

---

## Efeitos da cascata de reservatórios sobre a variabilidade natural de vazões: o caso do rio Paraná em Porto Primavera

*Effect of cascade reservoir on the variability of natural flow: the case Paraná River in Porto Primavera*

Cledeilson Pereira Santos<sup>1</sup> e Christopher Freire Souza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Brasil

cledeilson-ifs@hotmail.com

<sup>2</sup>Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL. Brasil

cfsouza.ufal@gmail.com

Recebido: 13/05/14 - Revisado: 01/12/14 - Aceito: 06/05/15

---

### RESUMO

Reservatórios têm sido construídos em rios para atender às demandas por usos múltiplos da água, bem como a prevenção de desastres naturais em cidades próximas a grandes cursos d'água. Tais ações têm alterado significativamente a variabilidade natural do regime de vazões nesses rios, afetando ecossistemas fluviais adaptados a estes processos hidrológicos. É neste contexto que o presente trabalho pretende avaliar o grau e a potencial desfiguração dos padrões de pulsos (magnitude, frequência, duração, período de ocorrência e gradiente) de vazões na bacia do rio Paraná, onde estão instalados cinquenta e sete grandes reservatórios. O estudo foi realizado com base em 33 índices de variáveis hidrológicas sugeridas pelo método Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) e através do método Range of Variability Approach (RVA), possibilitando a comparação entre índices estimados para dois cenários (Cenário natural do regime de vazões e Cenário atual), bem como a quantificação de impactos sobre a variabilidade natural de vazões. Como resultados, foram constatadas alterações que variam em média de moderadas a severas quanto à magnitude, frequência, período de ocorrência, duração e gradiente de vazões, onde as variáveis que apresentaram maiores graus de impactos são aquelas relacionadas a eventos extremos.

**Palavras Chave:** Reservatório. RVA. Rio Paraná

### ABSTRACT

Reservoirs have been constructed on rivers to meet demands for multiple water uses, as well as for preventing natural disasters in cities. Such actions have significantly altered the natural flow regime variability in these rivers, affecting river ecosystems adapted to these hydrological processes. In this context, the presented study aimed to assess the degree and potential disfigurement of flow pulse patterns (magnitude, frequency, duration, time of occurrence and gradient) in the Paraná River basin, where fifty-seven large reservoirs are installed. The study was based on 33 hydrological variables suggested in the Indicators Hydrologic Alteration (IHA) method which were assessed via the Range of Variability Approach (RVA) method. Such method enabled comparing estimated indexes for two scenarios (Scenario I-natural flow regime and Scenario II-present flow regime), resulting in impacts on the natural flow variability estimation. As results, it was found that flow alteration in magnitude, frequency, timing, duration and shape ranged from moderate to severe.

**Keywords:** Reservoir cascade. RVA. Paraná River

## INTRODUÇÃO

A vazão natural de um rio varia no tempo em escalas de horas, dias, estações do ano e desta variação dependem toda a composição biótica e a estrutura de ecossistemas ribeirinhos (GORMAN ; KARR, 1978; POFF et al, 1997). A vazão é uma variável-chave (POFF et al., 1997), pois influencia processos físico-químicos, como a temperatura da água, geomorfologia do canal, diversidade de habitats físicos e distribuição e abundância de espécies ribeirinhas.

A magnitude, a frequência, a duração e o período de ocorrência de altos e baixos pulsos de vazões regulam numerosos processos ecológicos. As vazões de grandes magnitudes, além de remover e transportar sedimentos criam terras úmidas em áreas de inundações e controlam o avanço da vegetação na calha do rio (TRUSH et al., 2000). As vazões de baixa magnitude oportunizam o recrutamento da mata ciliar em regiões onde as planícies de inundações são frequentemente inundadas (WHARTON et al., 1981).

O interesse em armazenar água para atender aos usos múltiplos, tais como abastecimento humano, geração de energia, navegação e controle de cheias, levou o homem a barrar os cursos d'água criando reservatórios artificiais. Tais barramentos alteram a variação do regime de vazões e conseqüentemente impactam a produção de bens e serviços proporcionados por ecossistemas fluviais, dos quais se utilizam comunidades ribeirinhas.

A literatura apresenta diversos métodos para estimar o grau dessas alterações, tais como o Ecological Limits of Hydrological Alteration (ELOHA), que busca descrever as relações entre alteração hidrológica e resposta ecológica em rios para definição de vazões ambientais (Poff et al., 2010) e o Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), onde são estimadas características naturais e alteradas do regime hidrológico (TNC, 2007).

Vale destacar que as métricas do método IHA têm servido de referência para o desenvolvimento e adaptações de novos métodos como, por exemplo, o Dundee Hydrological Regime Alteration Method (DHRAM), desenvolvido para rios da Escócia e Irlanda do Norte (GAO et al, 2009; BLACK et al, 2005), porém, aplicável em outras regiões; o Range of Variability Approach (RVA; RICHTER et al. 1997), com uso crescente em estudos de alteração hidrológica em rios afetados por reservatórios (JIANG et al., 2014; ZHANG et al., 2014; SUN et al., 2013), extração mineral (ZHANG et al., 2009), uso e ocupação do solo de forma inadequada (YANG et al., 2010), mudanças climáticas (SUEN, 2010), e outras aplicações.

É neste contexto que o presente trabalho pretende avaliar o grau e a potencial desfiguração do padrão de pulsos (magnitude, frequência, duração, período de ocorrência e gradiente) de vazões na bacia do rio Paraná, onde estão instalados cinquenta e sete grandes reservatórios (ITAIPO BINACIONAL, 2013) e que tem sido fonte de estudos com abordagens eco-hidrológicas. Um exemplo disso é a identificação de redução da abundância de espécies migratórias de peixes como consequência da alteração da duração e magnitude das cheias para reprodução (AGOSTINHO et al. 2004).

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

A seção escolhida para a realização do estudo situa-se na Usina Hidrelétrica (UHE) Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera), rio Paraná, com área de drenagem de 572.000 km<sup>2</sup>, sendo a barragem mais extensa do Brasil com 11.380 metros de comprimento (Figura 1). Localizada entre os municípios de Rosana (SP) e Batayporã (MS), sua construção foi finalizada no ano de 1998 e sua operação teve início no ano de 1999 (CESP, 2009).

Nesta região, predominam os seguintes tipos de cobertura vegetal: cerrado, mata atlântica, mata de araucária, floresta estacional decídua e floresta estacional semidecídua (ANA, 2013a). Quanto ao uso do solo, houve grandes alterações ao longo do crescimento econômico do país, resultando em desmatamentos em grandes proporções. A precipitação média anual histórica (1961-2007) em toda a região hidrográfica do rio Paraná é de 1543 mm (ANA, 2013b).

### Base de dados

Em estudos dessa natureza, pesquisadores do The Nature Conservancy (TNC, 2007) recomendam a utilização de séries de vazões com pelo menos 20 anos de extensão para que variações climáticas mais extremas sejam representadas, porém, ressaltam que o tamanho da série para análises hidrológicas depende do grau da variabilidade climática. Analisando rios australianos, Kennard et al. (2010), chegaram à conclusão de que 15 anos de dados são suficientes para identificar características importantes da variabilidade de vazões, onde o viés entre os valores estimados por métricas hidrológicas foram majoritariamente menores que 30% do que o valor verdadeiro, para 90% das métricas, a precisão variou a no máximo 25% e a acurácia em menos de 10%.

Usualmente são coletados dados de vazões pré e pós-reservatórios para as análises. Neste trabalho, pretende-se comparar séries de vazões sob dois cenários: cenário natural- Vazões naturais reconstituídas (descontados os efeitos de usos consuntivos e barragens) e cenário atual- Vazões observadas, o que incluía influência dos reservatórios. As comparações entre as séries na seção da UHE Porto Primavera foram realizadas para o mesmo período (1999-2010), dessa forma, não há interferências de variações climáticas nas análises e as alterações hidrológicas são em função dos efeitos da cascata de reservatórios e dos métodos de estimação de vazão.

As vazões naturais reconstituídas foram adquiridas do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2012) em escala diária. Estas vazões foram sintetizadas através do uso de três modelos: Modelo Multivariado Sazonal (SMMAR), Modelo de Ponderação Regional por Médias (PRM) e Modelo de Ponderação Regional por Correlações (PRC), visando o preenchimento e extensão das séries fluviométricas. Como base de dados para os modelos, foram utilizadas séries de vazões e precipitações observadas à montante da UHE Porto Primavera, bem como informações referentes à evaporação líquida dos reservatórios e dos usos consuntivos para posterior incremento, dando origem

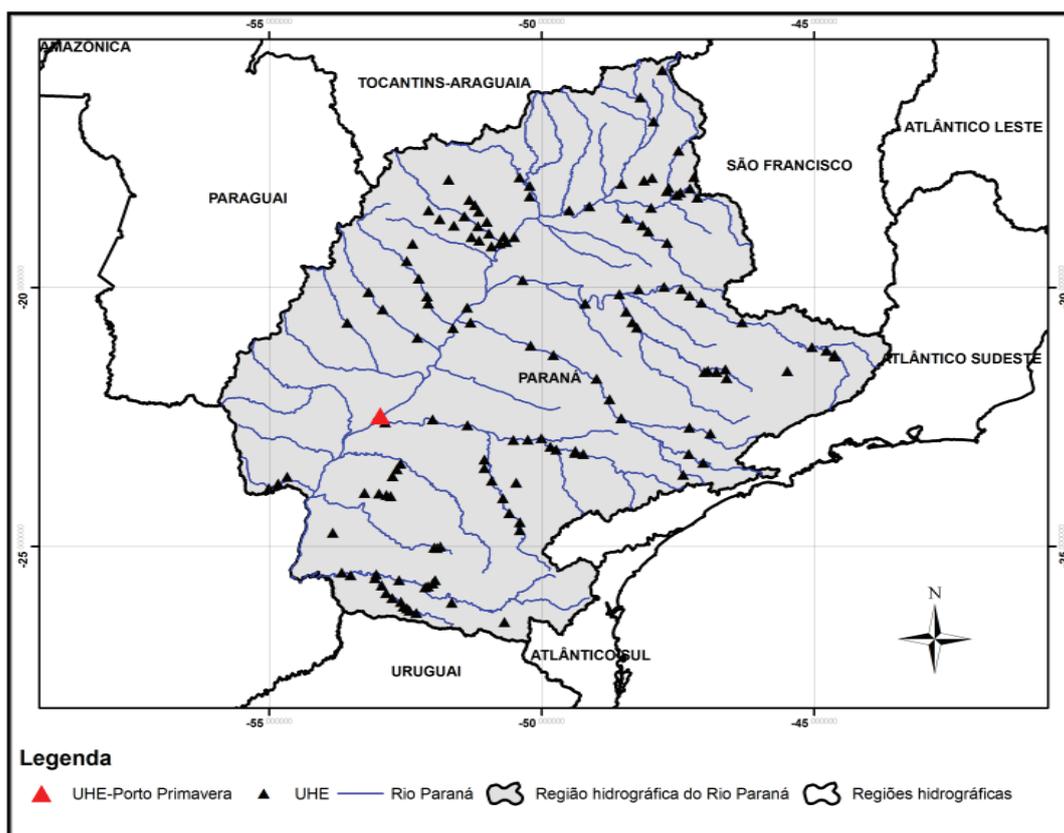


Figura 1 - Localização da área de estudo

à série sintética de vazões naturais (ANA, 2011).

As séries de vazões para o cenário atual, foram fornecidas pela Companhia Energética de São Paulo (CESP).

### Estimativa de Alterações Hidrológicas

Neste estudo, foram usadas 33 variáveis hidrológicas sugeridas pelo método IHA (Tabela 1), seguindo a conclusão de Olden e Poff (2003), de que estas apresentam baixa redundância e boa capacidade para representar aspectos do regime hidrológico em rios.

Para estimar o grau de alteração hidrológica, foi utilizado o método RVA, que consiste nos seguintes passos:

1-Definição das séries de vazões, ou seja, cenário natural contra cenário atual;

2-Escolha de valores de magnitude (limites) para a definição de altos e baixos pulsos de vazões. Neste estudo, foram adotados os valores padrões sugeridos no IHA, onde a ocorrência de vazões inferiores à média menos um desvio padrão das vazões naturais são classificadas como de baixos pulsos, enquanto que vazões superiores à média mais um desvio padrão classificam-se como de altos pulsos;

3- Cálculo de valores anuais das 33 variáveis que caracterizam os aspectos do regime;

Tabela 1 - Resumo de variáveis hidrológicas do IHA.

Aspecto	Variáveis Hidrológicas
Grupo I- Magnitude	Média para cada mês do ano
Grupo II- Magnitude e duração de eventos extremos	Mínimas anuais de 1, 3, 7, 30 e 90 dias
	Máximas anuais de 1, 3, 7, 30 e 90 dias
	Nº de dias com vazões nulas
	Índice de fluxo de base (Mínima anual de 7 dias/Média anual)
Grupo III- Período de ocorrência de eventos extremos	Dia juliano de máxima anual
	Dia juliano de mínima anual
Grupo IV- Frequência e duração de altos e baixos pulsos	Nº de baixos pulsos
	Duração dos baixos pulsos
	Nº de altos pulsos
	Duração dos altos pulsos
Grupo V- Gradiente de vazão	Taxa de ascensão de vazão
	Taxa de recessão de vazão
	Nº de reversões anuais

4- O RVA divide os valores calculados no passo 3 em três categorias. No caso do padrão de análise não-paramétrica adotado neste trabalho, os limites inferior e superior são colocados a 17 percentis da mediana (TNC, 2007), produzindo um delineamento de três categorias de magnitudes de índices de tamanhos iguais e permitindo um maior detalhamento de como e onde houve a variação. A categoria mais baixa contém todos os valores inferiores ao percentil 33, a categoria do meio contém todos os valores que caem entre os percentis 34 e 67 e a categoria mais elevada contém todos os valores maiores que o percentil 67;

5-Cálculo do fator de impacto para as três categorias através da equação 1.

$$HA = \left( \frac{FE - FO}{FE} \right)$$

Onde:

\*HA- Fator de alteração hidrológica para cada categoria analisada. Um fator HA positivo significa que a frequência de valores na categoria aumentou com o cenário atual, enquanto que um fator HA negativo significa que a frequência de valores na categoria diminuiu;

\*FO- Frequência observada de valores anuais dos índices IHA dentro dos limites RVA no cenário atual;

\*FE- Frequência esperada de valores dentro dos limites do RVA. A FE é calculada através do número de anos em que os valores anuais dos índices IHA estiveram dentro dos limites RVA no cenário natural, multiplicado pela razão entre o número de anos do cenário atual e do cenário natural. Como neste estudo o número de anos é igual para os dois cenários, FE é definido pelo número de valores dentro dos limites do RVA no cenário natural;

6- A magnitude de alteração hidrológica é computada com base na categoria do meio, onde o HA, descrito no passo

5 pode ser apresentado em porcentagem, multiplicando-o por cem (RICHTER et al. 1998; TNC, 2007).

### Classificação de Alterações Hidrológicas

Levando em consideração a limitação de conhecimento sobre a influenciado regime de vazões em ecossistemas fluviais, Richter et al. (1998) sugerem que alterações na variabilidade natural de rios podem ser caracterizadas como de: 1- baixo impacto, quando apresentam magnitudes que variam entre 0-33%; 2- impacto moderado, de 34-67%; 3- impactos severos, para magnitudes superiores a 67%.

### RESULTADOS

Os hidrogramas de vazões observadas (Cenário atual; Figuras 2 e 4) revelam variações irregulares entre os anos de 1999 e 2001, em função do enchimento do reservatório, sendo que a primeira etapa foi concluída em dezembro de 1998 e a segunda etapa em março de 2001.

No geral, observa-se uma diminuição de magnitudes de pulsos altos (de 19000 para 14000 m<sup>3</sup>/s) e aumento dos baixos (de 3000 para 5000 m<sup>3</sup>/s), como efeito dos reservatórios e das diversas atividades de uso consuntivo da água na bacia. A variação das vazões do regime, ano-a-ano (Figuras 3 e 4), perdeu, no entanto, sua regularidade de variação de magnitude mínima, especialmente nos pulsos altos entre Fevereiro e Abril (de 9000 para 6000 m<sup>3</sup>/s). Observa-se também que o início do período de ocorrência dos pulsos altos passou a ser menos regular, com atraso de quase 2 meses (passando de Dezembro a Fevereiro), exceto para poucos anos (2005-2006, 2006-2007, 2009-2010).

Os limites definidos para caracterizar altos e baixos pulsos de vazões são da ordem de 11670 m<sup>3</sup>/s e 3270 m<sup>3</sup>/s respectivamente. As estimativas de alterações hidrológicas baseadas

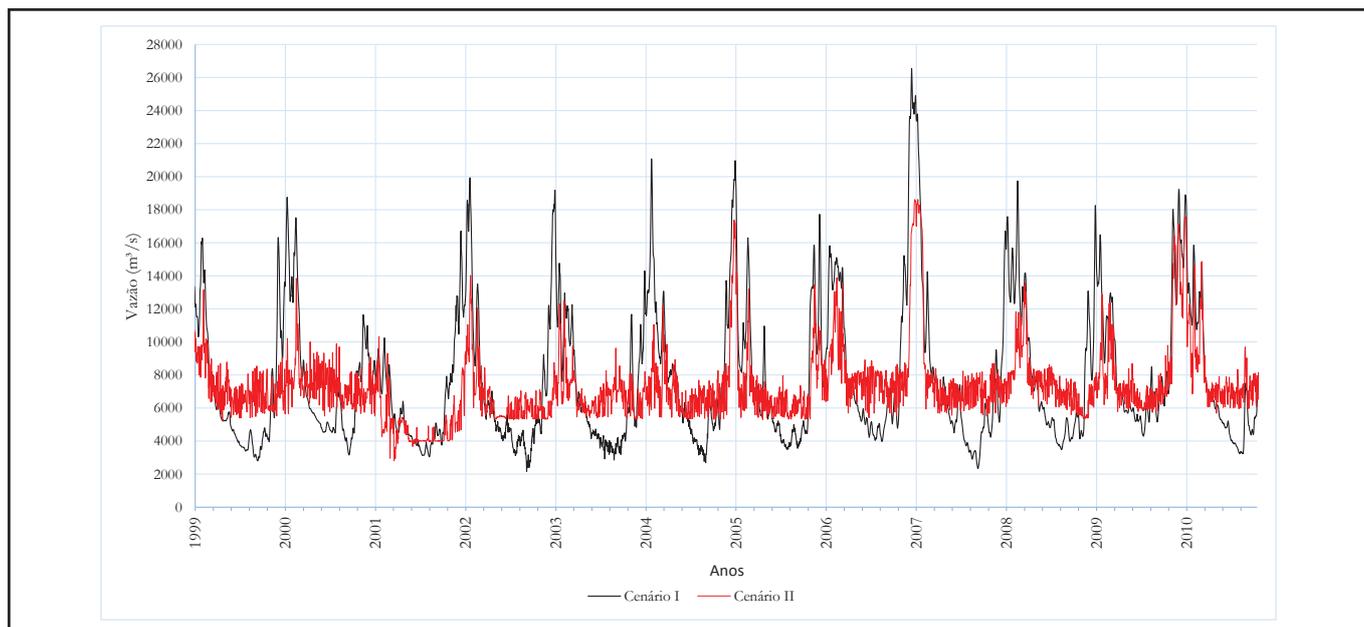


Figura 2 - Hidrogramas Anuais

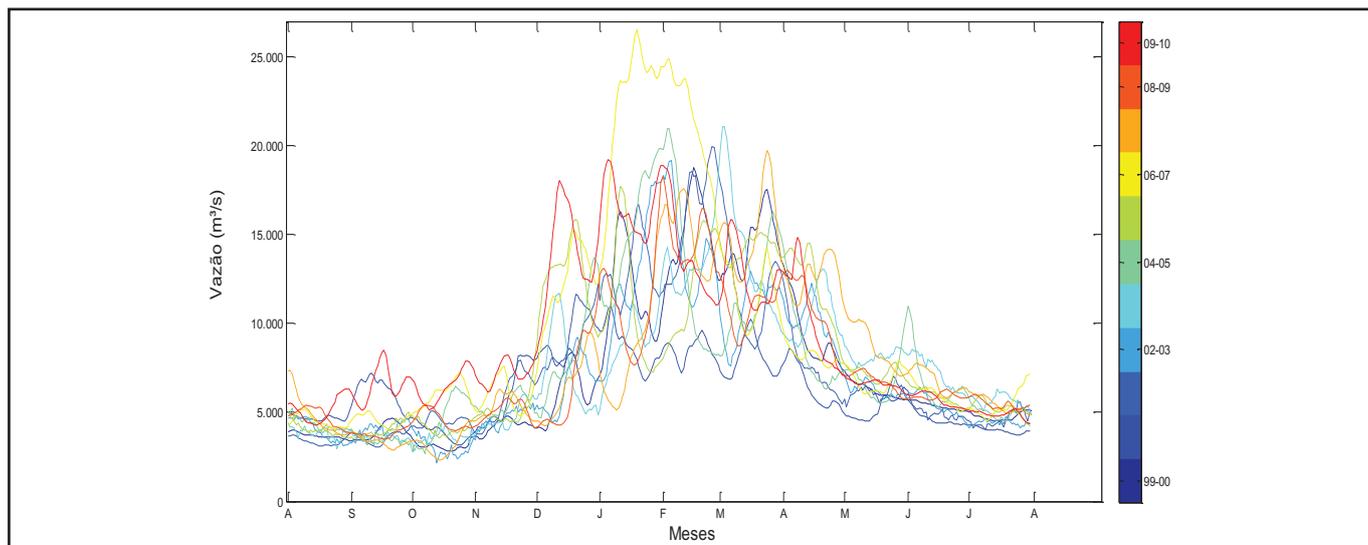


Figura 3 - Hidrogramas- Cenário natural

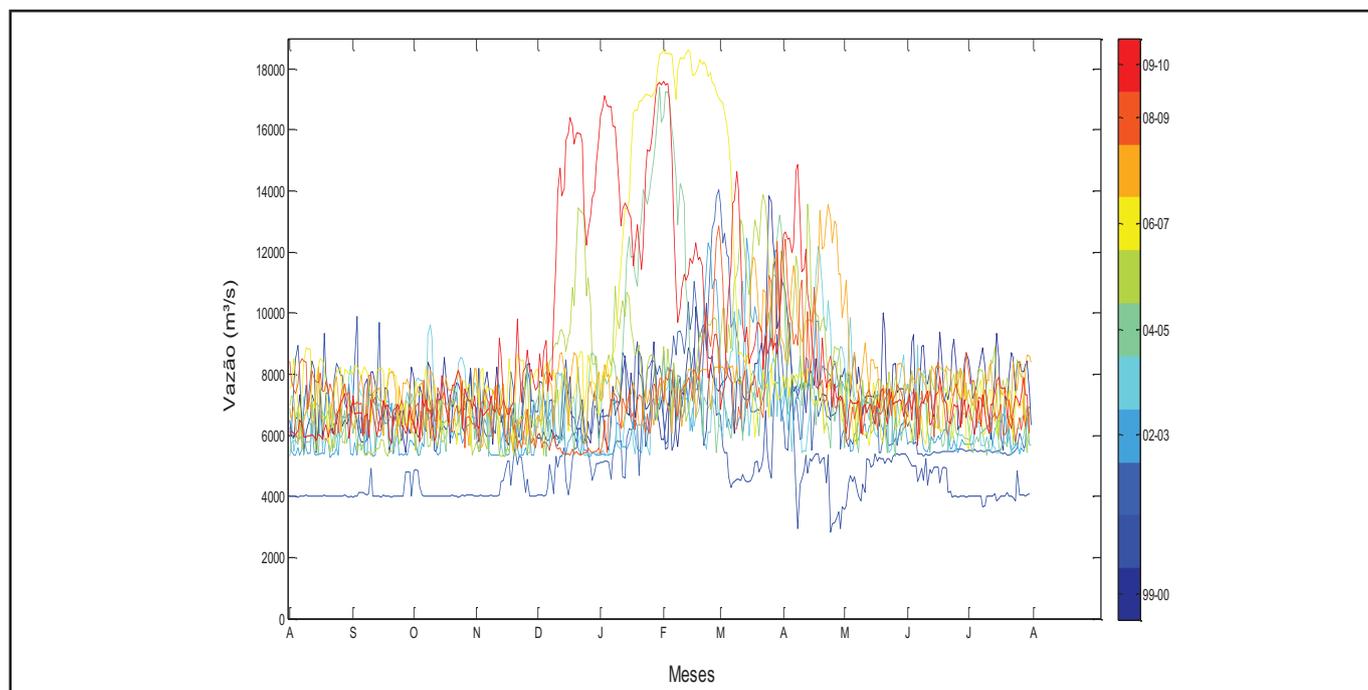


Figura 4 - Hidrogramas- Cenário atual

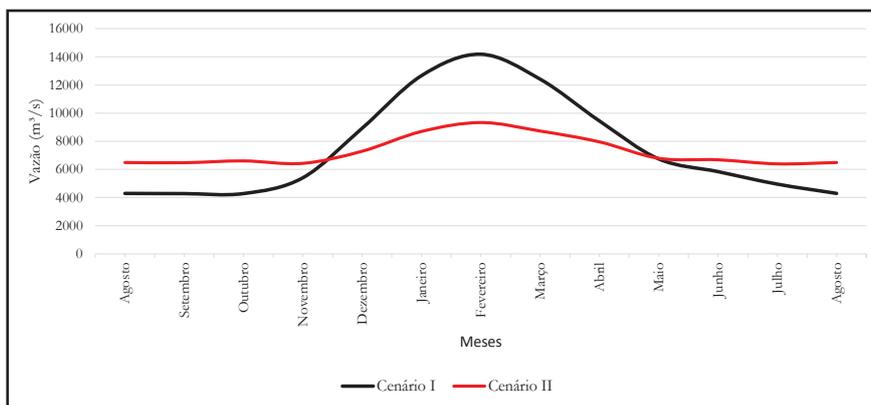


Figura 5 - Hidrogramas: Médias Mensais

na abordagem do método RVA, refletem um comportamento comum em bacias hidrográficas sob a influência de operações de reservatórios, onde as magnitudes das vazões de eventos de cheias são reduzidas e no caso de eventos de estiagens ocorre o aumento das magnitudes. Esse comportamento pode ser caracterizado por meio dos cinco grupos de variáveis hidrológicas apresentadas na Tabela 2 para os cenários natural e atual.

Grupo I- Com relação aos meses que representam a subida do hidrograma da bacia (setembro a fevereiro), entre os meses de setembro a novembro, houve aumentos na frequência de vazões com magnitudes acima do percentil 67 (categoria alta) que variaram de 125 a 175%. Porém, entre os meses de dezembro e fevereiro, onde se concentram os maiores picos de vazões, houve amortecimento das vazões pelo reservatório, refletindo na redução de 50 a 100% sobre a frequência de vazões na categoria alta. No período de decaimento do hidrograma (março a agosto), os meses de março e abril, ainda sob o efeito do amortecimento de cheias, apresentaram magnitudes de vazões com maior frequência na categoria baixa (abaixo do percentil 33). Quanto aos demais meses, as vazões foram mais frequentes na categoria alta (Tabela 2). Levando em consideração a categoria média, que tem como limites inferior e superior os percentis 33 e 67 respectivamente, observa-se que a alteração média do grupo é da ordem de 64%, onde o grau de impacto é classificado como moderado (Figura 4).

Grupo II- Com a elevação das magnitudes das vazões mínimas, observa-se que as médias mínimas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias foram mais frequentes na categoria alta (Tabela 2 e Figura 4). Quanto às médias máximas, as frequências passaram a se concentrar na categoria baixa. O número de vazões nulas não variou, pois trata-se de um rio com regime perene. O índice de fluxo de base teve incremento de 175% na frequência de magnitudes de categoria alta. Tais modificações geraram uma média de alteração de 72%, classificando-se como impacto severo.

Grupo III- O dia Juliano de máxima anual em condições

naturais ocorria em média no dia de número 34 (3 de fevereiro). Com a presença das UHEs, passaram a ocorrer no dia Juliano de número 55 (24 de fevereiro). Quanto ao dia Juliano de mínima anual, observa-se que a ocorrência desse evento foi antecipada, pois naturalmente ocorria em média no dia de número 271 (27 de setembro) e passou a ser mais frequente no dia 262 (18 de setembro, tabela 2). O impacto médio deste grupo é da ordem de 50%, sendo considerado como moderado (Figura 6).

Grupo IV- Nota-se que em condições naturais os baixos pulsos de vazões ocorrem em média 2,5 vezes ao ano e com durações de 10,2 dias. Com a construção das UHEs, praticamente não há registros de eventos de baixos pulsos e quando ocorre, sua duração mais frequente não ultrapassa 3 dias. No caso do número de altos pulsos, naturalmente ocorre em média 3 vezes ao ano com durações de 23,6 dias e com a operação dos reservatórios passaram a ocorrer acima de 3 vezes por ano (percentil 67), porém com durações abaixo de 11,4 dias (Tabela 2). Os efeitos dos reservatórios provocaram alterações hidrológicas médias de 56% para este grupo, onde o grau de impacto pode ser considerado como moderado (Figura 6).

Grupo V-A taxa de ascensão de vazão ou velocidade de subida do hidrograma em ambiente natural é em média da ordem de 260,4 m<sup>3</sup>/s/dia. Após o fechamento da UHE-Porto Primavera, essa taxa foi ampliada para 503,6 m<sup>3</sup>/s/dia (Tabela 2). Verificou-se também que os valores anuais calculados para essa variável são mais frequentes na categoria alta (282,3 m<sup>3</sup>/s/dia, figura 6). A taxa de recessão de vazão apresenta comportamento semelhante, onde as magnitudes passaram a ser mais frequentes na categoria baixa (-232,6 m<sup>3</sup>/s /dia). O número de reversões de vazões também foi ampliado, onde houve aumento de 175% na frequência de ocorrências na categoria alta e redução nas frequências das categorias média e baixa. As três variáveis desse grupo atingiram alterações hidrológicas de 100%. Com isso, o grupo apresenta impactos classificados com severos.

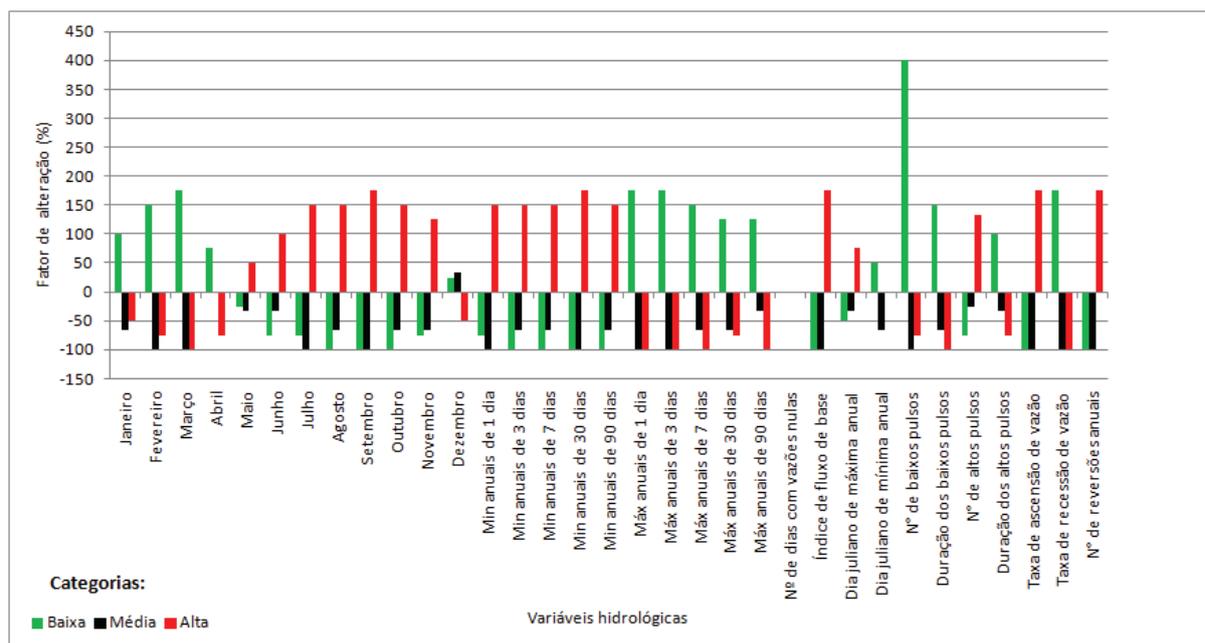


Figura 6 - Fator de alteração hidrológica por categoria-RVA

Tabela 2 - Valores estimados para os índices do IHA

Grupos	Variáveis	Médias Anuais		Percentis	
		Cenário natural	Cenário atual	33	67
Grupo 1	Médias de Janeiro (m <sup>3</sup> /s)	12663,1	8697,3	10946,5	12914,4
	Médias de Fevereiro (m <sup>3</sup> /s)	14184,5	9328,9	13719,9	14973,1
	Médias de Março (m <sup>3</sup> /s)	12415,4	8728,0	11659,2	13616,3
	Médias de Abril (m <sup>3</sup> /s)	9444,1	7956,6	8608,0	10387,3
	Médias de Maio (m <sup>3</sup> /s)	6743,4	6789,3	6331,3	6803,7
	Médias de Junho (m <sup>3</sup> /s)	5840,9	6683,8	5465,7	5978,9
	Médias de Julho (m <sup>3</sup> /s)	4953,8	6392,8	4784,3	5373,3
	Médias de Agosto (m <sup>3</sup> /s)	4294,4	6489,9	3985,0	4678,2
	Médias de Setembro (m <sup>3</sup> /s)	4280,4	6476,4	3618,7	4062,2
	Médias de Outubro (m <sup>3</sup> /s)	4283,7	6603,9	3625,4	4581,1
	Médias de Novembro (m <sup>3</sup> /s)	5405,3	6430,8	5103,1	5749,6
	Médias de Dezembro (m <sup>3</sup> /s)	8928,9	7293,5	6700,9	9308,4
Grupo 2	Mín de 1 dia (m <sup>3</sup> /s)	3120,0	5165,2	2814,1	3446,0
	Mín de 3 dias (m <sup>3</sup> /s)	3195,9	5372,3	2894,8	3452,1
	Mín de 7 dias (m <sup>3</sup> /s)	3262,6	5525,9	2960,0	3494,1
	Mín de 30 dias (m <sup>3</sup> /s)	3609,4	5874,9	3285,5	3747,1
	Mín de 90 dias (m <sup>3</sup> /s)	4135,8	6146,9	3642,2	4290,2
	Máx de 1 dia (m <sup>3</sup> /s)	19374,9	14255,6	18813,8	19916,4
	Máx de 3 dias (m <sup>3</sup> /s)	19179,8	13898,9	18616,0	19774,7
	Máx de 7 dias (m <sup>3</sup> /s)	18483,6	13245,6	18078,0	19105,0
	Máx de 30 dias (m <sup>3</sup> /s)	16084,9	11313,1	15131,1	16566,6
	Máx de 90 dias (m <sup>3</sup> /s)	13547,2	9541,7	12722,4	13890,8
	Nº de dias com vazões nulas	0,0	0,0	0,0	0,0
	Índice de fluxo de base	0,4	0,7	0,4	0,5
Grupo 3	Dia juliano de máxima	34,1	67,7	32,4	54,8
	Dia juliano de mínima	271,2	255,4	262,1	285,4
Grupo 4	Nº de baixos pulsos	2,5	1,9	1,0	2,9
	Duração dos baixos pulsos (dias)	10,2	1,0	3,0	12,2
	Nº de altos pulsos	3,0	5,0	2,1	3,0
	Duração dos altos pulsos (dias)	23,6	11,4	13,3	33,7
Grupo 5	Taxa de ascensão de vazão (m <sup>3</sup> /s/dia)	260,4	503,6	257,1	282,3
	Taxa de recessão de vazão (m <sup>3</sup> /s/dia)	-216,1	-527,2	-232,6	-214,7
	Nº de reversões	84,5	181,8	56,4	94,7

## DISCUSSÃO

Neste estudo, foram utilizadas métricas do método IHA para estimar os efeitos da cascata de reservatórios do rio Paraná sobre a variabilidade natural de vazões onde hoje está instalada a UHE Porto Primavera. Convém ressaltar que além de quantificar o grau de alteração hidrológica sobre o regime de vazões, o IHA possui atributos que permitem sugerir quanto as perturbações antrópicas sobre variáveis hidrológicas podem afetar ecossistemas fluviais. Em um estudo similar na bacia hidrográfica do rio Dongjian, sul da China, Chen et al. (2010) relatam que através do método RVA foi possível visualizar alterações hidrológicas significativas causadas pela construção de barragens e potenciais ameaças a espécies de animais selvagens, além de endossar a aplicação do método para identificar tendências e padrões hidrológicos.

Os resultados do trabalho evidenciam que as operações de reservatórios desfiguraram os padrões naturais de vazões nos seguintes aspectos: magnitude, frequência, duração de eventos extremos, período de ocorrência desses eventos e gradiente de vazões.

Foi observado que no período de ascensão do hidrograma (setembro a fevereiro), há a seguinte prática na UHE-Porto Primavera: Nos três primeiros meses, são liberadas com maior frequência vazões com magnitudes acima do percentil 67 (categoria alta), conseqüentemente, acima das vazões médias observadas em regime natural. Por outro lado, os três últimos meses são utilizados para amortecer os maiores picos de vazões, onde as magnitudes de vazões estão mais frequentes abaixo do percentil 33, ou seja, abaixo das médias observadas em regime natural. No caso do período de recessão do hidrograma (março a agosto), os dois primeiros meses também são usados para amortecimento do reservatório, com vazões inferiores às médias em regime natural. Quanto aos demais meses, seguem com vazões mais frequentes superiores ao percentil 67.

Tais comportamentos elevaram a velocidade de ascensão e recessão do hidrograma em mais de 100%, resultando em maiores frequências de altos pulsos de vazões ao ano, porém com reduções de 48,30% nas durações desses eventos. Segundo Stevaux (2009), após o fechamento da UHE-Porto Primavera, os níveis de água variam entre 0,5 a 1 metro diariamente, intensificando os processos erosivos e modificando a morfologia fluvial.

Quanto aos eventos extremos, as vazões máximas de 1 dia atingiam em regime natural em média 19.374,9 m<sup>3</sup>/s e com a presença de reservatórios, o comportamento médio dessa variável é da ordem de 14.255,6 m<sup>3</sup>/s. Stevaux (2009), relata que no período pré-barragem, o rio Paraná apresentava frequentemente picos de inundações superiores a 20.000 m<sup>3</sup>/s, e que com o funcionamento da UHE-Porto Primavera, os picos de cheias foram menores que 15.000 m<sup>3</sup>/s. Essa informação é bastante relevante para estimativa da área da planície de inundação que não faz mais troca de nutrientes com o rio à jusante do reservatório e dos impactos ambientais e econômicos em comunidades ribeirinhas. De acordo com Agostinho et al. (2004), a reprodução de espécies migratórias de peixes no rio Paraná, dependem de elevados níveis de água para que obtenham sucesso na desova e que a duração desses eventos são fundamentais

para o recrutamento de juvenis. O autor destaca também que uma adequada operação de reservatórios pode melhorar esse recrutamento, principalmente para espécies migratórias.

## CONCLUSÕES

O método RVA apresentou bons resultados nas análises de alterações em cada aspecto do regime hidrológico, ou seja, foi possível diagnosticar alterações em diversos pontos do hidrograma do rio Paraná. Suas métricas também são úteis para simular cenários futuros do uso e ocupação do solo na bacia, e quantificar seus efeitos sobre aspectos socioeconômicos em comunidades ribeirinhas adaptadas à variabilidade natural de vazões. Apesar da grande aceitação da abordagem do RVA na comunidade científica, esse método deve ser configurado de acordo com as características do local, por exemplo, os limites para determinar altos e baixos pulsos de vazões podem ser ajustados através da curva-chave da seção estudada. Na ausência de informações sobre a relação entre processos hidrológicos e ecológicos, os resultados obtidos com o RVA podem ser usados preliminarmente para classificar impactos em ecossistemas fluviais. No caso de locais com disponibilidade de dados desses ecossistemas, as classificações desses impactos devem ser criteriosamente alinhadas com as respostas desses sistemas às perturbações antrópicas na bacia.

Neste estudo, também foi possível identificar algumas limitações do RVA ao adotar a categoria do meio (entre os percentis 33 e 67) como referência para estimativa de alteração hidrológica, pois há uma limitação das análises quando se despreza as frequências de vazões menor ou igual ao percentil 33, oriundas de anos secos (com baixa pluviosidade) e frequências de vazões acima do percentil 67, proporcionadas por anos úmidos (alta pluviosidade). Outro ponto a destacar, é que podem ocorrer situações similares ao que se observa no mês de abril (grupo I), onde não houve alterações nas frequências da categoria do meio, ou seja, a FO é igual a FE, e por esse motivo o grau de alteração não foi computado. É possível notar através da Figura 4, que houve uma transferência de frequências da categoria alta para a categoria baixa, onde a primeira sofreu redução de 75% e a segunda recebeu um incremento de 75%. Analisando esse caso, qual seria o grau de impacto atribuído para essa variável? Uma alternativa para mitigar essas limitações é tomar como base o valor médio das alterações das três categorias, assim, o risco de subestimar ou superestimar o grau de impacto seria menor.

Portanto, utilizando a configuração padrão do método RVA, estima-se que a cascata de reservatórios na bacia do rio Paraná gerou alterações hidrológicas sobre o regime natural de vazões que variam em média de moderadas (grupos I, III e IV) a severas (grupos II e V), onde as variáveis que apresentaram maiores graus de impactos são aquelas relacionadas a eventos extremos.

## AGRADECIMENTOS

À CESP pela cortesia de ceder os dados de vazões

observadas na UHE-Porto Primavera, ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas (PPGRHS) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Alagoas (FAPEAL) pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L.C.; VERÍSSIMOS, S.; OKADA, E.K. Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Parana River: effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Reviews Fish Biology and Fisheries*, v. 14, p. 11–19, 2004.
- ANA. *Qualificação de dados Hidrológicos e Reconstituição de Vazões Naturais no País*. Brasília-DF, 2011. 126 p.
- ANA. *Região Hidrográfica do Paraná*. 2013a. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/parana.aspx>. Acesso em 06 fev. 2013.
- ANA. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília-DF, 2013b.
- BLACK, A. R.; ROWAN, J. S.; DUCK, R. W.; BRAGG, O. M.; CLELLAND, B. E. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 15, p. 427–446, 2005.
- CHEN, Y.D.; YANG, T.; XU, C.; ZANG, Q.; CHEN, X.; HAO, Z. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 24, p. 9–18, 2010.
- CESP. *Relatório de Sustentabilidade*. São Paulo-SP, 79 p, 2009.
- GAO, Y.; VOGEL, R. M.; KROLL, C. N.; POFF, N. L.; OLDEN, J. D. Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, v. 374, p. 136–147, 2009.
- GORMAN, G. T.; KAAR, J. R. Habitat Structure and Stream Fish Communities. *Ecology*, v. 59, p.507-515, 1978.
- JIANG, L.; BAN, X.; WANG, X.; CAI, X. Assessment of Hydrologic Alterations Caused by the Three Gorges Dam in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China, *Water*, v. 6, p. 1419-1434, 2014.
- KENNARD, M. J.; MACKAY, S. J.; PUSEY, B. J.; OLDEN, J. D.; MARSH, N. Quantifying Uncertainty in Estimation of Hydrologic Metrics for Ecohydrological Studies. *River Research and Applications*, v. 26, p. 137–156, 2010.
- ITAIPU BINACIONAL. *Rio Paraná*, 2013. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/energia/rio-parana>. Acesso em: 25 jan. 2013.
- OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing stream flow regimes. *River Research and Applications*, v. 19, n.2, p. 101-121, 2003.
- ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Séries Históricas de Vazões. 2012. Disponível em: [http://www.ons.org.br/operacao/vazoes\\_naturais.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx). Acesso em: 20 nov. 2012.
- POFF, N. L.; ALLAN, M. B.; BAIN, J. R.; KARR, K. L.; PRESTEGAARD, B. D.; RICHTER, R. E.; SPARKS E, J. C.; STROMBERG. The Natural Flow Regime. *Bioscience*, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.
- POFF, N. L.; RICHTER, B.D.; ARTHINGTON, A. H.; BUNN, S. E.; NAIMAN, R. J.; KENDY, E.; ACREMAN, M.; APSE, C.; BLEDSOE, B. P.; FREEMAN, M. C.; HENRIKSEN, J.; JACOBSON, R. B.; KENNEN, J. G.; MERRITT, D. M.; O'KEEFFE, J. H.; OLDEN, J. D.; ROGERS, K.; THARME, R. E.; WARNER, A. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, v. 55, p. 147–170, 2010.
- RICHTER, B.D.; BAUMGARTNER, J.V.; POWELL, J. A Method for Assessing hydrologic Alteration Within Ecosystem. *Conservation Biology*, v. 10, n. 4, p. 1163-1174, Aug. 1996.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGINGTON, R.; BRAUN, D. P. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, v. 37, n. 1, p. 231-249, 1997.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; BRAUN D. P.; POWELL J. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers-Research & Management*, v. 14, n.4, p. 329-340, 1998.
- STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 113, p. 230–238, 2009.
- SUN, T.; FENG, M. L. Multistage Analysis of Hydrologic Alterations in the Yellow River, China. *River Research and Applications*, v. 29, p. 991–1003, 2013.
- SUEN, J. P. Potential impacts to freshwater ecosystems caused by flow regime alteration under changing climate conditions in Taiwan. *Hydrobiologia*, v. 649, p.115–128, 2010.
- TNC. The Nature Conservancy. *Indicators of Hydrologic Alteration* :version 7 User's Manual. 2007.
- TRUSH, W. J.; MCBAIN, S. M. and LEOPOLD, L. B. Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 11858, 2000.

WHARTON C. H; LAMBOU V. W; NEWSOME, J.; WINGERPV; GADDY L.L; MANCKE, R. The fauna of bottomland hardwoods in the southeastern United States. Pages 87-160 in Cl: JR, Benforado J, eds. *Wetlands of botto & land hardwood forests*. New York: Elsevier Scientific Publishing Co.1981.

YANG, T.; XU, C. Y.; CHEN, X.; SINGH, V. P.; SHAO, Q. X.; HAO, Z. C.; TAO, X. Assessing the Impact of Human Activities on Hydrological and Sediment Changes (1953–2000) in nine Major Catchments of The Loess Plateau, China. *River Research and Applications*, v. 26, p. 322–340, 2010.

ZHANG, Q.; XIAO, M.; LIU, C. L.; SINGH, V. P. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River basin, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 28, p.2119–2131, 2014.

ZHANG, Q.; XU, C. Y.; CHEN, Y. D.; YANG, T. Spatial assessment of hydrologic alteration across the Pearl River Delta, China, and possible underlying causes. *Hydrological Processes*, v. 23, p.1565–1574, 2009.