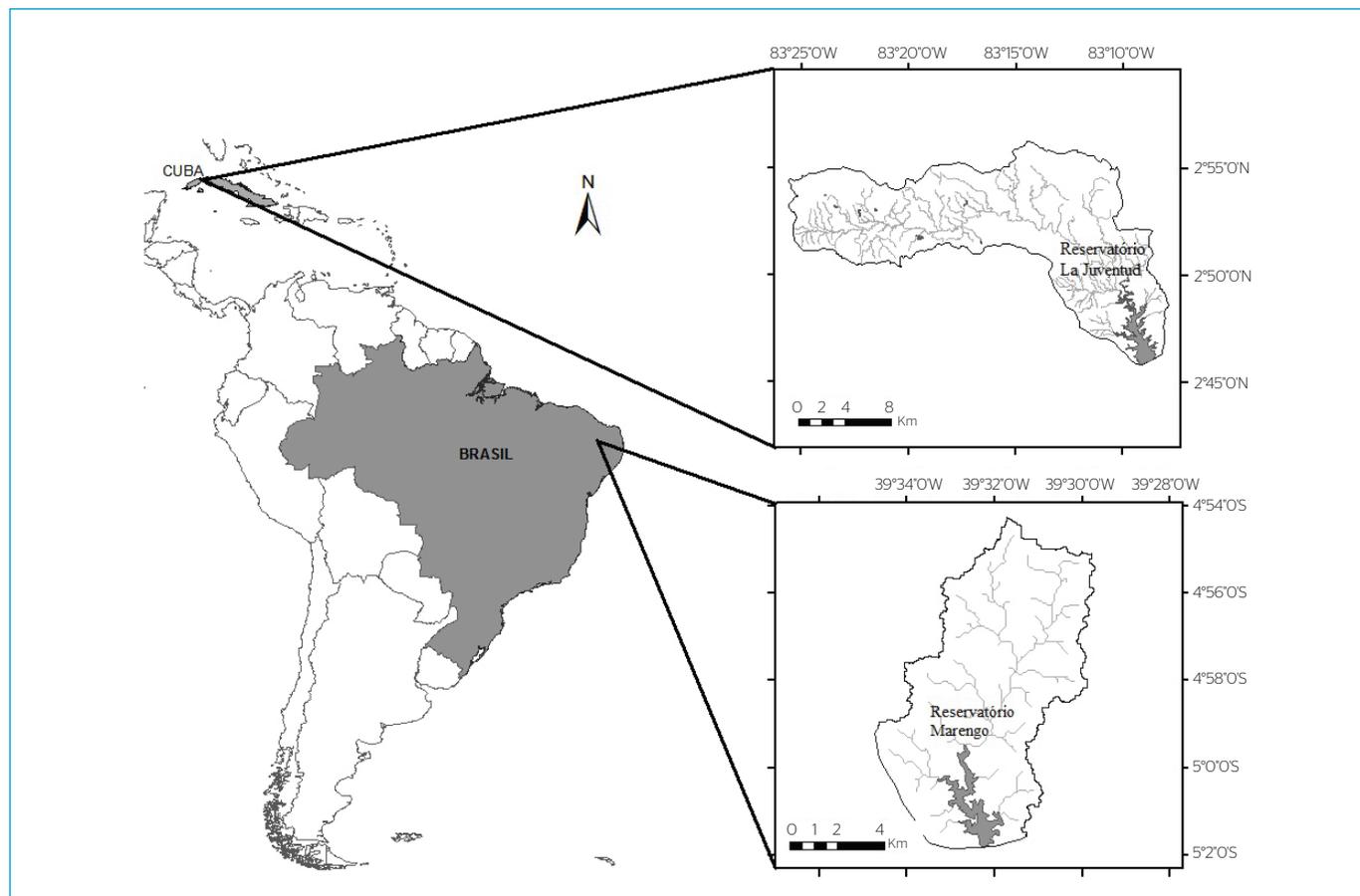


Figura 1 - Localização e hidrografia das bacias em estudo: tropical semiárida (reservatório Marengo, Ceará, Brasil) e tropical úmida (reservatório La Juventud, Pinar del Río, Cuba).

sujeita a ventos fortes e secos durante o segundo semestre. A precipitação média anual é aproximadamente 600 mm, com elevada variabilidade interanual e estação chuvosa nitidamente estabelecida entre fevereiro e maio, quando precipitam 75% do montante anual. A taxa de evaporação potencial (2.200 mm anuais) é quase quatro vezes mais elevada que sua precipitação. Observa-se a ocorrência de uma seca severa a cada década. A bacia, inserida na Depressão Sertaneja do semiárido brasileiro, situa-se integralmente sobre o embasamento cristalino, com ocorrência muito baixa (menos de 1%) de aluvião. Os solos são rasos com predomínio de Luvisolos Crômicos, Neossolos Litólico, Argissolos Vermelho-Amarelo, Planossolos Solódicos e Vertissolos. A cobertura vegetal natural é a Caatinga arbustiva densa, floresta caducifólia espinhosa. O açude Marengo tem capacidade de acumulação pouco superior a 15 hm³. Os seus afluentes são intermitentes, escoando não mais que quatro meses ao ano, nos quais o escoamento de base é extremamente limitado (de ARAÚJO & PIEDRA, 2009; LOPES, 2013; PINHEIRO; COELHO; de ARAÚJO, 2011).

A bacia tropical úmida corresponde ao açude La Juventud e à sua bacia hidrográfica, situados na província de Pinar Del Río, Cuba, com área de 237 km². Sua altitude média é de 165 m acima do nível do mar e sua declividade de 12%. Seu clima é tropical úmido, caracterizado por um período chuvoso entre maio e outubro e um seco de novembro até abril. Apresenta precipitação anual de quase 1.500 mm, evaporação potencial anual de 1.800 mm e temperatura média anual de 26 °C. Geologicamente, a bacia é dividida por uma falha regional em dois blocos, de diferentes substratos, caracterizados pelas serras dos Órgãos e do Rosário. Ambas estão divididas em duas partes: a primeira, em cinturão de morros testemunhas e manto tectônico; e a segunda, em Rosário Norte e Rosário Sul, cada uma composta por diferentes mantos tectônicos. Os solos da bacia, predominantemente pouco evoluídos, são ferralíticos e pardos na porção norte (montante), delimitados pela barragem La Juventud; e hidromórficos em toda a porção sul, a jusante do barramento. Sua vegetação natural é composta por bosques tropicais perenifoliados e subperenifoliados. A bacia é formada por rios de curto comprimento e perenes, com significativo escoamento de base. A lâmina média escoada na estação hidrométrica de Las Gavilanes, a montante do açude La Juventud, é de quase 600 mm anuais (CUBA, 1973; 2000; 2004; RODRÍGUEZ ROSA, 2013; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, 2014).

METODOLOGIA

Para avaliar o grau de eutrofização dos reservatórios, adotou-se o índice de estado trófico (IET) de Carlson modificado por Toledo Jr. *et al.* (1983), que considera tanto a transparência da água — medida pela profundidade do disco de Secchi (SD, em metros) — quanto a concentração de ortofosfato na água (PO₄, em µg.L⁻¹), conforme Equações 1 a 3. De acordo com Toledo Jr. *et al.* (1983), um lago está oligotrófico se o

Tabela 1 – Principais variáveis de análise comparativa entre as bacias tropicais Marengo (semiárida) e La Juventud (úmida).

Descrição	Bacia semiárida	Bacia úmida
Clima		
Classificação de Koepen	Bs	Aw
Precipitação média (mm.ano ⁻¹)	569	1481
Radiação global diária média (MJ.m ⁻²)	18	21
Velocidade média do vento (m.s ⁻¹)	3,5	4,0
Insolação anual média (h)	2.760	2.815
Umidade relativa média	0,66	0,79
Evaporação potencial anual média (mm)	2.200	1.800
Meses com 75% de precipitação anual	Fevereiro a maio	Maior a outubro
Hidrologia		
Área da bacia hidrográfica (km ²)	75	237
Nome do reservatório	Marengo	La Juventud
Capacidade de estocagem (hm ³)	15,30	105,00
Volume do reservatório por área (mm)	443	204
Característica hidrologia do rio principal	Intermitente	Perene
Vazão anual: média (hm ³)	7	141
Vazão anual: média (mm)	93	595
Vazão anual: coeficiente de variação	0,95	0,42
Vazão anual: coeficiente de escoamento superficial	0,16	0,40
Tempo de residência da água (anos)	2,16	0,74
Tempo de residência do fósforo (anos)	0,61	0,30
Retenção de fósforo	0,73	0,50
Uso do solo		
População total (habitantes)	1.650	9.500
População: densidade (habitantes por km ²)	22	40
População: maior área urbana (habitantes)	250	3.350
Suprimento de água (frequência)	0,40	1,00
Adequado sistema de esgoto (frequência)	0,15	0,60
Estradas rurais pavimentadas (frequência)	0,05	0,80
Área média agrícola por família (ha)	1,50	1,00
Fração de área urbana	0,08	0,15
Fração de área agrícola e bovina	0,35	0,40
Fração de área preservada	0,50	0,35
Fração de outros usos do solo (água, estradas etc.)	0,07	0,10

IET for inferior a 44; mesotrófico se o IET estiver entre 44 e 54; eutrófico se o IET estiver entre 54 e 74; e hipereutrófico se o IET superar 74.

$$\text{IET} = [\text{IET}(\text{SD}) + 2.\text{IET}(\text{PO4})]/3 \quad (1)$$

$$\text{IET}(\text{SD}) = 10.\{6 - [0,64 + \text{Ln}(\text{SD})]/\text{Ln}(2)\} \quad (2)$$

$$\text{IET}(\text{PO4}) = 10.\{6 - \text{Ln}(21,6/\text{PO4})/\text{Ln}(2)\} \quad (3)$$

A transparência da água em ambos os reservatórios foi medida pelo SD. Para a coleta das amostras de água no reservatório Marengo, utilizou-se um amostrador *van Dorn*. Foram realizadas coletas em março, abril e maio de 2012 (período chuvoso) e agosto, setembro e outubro de 2012 (período de estio), na profundidade do SD. As amostras foram coletadas sempre às 10 horas, em três pontos distintos do açude: um próximo à barragem, um na zona central e um no braço do principal rio afluente. As amostras de água do reservatório La Juventud foram coletadas também na profundidade do SD, sempre às 11 horas, em julho e agosto de 2012 (período chuvoso) e março de 2013 (período de estiagem) em três pontos distintos do reservatório, seguindo o mesmo critério do reservatório semiárido. Todas as amostras destinadas a ensaios químicos em laboratório foram acondicionadas em caixas isotérmicas a temperatura constante de 4 °C para transporte; e os ensaios seguiram as instruções da APHA (2005).

Para avaliação do uso do solo das duas bacias, fez-se consulta a cartas (geologia, relevo, solos, vegetação e hidrografia) e a imagens de satélite (*Google Earth*). Com a finalidade de averiguação em campo (*ground-truthing*), foram realizadas quatro campanhas na bacia semiárida: duas na estação chuvosa (abril de 2011 e março de 2012); e duas na seca (outubro de 2012 e novembro de 2013). Também foram conduzidas quatro campanhas na bacia úmida: duas na estação chuvosa (julho de 2012 e junho de 2014); e duas na seca (novembro de 2011 e março de 2013). Nas campanhas, foram avaliados os padrões de uso do solo com base nas informações mapeadas e nas imagens de satélite, utilizando-se GPS para averiguação mais precisa da localização dos pontos avaliados *in situ*.

Os dados climatológicos referentes à bacia semiárida foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2013), enquanto que os dados de vazão afluente ao reservatório Marengo foram obtidos indiretamente, pelo modelo WASA (GÜNTNER & BRONSTERT, 2004; GÜNTNER *et al.*, 2004), calibrado com base no monitoramento realizado de 2012 a 2013 (LOPES, 2013). Os dados climatológicos da bacia úmida foram oriundos de Cuba (2000), enquanto que as vazões afluentes ao reservatório La Juventud foram estimadas a partir de monitoramento da estação hidrométrica Las Gavilanes (1962–2011), localizada a montante do reservatório (RODRÍGUEZ ROSA, 2013; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, 2014).

A partir das análises hidroclimatológicas, foi possível calcular o tempo de residência da água (T_w), definido como a razão entre a capacidade de armazenamento do reservatório e sua vazão afluente média. Como consequência, pode-se avaliar o tempo de residência do fósforo (T_p) em um reservatório (Equação 4) que, segundo Vollenweider (1976), é função do tempo de residência da água. O coeficiente de decaimento de fósforo (k_s , em ano⁻¹) pode ser calculado pela Equação 5 (TOLEDO JR. *et al.*, 1983). Outro parâmetro útil para a análise de eutrofização (STRASKRABA; TUNDISI, 2000) é a taxa de retenção de fósforo (PR) em um reservatório (Equação 6).

$$T_p = [(1/T_w) + K_s]^{-1} \quad (4)$$

$$K_s = (3/T_w)^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{PR} (\%) = 76, 1.[1 - \exp(-0,004.T_w)] \quad (6)$$

RESULTADOS

Estado trófico dos reservatórios

Os resultados de estado trófico mostraram marcante sazonalidade nos dois reservatórios, como apresentado na Tabela 2. O reservatório semiárido apresenta pH suavemente alcalino, próximo à neutralidade, situando-se dentro da faixa aceitável, que é de 6,0 a 9,0 (BRASIL, 2005). As águas do reservatório Marengo apresentam salinidade elevada, sendo a mesma superior no período seco, reflexo do elevado padrão de evaporação nesses meses. Apesar de elevada, a salinidade observada

Tabela 2 - Principais variáveis de análise comparativa entre as bacias tropicais Marengo (semiárida) e La Juventud (úmida).

Descrição	Bacia semiárida		Bacia úmida	
	Período seco	Período chuvoso	Período seco	Período chuvoso
pH	8,00	8,10	8,30	8,20
Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	622	394	335	276
Profundidade do disco de Secchi (m)	0,45	0,60	2,10	2,05
NO_3 (mg.L^{-1})	0,020	0,050	0,500	1,400
NO_2 (mg.L^{-1})	0,002	0,002	0,010	0,100
PO_4 (mg.L^{-1})	0,007	0,012	0,005	0,050
Índice de estado trófico (disco de Secchi)	62	59	40	41
Índice de estado trófico (PO_4)	42	51	39	72
Índice de estado trófico médio	49	54	39	62

nesse açude está em conformidade com o teor de sal medido em outras bacias da região semiárida do Brasil (PALÁCIO *et al.*, 2011). A transparência das águas do açude Marengo é bastante reduzida em ambas as estações, oscilando entre 40 e 60 cm, o que confere IET superior a 60 — o que, na interpretação de Toledo Jr. *et al.* (1983), corresponde a águas eutrofizadas. Os teores de nitrogênio medidos são reduzidos, bem abaixo do que a legislação brasileira permite (BRASIL, 2005). No caso de NO_2 , os valores permanecem semelhantes nas duas estações. Entretanto, observa-se significativo aumento de NO_3 no período chuvoso, resultado do escoamento causado pelos eventos de precipitação. A concentração de ortofosfato é mediana, de duas a três vezes inferior ao valor máximo permitido ($0,025 \text{ mg.L}^{-1}$), segundo a legislação nacional. Porém, observa-se aporte considerável de PO_4 na estação chuvosa (VON SPERLING; FERREIRA; GOMES, 2008), como ocorre com NO_3 . Isso confere — utilizando-se o critério de IET do ortofosfato — estado mesotrófico (51) às águas do açude na estação chuvosa, enquanto que, na estação seca, o mesmo encontra-se no estado limítrofe entre oligotrófico e mesotrófico (42).

O reservatório La Juventud, que controla a bacia úmida, apresenta pH praticamente constante ao longo do ano, levemente alcalino, com valores entre 8,0 e 8,5. As águas do reservatório têm salinidade elevada, embora apenas cerca de metade daquela medida no açude brasileiro. Verifica-se também que a salinidade aumenta 20% na estação seca em relação à úmida, enquanto que, em Marengo, essa cifra é de 60%. Tal diferença se explica porque, apesar da elevada taxa de evaporação no açude La Juventud, seu déficit atmosférico (evaporação menos precipitação) na estação de estio é de 530 mm, apenas 40% daquele medido no açude Marengo. A transparência média das águas do açude La Juventud praticamente não se altera com a mudança de estações. Entretanto, no início do período de estio, foram medidas as menores profundidades do SD, apresentando 170 cm. A elevada transparência das águas do açude La Juventud (profundidade anual média do SD superior a 2 m) confere IET inferior a 40, indicando águas oligotróficas, segundo esse critério. Os teores de nitrogênio nesse reservatório, superiores aos verificados no brasileiro, variam em até dez vezes quando se comparam as concentrações da estação chuvosa e de estio. Esse fato indica que o aporte de nitrogênio no período chuvoso é bem mais significativo que o observado no reservatório semiárido — no qual a razão entre concentrações nas diferentes estações é inferior a três. Assim como ocorre com o nitrogênio, a concentração de ortofosfato também se eleva bruscamente na estação de chuvas ($50 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$) em relação à seca ($5 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$). O efeito do aporte de ortofosfato é de tal modo acentuado que o IET médio aumenta de 39 (oligotrófico) para 62 (eutrófico) com a mudança de estação. Apesar do elevado aporte de nutrientes na estação chuvosa, o reservatório úmido renova suas águas através do vertimento, evento frequente dado seu reduzido tempo de residência. Tal efeito resulta em baixa resiliência dos nutrientes, de

modo que o IET (PO_4) do açude La Juventud reduz-se de 72 (estado limítrofe entre eutrófico e hipereutrófico), na estação chuvosa, para 39 (oligotrófico), na estação de estio.

Uso do solo

Ante o visto *in loco* durante as campanhas, pode-se depreender que há muita similaridade de uso do solo entre as bacias em estudo, que se situam na faixa tropical de regiões em desenvolvimento. A bacia semiárida tem população de 1.650 habitantes, distribuídos em 12 agrovilas, das quais a maior tem população de 250 habitantes, ou 15% do total. As áreas urbanizadas compreendem cerca de 8% da área total, nas quais os serviços de abastecimento de água atendem a 40%, enquanto os serviços de esgoto atendem somente a 15% da população. As estradas rurais são, em sua quase totalidade, não pavimentadas, o que potencializa a produção e o transporte de sedimento (MINELLA; MERTEN; CLARKE, 2009; NAVARRO-HEVIA; de ARAÚJO; MANSO, 2014), o que, muitas vezes, traz constituintes poluidores consigo. A área destinada às agrovilas, às estradas e aos reservatórios soma 15% da bacia. Observe-se que há 23 microreservatórios (capacidade inferior a $0,1 \text{ hm}^3$) e um pequeno (capacidade de $2,5 \text{ hm}^3$) a montante do açude Marengo, o que acentua a já elevada variabilidade de afluência hídrica (PETER *et al.*, 2014). Esses reservatórios se prestam, principalmente, para pecuária e pesca (FEITOSA, 2011). A área usada para agricultura e pecuária corresponde a pouco mais de um terço da superfície da bacia. Como a bacia se encontra em um assentamento de reforma agrária, a área explorada para agricultura por família é pequena, da ordem de 1,5 ha. As culturas que mais se produzem na área são milho, feijão, mandioca, arroz e frutas — principalmente, banana. Há também uma grande área de pasto, já que a pecuária é uma atividade econômica de elevada relevância para seus habitantes. Cerca de metade da área da bacia, no entanto, está ocupada pela Caatinga. Como os solos da bacia são pouco produtivos e o clima é muitas vezes inóspito, a produtividade média na região é baixa quando comparada a outras regiões tropicais, resultando na necessidade de frequente revezamento de área de produção. Assim, após alguns anos de uso agropastoril, a terra tem que ser deixada em pousio para que a fertilidade do solo possa ser recuperada, o que justifica a tão elevada fração da terra sem exploração (ALMEIDA; OLIVEIRA; de ARAÚJO, 2012). É também relevante acentuar que as áreas associadas a grandes declividades têm sido mantidas preservadas na bacia, explotando-se principalmente as terras mais planas. Embora na bacia os atuais usos do solo sejam pouco impactantes, na área contígua ao reservatório há graves problemas. Verifica-se a presença de vazantes e de gado dentro da bacia hidráulica dos açudes. Com isso, intensifica-se o aporte de matéria orgânica, nutrientes (fertilizantes usados nas culturas de vazante e material fecal do gado) e patógenos aos reservatórios, principalmente nas primeiras enxurradas.

A bacia tropical úmida tem população de 9.500 habitantes, o que perfaz uma densidade demográfica 82% superior àquela observada na bacia semiárida. Além da presença de agrovilas e de população rural difusa, há dois núcleos urbanos importantes, as vilas de San Diego (na qual há um balneário de águas termais com elevado potencial turístico) e de San Andrés, que somam mais da metade da população da bacia. Os serviços de saneamento são superiores aos da bacia semiárida, com abastecimento universal de água e atendimento adequado de 60% em termos de esgotos. As estradas são praticamente todas pavimentadas. Um quarto da área da bacia é usada em núcleos urbanos, estradas e áreas inundadas. A montante do reservatório La Juventud há três pequenos reservatórios, que acumulam juntos 0,56 hm³, pouco alterando o regime hidrológico da bacia. Cerca de 40% da área é usada para agricultura e pecuária, uma fração pouco superior à observada na bacia semiárida. A área explorada para agricultura por família também é pequena, da ordem de 1,0 ha. O que mais se produz na área são milho, cana-de-açúcar, arroz, batata, feijão, mandioca, banana e café, assim como pasto. A jusante do reservatório, os principais usos são o cultivo de arroz e a piscicultura, por meio de tanques de produção de alevinos para peixamento do próprio açude. Pouco mais que um terço da área da bacia está ocupada pela vegetação natural. Observa-se a presença de matas ciliares hidrorreguladoras em grandes extensões dos rios, estando seu estado de preservação particularmente elevado nos trechos de nascente. Assim como ocorre na bacia semiárida, as áreas montanhosas e com grandes declividades têm sido mantidas preservadas na bacia úmida, estando as áreas planas destinadas à produção. A prática de vazantes, assim como o acesso do gado às águas dos reservatórios, também ocorre na bacia tropical úmida (CUBA, 1973; 2000; 2004; RODRÍGUEZ ROSA, 2013; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, 2014). Em síntese, apesar da diferença de densidade populacional, o uso do solo nas duas bacias se assemelha no que tange à prevalência de pequenas propriedades rurais, às culturas e práticas agropastoris e à preservação da vegetação natural em áreas íngremes e montanhosas. Além disso, as bacias são semelhantes no uso permissivo da bacia hidráulica, com a presença de vazantes e de gado. O fator que mais distingue o uso do solo nas duas áreas de estudo é a prevalência de áreas urbanas na bacia cubana. Considerando que seu regime hidrológico é perene e que a lâmina escoada aí é seis vezes superior à da bacia semiárida, a existência de dois núcleos urbanos aumenta o aporte de constituintes ao reservatório, como se observou em relação ao nitrogênio e ao fósforo.

Aspectos hidrológicos

O açude Marengo, cuja capacidade é de 15,3 hm³, recebe em média 7 hm³ anualmente, indicando longo tempo de residência da água (STRASKRABA, 1999), de 2,16 anos (Tabela 1). O tempo de residência de fósforo é pouco superior a sete meses (0,60 anos), valor elevado, fruto

do longo tempo de residência da água. De modo análogo, a retenção de fósforo (0,73) é também alta, o que indica maior vulnerabilidade do lago à eutrofização. As chuvas ocorridas de 2012 a 2014 foram 25% abaixo da média, gerando aporte médio de 3 hm³.ano⁻¹ no triênio. Apesar de ter iniciado o triênio com capacidade de acumulação superior a 80% de seu potencial, o reservatório encontrava-se, no final da estação seca de 2013–2014, com apenas 15% de sua capacidade.

O reservatório La Juventud tem capacidade superior a 100 hm³ e aporte médio de 141 hm³ anuais, gerando tempo de residência moderado (STRASKRABA, 1999) de nove meses (Tabela 1). A lâmina afluente ao reservatório La Juventud é mais de seis vezes superior à que aflui ao reservatório Marengo. Além disso, como o coeficiente de variação da vazão afluente anual em La Juventud é baixo (0,42 *versus* 0,95 na bacia semiárida), a frequência de extravasamento é bastante elevada. Esses fatores induzem a uma elevada dinâmica de renovação das águas do reservatório tropical úmido, o que reduz sua vulnerabilidade à poluição e, em particular, à eutrofização. Assim como ocorreu com o reservatório semiárido, o úmido também começou o triênio 2012–2014 com mais de 80% de sua capacidade, chegando a apenas 20% de estocagem de água após o período seco de 2013–2014. Tal coincidência favorece a robustez da comparação aqui realizada, pois permitiu avaliar a qualidade da água nos dois lagos em semelhantes condições de armazenamento.

DISCUSSÃO

Estado trófico dos reservatórios

A razão entre nitrogênio total e fósforo total da água (N:P) tem sido longamente utilizada para discriminar a limitação do fitoplâncton por nutriente. Os limiares da razão N:P têm variações na literatura (WANG *et al.*, 2008), sendo a razão 16:1, apresentada por Redfield (1958), comumente adotada como referência. Segundo Klausmeier *et al.* (2004), essa não é uma razão ótima universal, mas uma média das proporções específicas entre as espécies, de modo que a razão ótima N:P varia entre 8,2 e 45,0. Em relação à eutrofização, a razão N:P é indicador relevante, pois influencia diretamente as espécies fitoplanctônicas que se sobressaem no ambiente aquático. Smith *et al.* (1995) concluíram que a razão N:P de 22:1 representa o limite entre lagos dominados por cianobactérias (N:P<22:1) e aqueles com baixa ocorrência destas algas (N:P>22:1). Havens *et al.* (2003) relataram que altas densidades de cianobactérias produzem problemas no sabor e odor das águas de beber, danificam a estética e matam a biota aquática devido às condições associadas com sua senescência (por exemplo, a baixa concentração de oxigênio dissolvido – OD – e alta concentração de amônia) e/ou produção de toxina.

Da Silva (2014) avaliou, no reservatório Marengo, relação média N:P de 30:1, a qual situa-se dentro da faixa ótima (8,2:1 a 45:1) estimada

por Klausmeier *et al.* (2004). Segundo o critério de Smith *et al.* (1995), tal razão indica baixa ocorrência de cianobactérias, o que está de acordo com a classificação geral do açude como mesotrófico (IET médio anual 52). Entretanto, verificou-se elevada variação sazonal da razão N:P no reservatório semiárido, chegando a 13:1 (da SILVA, 2014). Conforme Smith *et al.* (1995), tal ambiente deve ser dominado por cianobactérias, corroborando os resultados que indicam lago eutrofizado (IET=54) na estação úmida (Tabela 2). Averhoff (2012) conduziu estudo em reservatórios do ocidente cubano, onde também se encontra o açude La Juventud, cuja razão média N:P foi de 12:1, variando de 5:1 a 28:1. Esses valores apresentam-se dentro do intervalo ótimo para desenvolvimento do fitoplâncton, conforme Klausmeier *et al.* (2004). Contudo, o valor médio de N:P obtido por Averhoff (2012) indica dominância de algas cianofíceas no lago, o que não é confirmado por inspeção *in loco*. Em nenhuma das visitas realizadas no âmbito desta pesquisa o reservatório La Juventud apresentou sinais de florações de cianofíceas ou odores típicos, como mencionado por Havens *et al.* (2003). Tampouco, há qualquer registro de floração dessas algas pelos gestores locais.

De acordo com os resultados (Tabela 2), na estação seca, o fitoplâncton pode ter sido a causa principal da turbidez no reservatório Marengo, fazendo com que o IET (SD) indicasse nível eutrófico. Fortalecendo essa hipótese, Esteves e Suzuki (2011) relataram que, em reservatórios tropicais, as maiores densidades e biomassas fitoplanctônicas são observadas no período seco. Este fato é agravado pelo longo tempo de residência da água (BURFORD *et al.*, 2007; JONES & ELLIOTT, 2007; WANG; LIU; ZHENG, 2013). O reservatório úmido, em contraste, enquadrou-se o ano inteiro no nível oligotrófico — IET (SD) — devido, provavelmente, à influência da hidrologia local, que favorece o extravasamento frequente e, portanto, a descarga de fitoplâncton.

Uso do solo

As bacias dos reservatórios Marengo e La Juventud apresentam fortes similitudes no que diz respeito ao seu uso do solo, exceto pelos núcleos urbanos existentes na área cubana. Considerando-se o uso do solo na bacia semiárida, os nutrientes identificados no presente estudo provêm de resíduos de fertilizantes das vazantes e de excrementos de gado, oriundos de sua bacia hidráulica, fato este também observado por Figueirêdo *et al.* (2007). O mesmo se verifica na bacia úmida. Entretanto, há aí aporte proveniente dos dois núcleos urbanos, o que pode indicar maior pressão antrópica na mesma.

Santos *et al.* (2014) relataram que no açude Orós (2.000 hm³), no semiárido brasileiro, algumas áreas apresentam-se eutrofizadas devido ao uso do solo sem aplicação de práticas conservacionistas. Lopes *et al.* (2014) apontaram como principais fatores responsáveis pela qualidade da água nesse reservatório o processo natural de intemperismo do solo, os carregamentos dos sólidos suspensos pelo escoamento superficial e

as ações humanas desenvolvidas em suas partes mais altas. Na bacia úmida, de acordo com Toledo e Zamora (2010), a principal fonte de nutrientes seria a deterioração do solo, devido à aplicação excessiva de fertilizantes químicos.

Aspectos hidrológicos

Os lagos semiáridos do Brasil apresentam elevado tempo de residência da água, geralmente maior que um ano (ESKINAZI-SANT'ANNA *et al.*, 2007). Organismos técnicos da região utilizam o tempo de residência de dois anos (denominado 'critério de Aguiar') para dimensionamento de seus reservatórios visando à otimização da disponibilidade hídrica local: reservatórios com menor tempo de residência tendem a não aproveitar adequadamente a água aportada; enquanto que reservatórios com maior tempo de residência tendem a ser superdimensionados (CAMPOS, 2010). A Figura 2 ilustra a correlação entre IET e tempo de residência da água em seis reservatórios com uso de solo semelhantes aos das bacias em estudo (Marengo, Taperoá, Soledade e Paus Brancos no semiárido brasileiro; e La Juventud e Jaruco em Cuba). De acordo com a regressão linear, reservatórios com tempo de residência (T_w) superior a 2,75 anos têm maior possibilidade de encontrarem-se eutrofizados (IET \geq 54). Esse critério aproxima-se bastante daquele estabelecido por Aguiar (CAMPOS, 2010), embora o mesmo tenha sido indicado visando somente o aspecto quantitativo da água. O critério de Aguiar (T_w igual a dois anos — linha tracejada vertical na Figura 2) explica o estado trófico de cinco dos seis reservatórios, indicando robustez também no que se refere à qualidade da água.

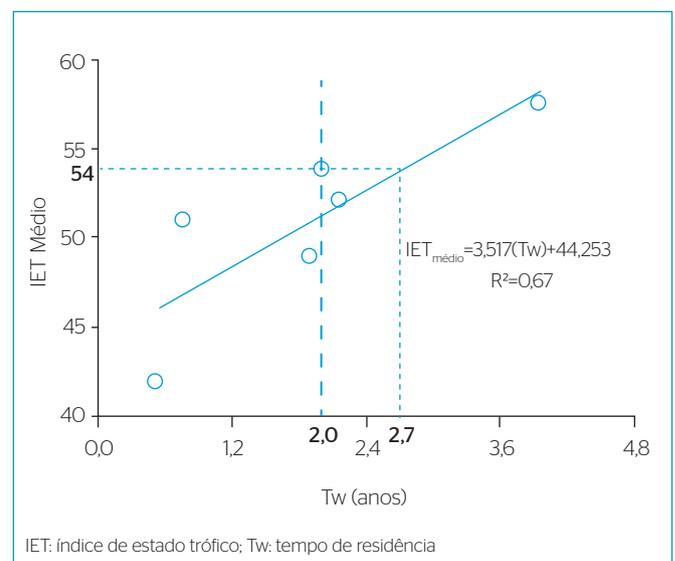


Figura 2 - Correlação entre índice de estado trófico e tempo de residência da água em seis reservatórios com uso de solo semelhantes para bacias semiáridas e úmidas.

O tempo de residência da água é fator relevante para a retenção de nutrientes em lagos (STRASKRABA, 1999; VERBURG *et al.*, 2013), de modo que corpos hídricos com maior tempo de residência da água retêm mais nutrientes (KÖIV; NÖGES; LAAS, 2011; WETZEL, 2001). No presente estudo, os reservatórios semiárido e úmido apresentaram retenção de fósforo de 73 e 50%, respectivamente (Tabela 2). Os resultados sugerem que o reservatório semiárido é potencialmente mais suscetível à eutrofização, haja vista apresentar maior tempo de residência da água e de fósforo. Em concordância, a Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2013) indica que os recursos hídricos do semiárido brasileiro são mais vulneráveis à eutrofização, em consequência dos maiores taxas de evaporação e baixos índices de tratamento de esgoto.

A razão pela qual os reservatórios tropicais semiáridos têm tempos de residência tão superiores aos tropicais úmidos reside, principalmente, em dois fatores. Embora a evaporação potencial em regiões tropicais úmidas e semiáridas seja semelhante e a precipitação de regiões úmidas seja somente o dobro daquelas observadas em regiões semiáridas, sabe-se que as vazões geradas em bacias úmidas superam aquelas geradas em bacias semiáridas em mais de dez vezes. Além disso, a taxa de evaporação excedente (evaporação menos precipitação direta) nos reservatórios semiáridos é quase cinco vezes superior àquela observada em reservatórios úmidos, o que reduz sua eficiência hidrológica, obrigando a construção de outros maiores para se obter oferta compatível com a demanda (de ARAÚJO & PIEDRA, 2009). Portanto, reservatórios semiáridos com elevada capacidade de armazenamento e baixa afluência apresentam elevado tempo de residência, sendo, então, mais vulneráveis à eutrofização do que aqueles localizados em bacias úmidas.

CONCLUSÕES

O presente estudo analisou o estado trófico de dois lagos tropicais (um semiárido e um úmido). Concluiu-se que, no período avaliado (2012–2014), o reservatório semiárido encontrava-se eutrófico, e o úmido, mesotrófico. Em ambas as bacias, o uso do solo é similar tanto nos aspectos positivos quanto nos negativos, exceto pelo fato de que, na bacia tropical úmida, há dois núcleos urbanos importantes. Apesar de ter semelhante uso de solo e mais aporte de nutrientes, a bacia tropical úmida está menos eutrofizada. Atribui-se a isso fatores hidrológicos (elevadas vazões afluentes e reduzidas perdas por evaporação), o que induz à frequente renovação da água (baixos tempos de residência da água e do fósforo), diminuindo a vulnerabilidade do lago à eutrofização. O máximo tempo de residência da água estimado para que reservatórios tropicais semiáridos não se tornem eutróficos (2,7 anos) aproxima-se do tempo ótimo, visando à disponibilidade hídrica (2,0 anos). Esse critério otimiza, portanto, aspectos quantitativos e qualitativos. Finalmente, por serem os reservatórios tropicais semiáridos bastante vulneráveis à eutrofização, a política do uso de solo de suas bacias deve ser mais restritiva quanto à produção de nutrientes.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor, que possibilitou dedicação exclusiva ao curso e à pesquisa desenvolvida, e ao Programa Capes MES/CUBA (Projeto 097/10) pela concessão de bolsas de estudo e trabalho no exterior a todos os autores.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.L.; OLIVEIRA, J.G.B.; de ARAÚJO, J.C. (2012) Impacto da recuperação de área degradada sobre as respostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 1, n. 1, p. 39-50.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. Washington, DC: APHA.
- AVERHOFF, O.R.L. (2012) *Limnología de embalses en las regiones central y occidental de Cuba*. Tese (Doutorado) - Habana.
- AZEVEDO, S.M.F.O.; CARMICHAEL, W.W.; JOCHIMSEN, E.M.; RINEHART, K.L.; LAU, S.; SHAW, G.R.; EAGLESHAM, G.K. (2002) Human intoxication by mycrocystins during renal dialysis treatment in Caruaru-Brasil. *Toxicology*, v. 181-182, p. 441-446.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. (2005) Resolução CONAMA n. 357. *Diário Oficial da União*, n. 53, p. 58-63.
- _____. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (2013) *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília, Distrito Federal. 432 f.
- BURFORD, M.A.; JOHNSON, S.A.; COOK, A.J.; PACKER, T.V.; TAYLOR, B.M.; TOWNSLEY, E.R. (2007) Correlations between watershed and reservoir characteristics, and algal blooms in subtropical reservoirs. *Water Research*, v. 41, n. 18, p. 4105-4114.
- CAMPOS, J.N.B. (2010) Modeling the yield-evaporation-spill in the reservoir storage process: the Regulation Triangle Diagram. *Water Resources Management*, v. 24, p. 3487-3511.
- CUBA. Grupo Hidráulico del DAP. (1973) *Memoria de Investigaciones Hidrometeorológicas de Embalses*: Memoria Técnica n. 3, Habana. 60 p.
- _____. INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS: DIRECCIÓN TÉCNICA - INRH. (2000) *Catálogo de Cuencas Hidrográficas Río San Diego Delegación Provincial De Recursos Hidráulicos*. Habana. 16 p.

_____. DIRECCIÓN PROVINCIAL DE PLANIFICACIÓN FÍSICA PINAR DEL RÍO – DPPF. *Diagnostico del Sistema de Asentamientos Humanos Cuencas Hidrográficas RíoHondo y San Diego*. Habana. 18 p.

Da SILVA, A.C.B. (2014) *Análise da qualidade da água e da comunidade íctia durante o período de estiagem no açude Marengo (Madalena, CE)*. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca e Recursos Pesqueiros, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

De ARAÚJO, J.C. & PIEDRA, J.I.G. (2009) Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. *Hydrological Processes*, v. 23, n. 8, p. 1169-1178.

ESKINAZI-SANT'ANNA, E.M.; MENEZES, R.; COSTA, I.S.; PANOSSO, R.F.; ARAÚJO, M.F.; ATTAYDE, J.L. (2007) Composição da comunidade zooplânctônica em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte. *Oecologia Brasiliensis*, v. 11, n. 3, p. 410-421.

ESTEVEZ, F.A. & SUZUKI, M.S. (2011) Comunidade fitoplanctônica. In: ESTEVES, F.A. *Fundamentos de Limnologia*. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência. capítulo 21, p. 375-445.

FEITOSA, L.S. (2011) *Aspectos Limnológicos da Pequena Açudagem no Semiárido*: Estudo de Caso dos Açudes do Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE. 130 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

FIGUEIRÉDO, M.C.B.; TEIXEIRA, A.S.; ARAÚJO, L.F.P.; ROSA, M.F.; PAULINO, W.D.; MOTA, S.; de ARAÚJO, J.C. (2007) Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 399-409.

GÜNTNER, A. & BRONSTERT, A. (2004) Representation of landscape and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, v. 297, n. 2-3, p. 136-161.

GÜNTNER, A.; KROL, M.S.; de ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A. (2004) Simple water balance modeling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. *Hydrological Science Journal*, v. 49, n. 5, p. 901-917.

HAVENS, K.E.; JAMES, R.T.; EAST, T.L.; SMITH, V.H. (2003) N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution*, v. 122, p. 379-390.

JONES, I.D. & ELLIOTT, J.A. (2007) Modelling the effects of changing retention time on abundance and composition of phytoplankton species in a small lake. *Freshwater Biology*, v. 52, p. 988-997.

KLAUSMEIER, C.A.; LITCHMAN, E.; DAUFRESNE, T.; LEVIN, S.A. (2004) Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*, v. 429, p. 171-174.

KÖIV, T.; NÖGES, T.; LAAS, A. (2011) Phosphorus retention as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative depth in 54 lakes and reservoirs. *Hydrobiology*, v. 660, p. 105-115.

LEE, J.H.; KIM, J.M.; KIM, D.S.; HUANG, S.J.; AN, K.G. (2010) Nutrients and chlorophyll-a dynamics in a temperate reservoir influenced by Asian monsoon along with in situ nutrient enrichment bioassays. *Limnology*, v. 11, p. 49-62.

LIMA NETO, I.E.; WIEGAND, M.C.; de ARAÚJO, J.C. (2011) Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. *Hydrological Sciences Journal*, v.56, n. 2, p. 319-333.

LOPES, F.B.; ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M.; BECKER, H.; BATISTA, A.A. (2014) Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 437-445.

LOPES, J.W.B. (2013) *Modelagem hidrossedimentológica em mesobacia do Semiárido*. 83 p. Dissertação – Mestrado (Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MAMEDE, G.L.; ARAÚJO, N.A.M.; SCHNEIDER, C.M.; de ARAÚJO, J.C.; HERMANN, H.J. (2012) Over spill avalanching in a dense reservoir network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 19, p. 7191-7195.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; CLARKE, R.T. (2009) Método "fingerprinting" para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 633-638.

MORAES, L.A.F. (2009) A visão integrada da ecologia para o manejo sustentável dos ecossistemas aquáticos. *Oecologia Brasiliensis*, v. 13, n. 4, p. 676-687.

NAVARRO-HEVIA, J.; de ARAÚJO, J.C.; MANSO, J.M. (2014) Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 39, n. 12, p. 1563-1575.

NYENJE, P.M.; FOPPEN, J.W.; UHLENBROOK, S.; KULABAKO, R.; MUWANGA, A. (2010) Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa-A review. *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 3, p. 447-455.

PALÁCIO, H.A.Q.; ARAÚJO NETO, J.R.; MEIRELES, A.C.M.; ANDRADE, E.M.; SANTOS, J.C.N.; CHAVES, L.C.G. (2011) Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 395-402.

PETER, S.; de ARAÚJO, J.C.; ARAÚJO, N.; HERRMANN, H.J. (2014) Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. *Journal of Hydrology*, v. 512, p. 408-420.

PINHEIRO, L.S.; COELHO, C.F.; de ARAÚJO, J.C. (2011) Proposta de modelo de saneamento rural para a região semiárida. In: II Convención Internacional de Geografía, Medioambiente y Ordenamiento Territorial. *Anais*..Havana. CD Rom.

REDFIELD, A.C. (1958) The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, v. 46, n. 3, p. 205-221.

RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, R. (2014) *Caracterización del escurrimiento en cuencas hidrográficas con observaciones hidrométricas del occidente de Cuba*. Trabajo de Diploma. Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Cuba. 90 p.

- RODRÍGUEZ ROSA, M. (2013) *Evaluación de las principales variables hidrológicas en la cuenca del río San Diego hasta el embalse La Juventud, Pinar del Río, Cuba*. Tese (Doutorado) - Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Havana, Cuba. 120 p.
- SANTOS, J.C.N.; ANDRADE, E.M.; ARAÚJO NETO, J.R.; MEIRELES, A.C.M.; PALÁCIO, H.A.Q. (2014) Land use and trophic state dynamics in a tropical semi-arid reservoir. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 45, n. 1, p. 35-44.
- SALAS, H.J. & MARTINO, P. (1991) A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, v. 25, n. 3, p. 341-350.
- SCHINDLER, D.W.; HECKY, R.E.; FINDLAY, D.L.; STAITON, M.P.; PARKER, B.R.; PETERSON, M.J.; BEATY, K.G.; LYNG, M.; KASIAN, S.E.M. (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-years whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 105, n. 32, p. 11254-11258.
- SMITH, V.H.; BIERMAN, V.J.; JONES, B.L.; HAVENS, K.E. (1995) Historical trends in the Lake Okeechobee ecosystem IV. Nitrogen: phosphorus ratios, cyanobacterial dominance, and nitrogen fixation potential. *Archiv für Hydrobiologie*, v. 107, p. 71-88.
- SMITH, V.H.; JOYE, S.B.; HOWARTH, R.W. (2006) Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, v. 51, p. 351-355.
- SMITH, V.H. & SCHINDLER, D.W. (2009) Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207.
- SOARES, M.C.S.; MARINHOB, M.M.; AZEVEDO, S.M.O.F.; BRANCO, C.W.C.; HUSZAR, V.L.M. (2012) Eutrophication and retention time affecting spatial heterogeneity in a tropical reservoir. *Limnologica*, v. 42, n. 3, p. 197-203.
- STRASKRABA, M. (1999) Retention time as a key variable of reservoir limnology. In: TUNDISI, T.G.; STRASKRABA, M. (Eds.). *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*. International Institute of Ecology. Brazilian Academy and Backhuys Publishers, São Carlos, Brazil. p. 385-410.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G. (Ed.). (2000) *Gerenciamento da qualidade da água de represas*. São Carlos: ILEC/IIIE. Diretrizes para o Gerenciamento de Lagos, v. 9, 258 p.
- TOLEDO, L.R. & ZAMORA, Y.R. (2010) Diagnóstico de la situación de recursos naturales em la cuenca superior del río San Diego. *Ciência, Tecnología y Medio Ambiente*, v. 12, n. 2.
- 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 reservatório tropicais. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. *Anais ... Camboriú*. p.1-34.
- VAN VLIET, M.T.H.; ZWOLSMAN, J.J.G. (2008) Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse River. *Journal of Hydrology*, v. 353, p. 1-17.
- VERBURG, P.; HORROX, J.; CHANEY, E.; RUTHERFORD, J.C.; QUINN, J.M.; WILCOCK, R.J.; HOWARD-WILLIAMS, C.W. (2013) Nutrient ratios, differential retention, and the effect on nutrient limitation in a deep oligotrophic lake. *Hydrobiologia*, v. 718, p. 119-130.
- VIANA, R.B.; CAVALCANTE, R.M.; BRAGA, F.M.G.; VIANA, A.B.; ARAÚJO, J.C.; NASCIMENTO, R.F.; PIMENTEL, A.S. (2009) Risk assessment of trihalomethanes from tap water in Fortaleza, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 151, p. 317-325.
- VOLLENWEIDER, R.A. (1976) Advances on defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, v. 33, p. 53-83.
- VON SPERLING, E.; FERREIRA, A.C.S.; GOMES, L.M.L. (2008) Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. *Desalination*, v. 226, n. 1-3, p. 169-174.
- WANG, H.; LIANG, X.; JIANG, P.; WANG, J.; WU, S.; WANG, H. (2008) TN:TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes. *Freshwater Biology*, v. 53, p. 935-944.
- WANG, H. & WANG, H. (2009) Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement. *Progress in Natural Science*, v. 19, p. 1445-1451.
- WANG, L.; LIU, L.; ZHENG, B. (2013) Eutrophication development and its key regulating factors in a water-supply reservoir in North China. *Journal of Environmental Sciences*, v. 25, n. 5, p. 962-970.
- WETZEL, R.G. (2001) *Limnology: lake and river ecosystems*. 3 ed. San Diego, California: Academic Press/Elsevier. 1006 p.
- XU, Y.; CAI, Q.; HAN, X.; SHAO, M.; LIU, R. (2010) Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China. *Environmental Monitoring*, v. 169, p. 237-248.