

Uso de indicadores para avaliação de usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas com múltiplos aproveitamentos

Antônio D. Benetti
Carlos E. M. Tucci

RESUMO: Este artigo apresenta uma metodologia que foi utilizada para fazer-se uma avaliação preliminar de usinas hidrelétricas em uma bacia hidrográfica com múltiplos aproveitamentos. A metodologia baseia-se no uso de cinco indicadores que requerem informações relativamente fáceis de se obter. Os indicadores utilizados foram: (a) tendência de estratificação térmica, (b) cargas de poluentes contribuintes aos reservatórios, (c) cargas de poluentes por unidade de volume de reservatório, (d) cargas admissíveis de nutrientes e (e) relação entre potência gerada e potencial de eutrofização. O método foi aplicado a 30 reservatórios de usinas hidrelétricas de pequeno e médio porte planejadas para a bacia hidrográfica dos rios Taquari-Antas, Brasil. O método pode ser utilizado na fase de inventário, precedendo uma avaliação integrada de toda a bacia através da simulação hidrológica.

PALAVRAS-CHAVE: Indicadores ambientais, potencial de eutrofização, usinas hidrelétricas

ABSTRACT: This paper presents a methodology that was used to make a preliminary assessment of multiple hydroelectric power plants planned to be built in a basin. The methodology uses five indicators that require data that are relatively easily to acquire. The indicators are: (a) thermal stratification, (b) pollutant loading to reservoirs, (c) pollutant loading per unit volume of reservoir, (d) nutrient allowable loadings, and (e) rate between power and eutrophication potential. The methodology was applied to 30 reservoirs of small and medium size hydroelectric power plants that are being planned for the Taquari-Antas river basin, Brazil. The methodology can be applied at the inventory phase, preceding the basin integrated assessment through hydrologic simulation.

KEY-WORDS: Environmental indexes, eutrophication potential, hydroelectric power plants

INTRODUÇÃO

A construção de barragens para o manejo da disponibilidade de água tem sido uma prática adotada desde o início da civilização humana. Atualmente, existem no mundo 45.000 barragens de grande porte e mais de 800.000 classificadas como pequeno porte (Gleick, 1998).

A crescente preocupação com os impactos decorrentes da implantação de barragens levou ao estabelecimento da Comissão Mundial de Barragens, um fórum formado por 68 membros representativos de instituições com interesses e pontos de vista diversos. Publicado no ano 2000, o relatório da comissão reconhece que os benefícios e contribuições das barragens ao desenvolvimento humano têm sido significativos. Contudo, o relatório concluiu que, em um grande número de casos, o preço pago por estes benefícios foi inaceitável em termos sociais e ambientais (World Commission on Dams, 2000).

Em muitos rios, planeja-se a construção de uma série de usinas hidrelétricas e há necessidade de fazer-se uma avaliação expedita dos aproveitamentos que são mais (ou menos) favoráveis do ponto de vista do impacto na qualidade da água. No Brasil, a Eletrobrás desenvolveu um manual onde são apresentadas as etapas para avaliação ambiental de sistemas hidrelétricos dentro dos diferentes estágios de cada empreendimento (Eletrobrás, 1986). A etapa de inventário envolve a visualização do conjunto dos empreendimentos dentro da bacia. Tucci (1998a) destacou os modelos utilizados nas diferentes fases, ressaltando a necessidade de utilizarem-se técnicas simplificadas para se obter, na etapa inicial de avaliação dos empreendimentos, uma visão do conjunto da qualidade da água.

Este trabalho apresenta um estudo de caso onde foram utilizados cinco indicadores para se avaliar, preliminarmente, os aproveitamentos hidrelétricos mais e menos favoráveis que estão sendo planejados

para a bacia hidrográfica dos rios Taquari-Antas, localizada no sul do Brasil.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho baseou-se na aplicação de cinco indicadores à base de dados existentes na bacia, conforme descrito a seguir.

Indicador 1: estratificação térmica

O Número de Froude Densimétrico (F_d) foi utilizado como parâmetro de avaliação da tendência de estratificação térmica em reservatórios, como sugerido por Tucci (1998b). Sua expressão deriva-se da força de inércia que atua sobre o fluxo de água que atravessa o reservatório e a força gravitacional que tende a manter as camadas de água separadas por suas densidades (equação 1).

$$Fd = \frac{L \cdot Q}{H \cdot V} \left[\frac{\rho_0}{g \cdot \left(\frac{d\rho}{dz} \right)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde L = comprimento do reservatório, [m]; Q = vazão, [m³/s]; H = profundidade, [m]; V = volume, [10⁶ m³]; ρ_0 = densidade da água, [kg/m³]; g = aceleração da gravidade, [9,81 m/s²]; $\frac{d\rho}{dz}$ = gradiente médio de densidade, [kg/m³.m]. Admitindo-se $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $d\rho/dz = 984,3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m}$ (Tucci, 1998b), e substituindo-se na equação 1, obtêm-se:

$$Fd = 0,322 \cdot \frac{L \cdot Q}{H \cdot V} \quad (2)$$

A tendência à estratificação foi classificada como forte (F_d menor ou igual a 0,1), média (F_d maior que 0,1 e menor que 0,3) e fraca (F_d maior ou igual a 0,3 e menor que 1,0). Valores de F_d maiores que 1,0 indicam regime misturado.

Indicador 2: carga poluidora contribuinte ao reservatório (fontes difusas e pontuais)

Este indicador representa as cargas de poluentes que contribuem aos reservatórios das usinas hidrelétricas. As cargas estimadas representam a matéria orgânica biodegradável (DBO), os nutrientes (nitrogênio e fósforo) e os microorganismos (coliformes

fecais). Foram consideradas as contribuições de populações urbanas e rurais, pecuária de grande e pequeno porte, indústrias, drenagem urbana e rural, resíduos sólidos, irrigação, águas subterrâneas e precipitação atmosférica.

Indicador 3: carga poluidora por unidade de volume de reservatório

Este indicador resulta da razão entre carga contribuinte por unidade de tempo e volume do reservatório (equação 3).

$$L_v = \frac{L}{V} \cdot 10^6 \quad (3)$$

sendo: L_v = carga poluidora por unidade de tempo e volume do reservatório [g/m³.ano]; L = carga poluidora afluente ao reservatório [ton/ano]; V = volume do reservatório [m³]; 10⁶ = fator de conversão de tonelada para grama. O valor de L na equação 3 é dado pelo indicador 2.

Indicador 4: cargas admissíveis e perigosas de nitrogênio e fósforo

Vollenweider (citado por Schnoor, 1996) estudou dados de cerca de 100 lagos situados em regiões de clima temperado e estabeleceu relações entre taxas de aplicação superficiais de nutrientes, profundidades e estados tróficos dos lagos. A partir da análise destas informações, Vollenweider estabeleceu taxas de aplicação superficiais admissíveis e perigosas para nitrogênio e fósforo (equações 4 e 5).

$$\text{TAS (adm)} = \frac{L_{N,P}(\text{adm})}{A} \cdot 10^6 \quad (4)$$

$$\text{TAS (prg)} = \frac{L_{N,P}(\text{prg})}{A} \cdot 10^6 \quad (5)$$

sendo: TAS = taxa de aplicação superficial admissível (adm) ou perigosa (prg) de nitrogênio ou fósforo [g/m².ano]; $L_{N,P}$ = carga admissível ou perigosa de nitrogênio ou fósforo, afluente ao reservatório [ton/ano]; A = área superficial do reservatório [m²]; 10⁶ = fator de conversão de tonelada para grama.

Os valores estabelecidos por Vollenweider para as taxas de aplicação superficiais são apresentados na tabela 1. Observa-se que seus valores dependem da profundidade do lago.

TABELA 1
Taxas de aplicação dos nutrientes N e P em lagos
(Vollenweider apud Schnoor, 1996)

Profundidade Média (m)	Taxa de Aplicação Admissível (g/m ² ·ano)		Taxa de Aplicação Perigosa (g/m ² ·ano)	
	Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo
5	1,0	0,07	2,0	0,13
10	1,5	0,10	3,0	0,20
50	4,0	0,25	8,0	0,50
100	6,0	0,40	12,0	0,80
150	7,5	0,50	15,0	1,00
200	9,0	0,60	18,0	1,20

As taxas de aplicação admissíveis manteriam os lagos em estado oligotrófico enquanto que as taxas de aplicação perigosas têm o potencial de conduzirem os lagos ao estado eutrófico. Os estudos de Vollenweider basearam-se em regimes de vazão permanente com reservatório misturado. Mesmo com esta limitação, as taxas de aplicação de Vollenweider têm sido usadas por muitos países para classificar o estado trófico de lagos.

As cargas admissíveis e perigosas de nitrogênio e fósforo para cada reservatório estudado foram calculadas através do produto entre as respectivas taxas de aplicação (selecionadas da tabela 1 em função da profundidade média do reservatório) e a área superficial do reservatório.

Indicador 5: relação entre potência gerada e potencial de eutrofização

Este indicador associa potência gerada pela usina hidrelétrica e uma medida de impacto ambiental, o potencial de eutrofização. Este potencial foi definido como a razão entre as cargas de fósforo contribuinte e admissível ao reservatório (Equação 6).

$$PE = \frac{L_p}{L_p(adm)} \quad (6)$$

sendo: PE = potencial de eutrofização [-]; L_p = carga afluente de fósforo ao reservatório [ton/ano]; $L_p(adm)$ = carga admissível afluente ao reservatório [ton/ano]

Valores de PE menores ou iguais a 1 indicam que o reservatório manterá condições oligotróficas

de acordo com o critério de Vollenweider. Acima de 1, quanto maior a razão, mais desfavorável serão as condições do reservatório em relação a eutrofização. Fósforo foi escolhido como variável da equação 6, em vez de nitrogênio, porque sabe-se que algumas cianobactérias possuem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico (Allan, 1995); neste caso, fósforo é o nutriente que limita o desenvolvimento de florações.

O indicador 5, representado pela equação 7, é análogo a razão entre benefício e custo, variável utilizada em análise econômica para avaliação de projetos alternativos. Neste caso, o “benefício” e o “custo” seriam, respectivamente, a quantidade de potência gerada pela UHE e o potencial de eutrofização.

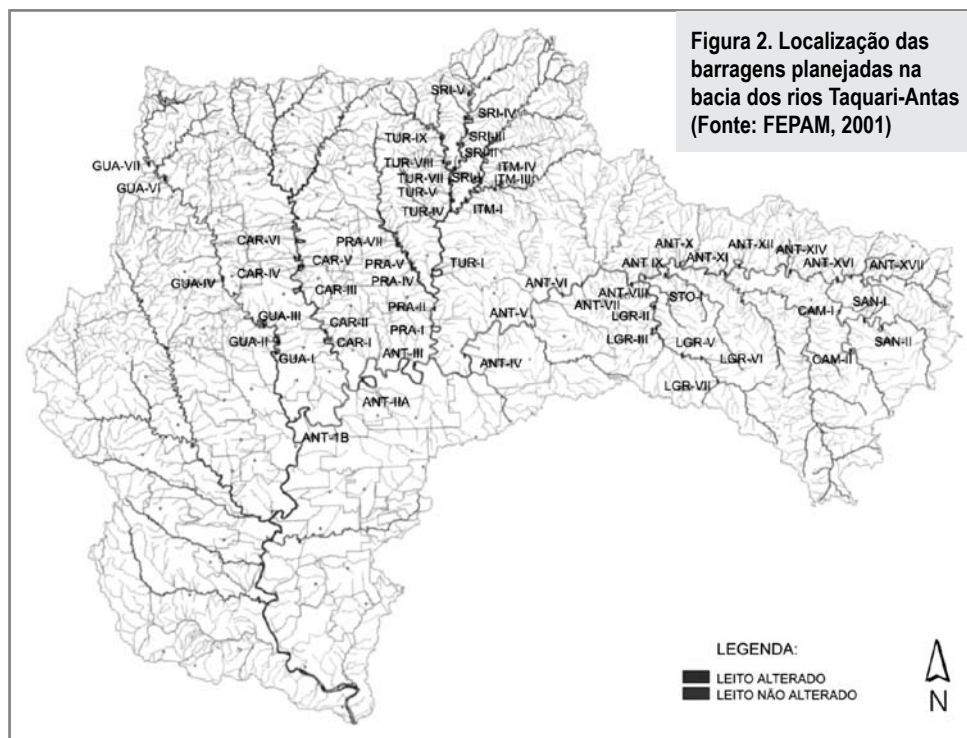
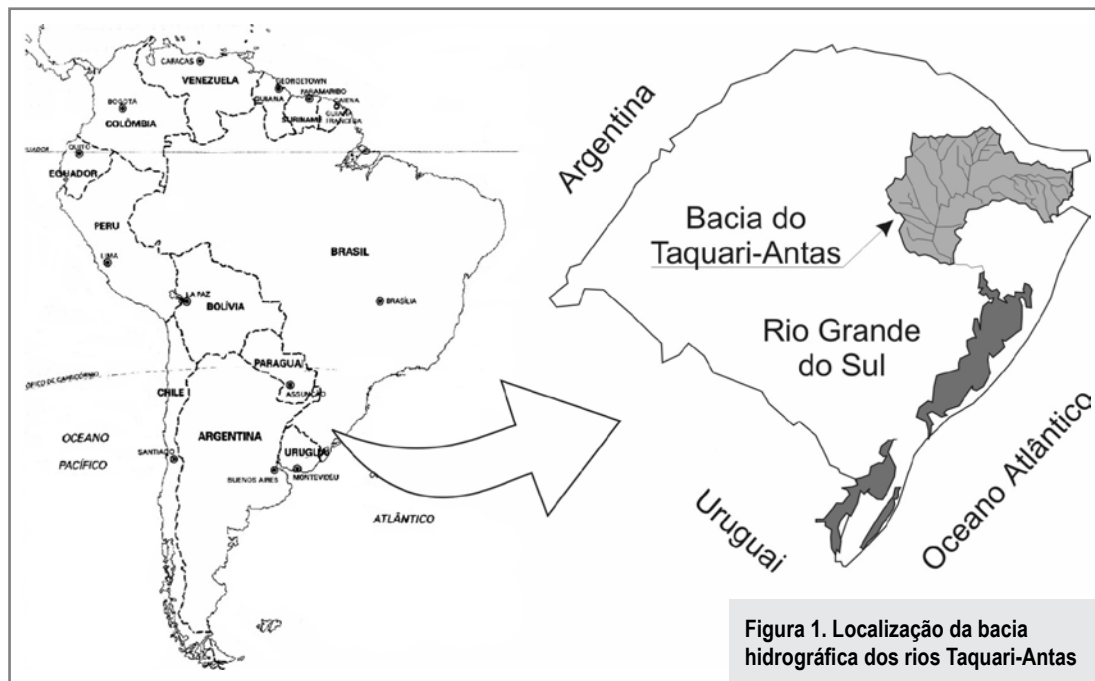
$$I_5 = \frac{Pot}{PE} \quad (7)$$

sendo: Pot = potência gerada [MW]; PE = potencial de eutrofização

De acordo com este indicador, um aproveitamento que possui maior potência e menor potencial de eutrofização é mais favorável que outro aproveitamento que apresente menor potência e maior potencial de eutrofização.

Os indicadores 1 a 5 foram aplicados à 30 reservatórios planejados para a bacia hidrográfica dos rios Taquari-Antas, localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Esta bacia possui uma área de 26.428 km², sendo um dos cinco rios afluentes ao Lago Guaíba (Figura 1). A extensão total do rio, das nascentes à foz, é de 540 km. A vazão média anual é de 321 m³/s, com vazões máxima e mínima de, respectivamente, 10.300 m³/s e 10 m³/s (FEPAM, 1999). Os principais afluentes do Taquari-Antas são os rios Turvo, Carreiro e Guaporé, localizados em sua margem direita.

Atualmente, a potência instalada de energia elétrica na bacia é de 5,3 MW, valor bastante inferior ao potencial existente. Em 1993, a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) elaborou o inventário hidrelétrico da bacia hidrográfica, resultando na recomendação para a construção de 56 barragens com potências instaladas entre 1,2 MW e 130 MW, totalizando 1097,2 MW (CEEE, 1993). Trinta e três dos aproveitamentos possuem capacidade prevista inferior a 10 MW, planejando-se a construção de quatro barragens com capacidade igual ou superior a 100 MW. A figura 2 mostra a localização das barragens projetadas, assim como as extensões dos rios



que deverão sofrer alterações em seus leitos devido aos reservatórios (FEPAM, 2001). A tabela 2 apresenta a relação das usinas projetadas e respectivas siglas, a potência gerada e o nome dos rios onde serão construídas.

TABELA 2
Usinas hidrelétricas na bacia dos rios Taquari-Antas avaliadas neste estudo

Rio	Sigla	Nome	Potência (MW)	
Antas	ANT-1b	Muçum	112,0	
	ANT-2a	14 de Julho	98,0	
	ANT-3'	Monte Claro	130,0	
	ANT-IV'	Castro Alves	120,0	
	ANT-V	São Marcos	57,0	
	ANT-VI	São Bernardo	16,0	
	ANT-VII	São Manoel	51,0	
	ANT-VIII	São José	17,5	
	ANT-IX	Espigão Preto	34,0	
	ANT-X	Serra dos Cavalinhos	45,0	
	ANT-XI	Passo do Meio	30,0	
	ANT-XIIa	Pezzi	15,6	
	ANT-XIV	Quebrada Funda	12,0	
	ANT-XVI'	Matemático	3,0	
	ANT-XVII'	Piraquete	1,9	
	Guaporé	GUA-I'	Paraíso	19,5
		GUA-II	Monte Cucco	19,7
GUA-III		Monte Bérico	13,9	
GUA-IV		Pulador	6,3	
GUA-VI		Arranca Toco	1,6	
GUA-VII		Nova Esperança	1,9	
Carreiro		CAR-I	Cotiporã	12,7
	CAR-II	Linha Emília	14,3	
	CAR-III	Autódromo	12,0	
	CAR-IV	São Paulo	8,4	
	CAR-V	Boa Fé	9,3	
	CAR-VI	Caçador	15,6	
Prata	PRA-I	Jararaca	41,0	
	PRA-II	Ilha	36,0	
Turvo	TUR-I'	Primavera	36,0	

RESULTADOS

Tendência à estratificação térmica (indicador 1)

A maioria dos reservatórios planejados para a bacia apresenta Números de Froude Densimétricos que caracterizam regime misturado ou com fraca estratificação. Dos 30 reservatórios avaliados, somente o da

UHE Primavera no rio Turvo apresenta potencial de estratificação forte. Outros três reservatórios possuem potencial de estratificação médio. A tabela 3 mostra os reservatórios de condições mais desfavoráveis com relação à estratificação.

TABELA 3
Reservatórios com condições mais desfavoráveis em relação a estratificação térmica, considerando vazões médias

Classificação	Rio	Nome UHE	Fd	Situação de estratificação
1	Turvo	Primavera	0,1	forte
2	Antas	Castro Alves	0,2	médio
	Antas	Quebrada Funda	0,2	médio
	Carreiro	Caçador	0,2	médio
5	Antas	Pezzi	0,3	médio/fraco

Os valores de Fd foram calculados para a situação de vazões médias. Para condições de estiagem, a diminuição do valor de Q na equação 2 tenderá a resultar na diminuição do Número de Froude Densimétrico. Isto foi verificado em estudo realizado pela CEEE (1993). Neste caso, foram utilizadas as vazões de 85% das curvas de permanência de vazões para representar condições de estiagem em 24 reservatórios representativos de um total de 82 que estavam sendo considerados para a bacia. Resultaram 01, 15 e 08 reservatórios com potencial de estratificação fraco, médio e forte, respectivamente. De uma maneira geral, o Rio Grande do Sul, estado onde estão planejadas as hidrelétricas, apresenta características climáticas favoráveis à estratificação sazonal, com vazões de estiagem nos verões e invernos úmidos.

Cargas de poluentes contribuintes aos reservatórios (indicador 2)

As tabelas 4 a 7 mostram os 10 reservatórios que recebem, em ordem decrescente, as maiores cargas de DBO, nitrogênio, fósforo e coliformes fecais. As tabelas mostram, também, as condições de estratificação térmica dos respectivos reservatórios. Deve-se salientar que as cargas apresentadas referem-se apenas as contribuições da área de drenagem direta ao reservatório e não o total acumulado. Portanto, os reservatórios localizados a jusante do sistema tenderão a possuir uma situação mais desfavorável

devido à carga acumulada de montante, apesar da capacidade dos reservatórios em reduzir parte da carga através dos processos de sedimentação, diluição e reações internas.

Observa-se que alguns reservatórios destacam-se pelo maior aporte de cargas. No rio das Antas, sobressaem os reservatórios Muçum, 14 de Julho, Monte Claro, Castro Alves e São Manoel. Nos demais rios, os reservatórios que recebem as maiores contribuições de DBO, nitrogênio, fósforo e coliformes são os das UHEs Pulador no rio Guaporé, Caçador no rio Carreiro e Primavera no rio Turvo.

Carga de poluentes por unidade de volume de reservatório (indicador 3)

Este indicador pode detectar um maior impacto na qualidade da água do que o simples valor absoluto das cargas poluidoras drenadas aos reservatórios. A tabela 8 mostra os dez reservatórios que apresentam a maior relação entre carga de poluição e volume de reservatório.

TABELA 4

Reservatórios que recebem as maiores cargas de DBO

Classificação	Rio	Nome UHE	Carga (t/ano)	Fd	Situação de estratificação
1	Antas	Muçum	11.044	1,0	misturado
2	Guaporé	Pulador	10.580	1,4	misturado
3	Antas	Monte Claro	8.367	5,4	misturado
4	Carreiro	Caçador	7.988	0,2	médio
5	Antas	Castro Alves	5.486	0,2	médio
6	Antas	14 de Julho	5.296	1,5	misturado
7	Carreiro	Linha Emília	4.529	0,7	fraca
8	Turvo	Primavera	4.254	0,1	forte
9	Antas	São Manoel	3.111	0,7	fraca
10	Prata	Ilha	2.693	0,4	fraca

TABELA 5

Reservatórios que recebem as maiores cargas de Nitrogênio

Classificação	Rio	Nome UHE	Carga (t/ano)	Fd	Situação de estratificação
1	Turvo	Primavera	3.263	0,1	forte
2	Carreiro	Caçador	2.061	0,2	média
3	Antas	Muçum	1.839	1,0	misturado
4	Guaporé	Pulador	1.839	1,4	misturado
5	Antas	Passo do Meio	1.602	0,7	fraca
6	Antas	Monte Claro	1.405	5,4	misturado
7	Antas	São Manoel	1397	0,7	fraca
8	Antas	Castro Alves	1.369	0,2	média
9	Antas	São José	1.118	2,5	misturado
10	Antas	14 de Julho	1.093	1,5	misturado

TABELA 6

Reservatórios que recebem as maiores cargas de Fósforo

Classificação	Rio	Nome UHE (Sigla)	Carga (t/ano)	Fd	Situação de estratificação
1	Turvo	Primavera	467	0,1	forte
2	Guaporé	Pulador	361	1,4	misturado
3	Antas	Muçum	356	1,0	misturado
4	Carreiro	Caçador	350	0,2	médio
5	Antas	Monte Claro	276	5,4	misturado
6	Antas	Castro Alves	239	0,2	médio
7	Antas	Passo do Meio	219	0,7	fraco
8	Antas	São Manoel	215	0,7	fraco
9	Antas	14 de julho	208	1,5	misturado
10	Carreiro	Linha Emília	169	0,7	fraca

TABELA 7
Reservatórios que recebem as maiores cargas de coliformes

Classificação	Rio	Nome UHE	Carga (1015 NMP/ano)	Fd	Situação de estratificação
1	Antas	Monte Claro	1.832	5,4	misturado
2	Antas	Muçum	1.052	1,0	misturado
3	Antas	14 de Julho	793	1,5	misturado
4	Carreiro	Caçador	588	0,2	médio
5	Guaporé	Pulador	576	1,4	misturado
6	Antas	Castro Alves	550	0,2	médio
7	Carreiro	Linha Emília	405	0,7	fraco
8	Antas	São Manoel	353	0,7	fraco
9	Guaporé	Arranca Toco	260	2,6	misturado
10	Guaporé	Monte Bérico	204	1,1	misturado

Observa-se que há mudanças importantes em relação à classificação baseada no valor absoluto das cargas contribuintes aos reservatórios (indicador 2). Por exemplo, o reservatório que recebe a maior carga absoluta de DBO (UHE Muçum) não figura entre os dez reservatórios com maior relação DBO/volume. O reservatório com as maiores cargas absolutas de nitrogênio e fósforo (UHE Primavera) situa-se em sétimo e oitavo no indicador 3. Por outro lado, o reservatório da UHE Pulador no rio Guaporé classifica-se entre os primeiros tanto no critério de carga absoluta quanto carga relativa, o mesmo ocorrendo no reservatório da UHE Monte Claro no rio das Antas, para DBO e coliformes. Embora não muito significativo em termos de cargas absolutas, o reservatório da UHE São José no rio das Antas destaca-se na relação carga/volume; o mesmo ocorre em relação aos reservatórios das UHEs São Paulo no rio Carreiro e Arranca Toco no rio Guaporé. Observa-se que quatro dos 30 reservatórios avaliados (UHE Pulador, São Paulo, São José e Arranca Toco) aparecem entre os cinco primeiros em todas as relações carga/volume mostradas na tabela 8.

TABELA 8
Classificação dos reservatórios em função da relação carga/volume

Classificação	DBO / volume (g/m ³ -ano)	N / volume (g/m ³ -ano)	P / volume (g/m ³ -ano)	Coli / volume (10 ⁹ /m ³ -ano)
1	4.600 - Pulador	800 - Pulador	157 - Pulador	300 - Monte Claro
2	1.677 - São Paulo	559 - São José	83 - São José	250 - Pulador
3	1.372 - Monte Claro	384 - Piraquete	59 - São Paulo	153 - Arranca Toco
4	1.306 - Arranca Toco	344 - Arranca Toco	59 - Arranca Toco	141 - São Paulo
5	881 - São José	321 - São Paulo	53 - Piraquete	69 - São José
6	517 - Linha Emília	298 - Matemático	45 - Monte Claro	49 - Linha Emília
7	489 - Boa Fé	240 - Primavera	41 - Matemático	34 - Boa Fé
8	435 - Caçador	230 - Monte Claro	34 - Primavera	34 - Monte Bérico
9	416 - Monte Bérico	153 - Passo do Meio	21 - Passo do Meio	32 - Caçador
10	386 - Piraquete	119 - Monte Bérico	20 - Monte Bérico	27 - 14 de Julho

Cargas admissíveis e perigosas de nitrogênio e fósforo (Indicador 4)

A classificação de Vollenweider estabelece taxas de aplicação permissíveis de nitrogênio e fósforo para que o reservatório mantenha condições oligotróficas. Estas taxas são calculadas em função da profundidade média do reservatório, conforme mostrado na tabela 1. Por exemplo, as taxas admissíveis de nitrogênio e fósforo para o reservatório da UHE Muçum no rio das Antas foram calculadas considerando-se a altura de 26,5 m, prevista para o reservatório. De acordo com a tabela 1, as taxas de aplicação permissíveis de N e P para esta altura são 2,5 e 0,16 g/m².ano. A área do reservatório da UHE Muçum será de 12,8 km². Assim, as cargas admissíveis ao reservatório seriam:

Carga admissível nitrogênio =

$$2,5 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \cdot 12,8 \cdot \text{km}^2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \cdot 10^{-6} \frac{\text{t}}{\text{g}} = 32,0 \frac{\text{t}}{\text{ano}}$$

Carga admissível fósforo =

$$0,16 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \cdot 12,8 \cdot \text{km}^2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \cdot 10^{-6} \frac{\text{t}}{\text{g}} = 2,05 \frac{\text{t}}{\text{ano}}$$

As cargas admissíveis para os demais reservatórios seguiram o mesmo procedimento. A tabela 9 mostra os reservatórios com as 10 maiores cargas admissíveis de nitrogênio e fósforo.

TABELA 9
Reservatórios com maiores cargas admissíveis de nitrogênio e fósforo

Classificação	Usina Hidrelétrica	Carga admissível (t/ano)	
		Nitrogênio	Fósforo
1	Muçum	32,00	2,05
2	Castro Alves	18,00	1,13
3	14 de Julho	13,68	0,91
4	Caçador	12,52	0,83
5	Pezzi	8,99	0,56
6	São Manoel	7,21	0,45
7	Espigão Preto	5,46	0,34
8	São Marcos	5,06	0,32
9	Serrados Cavalinhos	4,76	0,31
10	Quebrada Funda	4,31	0,28

As tabelas 5 e 6 mostram que as cargas estimadas de nitrogênio e fósforo que aportam ao reservatório da UHE Muçum são de 1.839 t/ano e 356 t/ano, respectivamente. Portanto, as reduções de N e P necessárias para manter o reservatório em estado oligotrófico devem ser:

Redução de nitrogênio =

$$\frac{1.839 \text{ t/ano} - 32,0 \text{ t/ano}}{1.839 \text{ t/ano}} \cdot 100\% = 98,3\%$$

Redução de fósforo =

$$\frac{356 \text{ t/ano} - 2,05 \text{ t/ano}}{356 \text{ t/ano}} \cdot 100\% = 99,4\%$$

Estes cálculos foram realizados para todos os reservatórios planejados, chegando-se a percentuais de remoção de nitrogênio e fósforo superiores a 96% e 98%, respectivamente. Cálculos idênticos foram feitos para determinar cargas que resultem em taxas de aplicação perigosas. Conforme descrito na metodologia, uma taxa de aplicação perigosa tem o potencial de conduzir o reservatório ao estado eutrófico. Para o caso da UHE Muçum, as taxas de aplicação perigosas de N e P são, respectivamente, 5,1 e 0,32 g/m².ano (tabela 1). Para uma área de 12,8 km², as cargas perigosas de N e P seriam 65,3 t/ano e 4,10 t/ano. As reduções necessárias seriam 96,4% e 98,8%, respectivamente para nitrogênio e fósforo. Cálculos realizados para os demais reservatórios indicam necessidade de remoção de nitrogênio entre 92,1% e 99,9% e redução de fósforo entre 97,3 e 100%. A tabela 10 apresenta exemplos das reduções de cargas necessárias para manutenção de condições oligotróficas nos reservatórios.

De acordo com este critério, é grande a probabilidade de haver eutrofização nos reservatórios das usinas projetadas uma vez que as necessidades de redução de cargas são muito altas. A ocorrência de eutrofização fica ainda mais provável quando se considera que as cargas de nitrogênio e fósforo utilizadas são apenas àquelas geradas na área de influência dos reservatórios, não se considerando o transporte de cargas que ocorre dos reservatórios de montante para jusante.

A disponibilidade de nutrientes poderá resultar na produção excessiva e indesejável de algas, cianobactérias e macrófitas aquáticas (FUNASA, 2003). Os efeitos negativos desta situação também deverão ser

sentidos pelos corpos d'água que recebem a drenagem dos rios Taquari-Antas, como o lago Guaíba. Este manancial, fonte de abastecimento de água para a cidade de Porto Alegre (1,4 milhões de habitantes) sofre, com frequência, episódios de floração. Por exemplo, no verão de 2004, o Guaíba teve episódios prolongados de floração de cianobactérias, com repercussão negativa na qualidade da água potável distribuída a população (Zero Hora, 2004).

TABELA 10

Exemplos de reduções de cargas requeridas em reservatórios para manutenção de condições oligotróficas

Usina hidrelétrica	Redução requerida de carga (%)	
	Nitrogênio	Fósforo
Pulador	100,0	100,0
Matemático	99,9	100,0
São José	99,9	100,0
Primavera	99,9	99,9
São Paulo	99,9	100,0
Passo do Meio	99,8	99,9
Monte Claro	99,8	99,9
Arranca Toco	99,8	99,9
Linha Emília	99,7	99,9
Cotiporã	99,7	99,9

Relação entre potência gerada e potencial de eutrofização (Indicador 5)

As tabelas 11 e 12 mostram os dez aproveitamentos hidrelétricos mais favoráveis e os dez mais desfavoráveis com relação a razão entre potência gerada e potencial de eutrofização. Observa-se que há uma tendência de que os aproveitamentos com maior potência sejam mais favoráveis em relação aos de menor potência. Contudo, esta não é uma regra geral. Por exemplo, a hidrelétrica de Monte Claro no rio das Antas possui a maior potência entre todas as hidrelétricas (130 MW) mas classifica-se em 14º lugar neste indicador. A figura 3 mostra o gráfico relacionando potência e razão entre cargas potenciais e admissíveis.

TABELA 11
Hidrelétricas mais favoráveis na razão entre potência e potencial de eutrofização

Usina hidrelétrica	Potência gerada (MW)	Potencial de eutrofização	Potência gerada / Potencial de eutrofização
Muçum	112,0	175,0	0,64
Castro Alves	120,0	212,0	0,57
Serra dos Cavalinhos	45,0	88,9	0,51
14 de Julho	98,0	225,0	0,43
Jararaca	41,0	120,0	0,34
Monte Cucco	19,7	75,0	0,26
São Marcos	57,0	264,3	0,22
Pezzi	15,6	88,9	0,18
Espigão Preto	34,0	193,8	0,18
São Manoel	51,0	476,5	0,11

TABELA 12

Hidrelétricas menos favoráveis na razão entre potência e potencial de eutrofização

Usina hidrelétrica	Potência gerada (MW)	Potencial de eutrofização	Potência gerada / Potencial de eutrofização
Matemático	3,0	3.161,5	0,0009
Pulador	6,3	6.216,7	0,0010
Arranca Toco	1,6	1.269,2	0,0013
São Paulo	8,4	2.190,0	0,0038
Boa-Fé	9,3	692,3	0,0134
Linha Emília	14,3	1.007,1	0,0142
Monte Bérico	13,9	892,3	0,0156
Cotiporã	12,7	740,0	0,0172
Primavera	36,0	1.833,3	0,0196
Quebrada Funda	12,0	500,0	0,0240

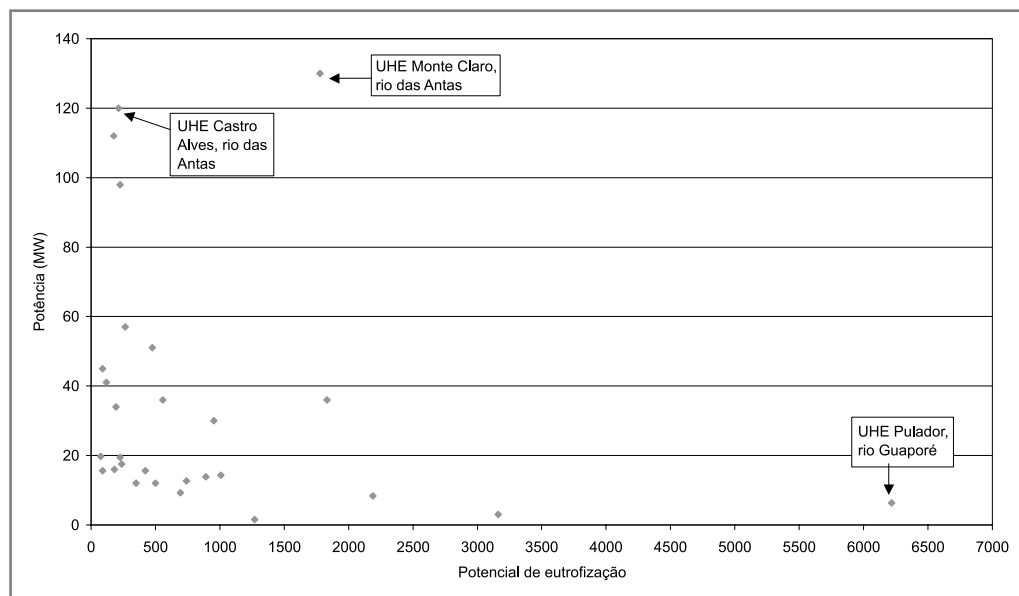


Figura 3. Potência gerada versus potencial de eutrofização nos reservatórios projetados na bacia dos rios Taquari-Antas

CONCLUSÕES

Este estudo utilizou cinco indicadores para fazer uma avaliação inicial dos empreendimentos mais e menos favoráveis em uma bacia hidrográfica onde se planeja a construção de um número significativo de usinas hidrelétricas de pequeno e médio porte.

Em relação à estratificação térmica, observou-se que, para as condições de vazões médias, haverá tendência forte de estratificação apenas no reservatório da UHE Primavera, e tendência média de estratificação em três outros reservatórios. O quadro altera-se quando são consideradas vazões de estiagem. Nestas condições, há possibilidade de estratificação média ou forte para vários reservatórios.

As taxas de aplicação superficiais de nutrientes sugerem o desenvolvimento de condições eutróficas em todos os reservatórios, uma vez que remoções de nitrogênio e fósforo superiores a 96% e 98%, respectivamente, teriam que ocorrer para atingirem-se níveis de aplicação permissíveis. Os impactos negativos desta disponibilidade de nutrientes deve

ocorrer não somente nos reservatórios do Taquari-Antas, mas também nos corpos d'água de jusante, como o lago Guaíba.

A relação entre potência gerada e potencial de eutrofização permitiu determinar os aproveitamentos hidrelétricos mais favoráveis e desfavoráveis do ponto de vista de geração de eletricidade e impacto na qualidade da água. Destacam-se as UHEs Muçum e Matemático no rio das Antas como os aproveitamentos mais favorável e desfavorável, respectivamente.

De um modo geral, três reservatórios destacam-se com relação aos indicadores utilizados. A UHE Pulador, situada no rio Guaporé, possui o reservatório colocado em primeiro lugar em termos de aporte de cargas de DBO, nitrogênio e fósforo por unidade de volume, e segundo em coliformes fecais. É, também, o segundo reservatório mais desfavorável na relação entre potência gerada e potencial de eutrofização. O reservatório da UHE Monte Claro, no rio das Antas, recebe as maiores cargas absoluta e relativa de coliformes fecais e situa-se em 14º lugar no critério da potência e potencial de eutrofização.

O reservatório da UHE Primavera, localizado no rio Turvo apresenta tendência forte de estratificação térmica, além de receber as maiores cargas absolutas de nitrogênio e fósforo. As cargas de nutrientes a estes três reservatórios devem sofrer remoções superiores a 99,8% para que sejam mantidas condições seguras com relação a eutrofização.

Deve-se considerar que a análise de cargas não foi cumulativa, mas realizada individualmente, por reservatórios. Na análise em que se considere o transporte das cargas dos reservatórios de montante para jusante, ocorrem processos que causam incremento e decréscimo aos valores das cargas. Estes processos incluem mecanismos de transporte (advecção, difusão e dispersão), mudança de fase (sedimentação, volatilização) e transformação (reações químicas e bioquímicas). Também as contribuições resultantes da decomposição da vegetação nas áreas de inundação dos reservatórios não foram consideradas nesta avaliação preliminar.

As limitações desta análise não invalidam a definição dos locais críticos e mesmo as condições desfavoráveis da implementação de alguns reservatórios. Entretanto, recomenda-se uma avaliação integrada de toda a bacia através de simulação hidrológica, o que permitirá uma análise mais elaborada do que a apresentada neste artigo. A simulação deve contemplar o cenário com todos os reservatórios previstos.

Tendo em vista o elevado risco de eutrofização das águas nos reservatórios dos rios Taquari-Antas, sugere-se a adoção de programas para redução das cargas de nutrientes que irão aportar a eles. Estes programas devem incluir o controle de erosão do solo, a remoção de nitrogênio e fósforo de esgotos domésticos, industriais e de criação intensiva de animais em estações de tratamento, o adequado manejo da drenagem urbana e águas de escoamento agrícola. Sugere-se ainda a implementação de programas para a restauração da vegetação ciliar das margens dos arroios formadores dos rios Taquari-Antas.

Referências

- ALLAN, J. D. 1995. **Stream ecology**: structure and function of running waters. London: Chapman & Hall. 674p.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA – CEEE. 1993. **Inventário hidrelétrico da bacia do Taquari-Antas**: relatório final. Porto Alegre: Magna Eng./CEEE. 4 tomos.
- ELETOBRÁS. 1986. **Manual de estudos de efeitos ambientais dos sistemas elétricos**. Brasília. Disponível em: <http://www.eletobras.gov.br/downloads>
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE L. ROESSLER- FEPAM 2001. **Diagnóstico ambiental da bacia do Taquari-Antas, RS**. Disponível em: <http://www.fepam-rs.gov.br/biblioteca.asp>
- FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. 2003. **Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano e na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano**. Brasília; Funasa. 56p.
- GLEICK, P. H. 1998. **The world's water**: the biennial report on freshwater resources. Covelo, CA: Island Press. 319p.
- LEITE, Enio Henriques. 1999. **Qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Taquari**. Porto Alegre: FEPAM. 43p.
- QUE** há com a água de Porto Alegre. **ZERO HORA**. Porto Alegre, 25 abr. 2004. Caderno Ambiente, p.1, 6-7.
- SCHOOR, J. 1996. **Environmental Modeling**: fate and transport of pollutants in water, air, and soil. New York: Wiley. 682p.
- TUCCI, C. E. M. 1998a. Reservoir water quality simulation in Amazon region: preliminary analysis. In: BRAGA, B.; FERNANDEZ-JAUREGUI, C. (eds). **Water management of Amazon basin**. Montevideo: 288p. ABRH/UNESCO, p.135-147.
- TUCCI, C. E. M. 1998b. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS/ABRH. 678p.
- WORLD COMMISSION on DAMS. **Dams and development**: a new framework for decision making. 2000. London: World Commission on Dams. 1 CD-Rom.

Antônio D. Benetti Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. benetti@iph.ufrgs.br

Carlos E. M. Tucci Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. tucci@iph.ufrgs.br