

Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios

Antônio D. Benetti, A. Eduardo Lanna

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Caixa Postal 15029
91501-970 Porto Alegre, RS - antonio.benetti@ufrgs.br, lanna@iph.ufrgs.br*

Maria Salete Cobalchini

*Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM - Rua Carlos Chagas, 55
90030-020 Porto Alegre, RS - msalete@fepam.rs.gov.br*

Recebido: 11/01 - revisão: 02/03 - aceito: 05/03

RESUMO

Este trabalho apresenta metodologias para a determinação de vazões ecológicas em rios. Estas vazões têm o objetivo de assegurar condições mínimas para a manutenção de ecossistemas aquáticos. Além da descrição dos métodos, este trabalho apresenta também os principais fatores físicos importantes para os organismos aquáticos em rios, os níveis de vazões ecológicas, a classificação de métodos e as relações entre vazões e benefícios. São também apresentadas as práticas adotadas em alguns estados brasileiros e em outros países do mundo.

Palavras-chave: *vazões ecológicas; ecossistemas.*

INTRODUÇÃO

A água suporta funções de grande valor para os seres humanos. Estas funções podem ser categorizadas como: (1) manutenção da saúde pública, (2) desenvolvimento econômico, (3) recreação e (4) preservação do equilíbrio ecológico. Os serviços oferecidos pela água dependem, em certo grau, da manutenção de suas características hidrológica, morfológica, química e ecológica. O balanço adequado entre utilização da água e manutenção de sua estrutura natural permite o uso continuado da água, no presente e no futuro. Quando este balanço não é resguardado, funções exercidas pela água deixam de existir, com enormes prejuízos sociais. Exemplos destas situações encontram-se descritos em Goldwater (1971), Clarke (1991), Pratt (1997), Gleick (1998) e Folha de São Paulo (2000). Uma das variáveis requeridas para possibilitar a continuidade das funções oferecidas pela água é a manutenção de vazões mínimas que suportem o ecossistema aquático. Estas vazões têm sido chamadas de residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais. Na literatura inglesa, vazões mínimas são freqüentemente denominadas de "instream flows minimum requirements". Estas vazões são definidas através de valores numéricos que representam a quantidade de água que permanece no leito do rio depois de retiradas para atender usos externos tais como abastecimento público, industrial, irrigação e, em algumas instâncias, energia elétrica. Em algumas situações, vazões mínimas são também fixadas para atender atividades de recreação.

O objetivo deste trabalho é apresentar metodologias para fixação de vazões mínimas em rios, assim como introduzir as práticas adotadas no Brasil e em outros países. Me-

todologias para fixação de requerimentos mínimos de água em lagos e águas subterrâneas, embora sejam obviamente importantes, não são analisadas neste trabalho.

FATORES FÍSICOS IMPORTANTES PARA OS ORGANISMOS AQUÁTICOS EM RIOS

Na fixação de vazões ecológicas, alguns dos métodos desenvolvidos levam explicitamente em consideração variáveis físicas importantes nas diversas etapas de desenvolvimento de organismos aquáticos. Segundo Allan (1995), os fatores físicos mais importantes para organismos aquáticos são corrente, substrato, temperatura e oxigênio.

As correntes afetam os organismos em uma variedade de maneiras. Por exemplo, as correntes transportam nutrientes e removem dejetos. Muitas espécies de plantas e de animais estão adaptadas para viverem em zonas mais lentas ou mais rápidas das seções transversais de rios, mas não em ambas. As formas corporais dos organismos aquáticos apresentam adaptações que possibilitam seus movimentos contra ou a favor de correntezas. Correntes afetam também a distribuição de algas em rios. Algas aderidas a substratos rígidos predominam em águas velozes enquanto que plantas vasculares com raízes são encontradas em locais de velocidades baixas e leitos macios.

O substrato é composto pelos materiais minerais formadores do leito e laterais de rios. Algumas vezes, o termo substrato inclui também a cobertura, a qual refere-se a materiais que se projetam sobre o corpo d'água, tais como vegetação, árvores caídas, folhas e raízes. A composição mine-

ral do substrato é determinada, em grande parte, pela velocidade de correnteza e pelo material componente da rocha matriz. Há uma tendência do tamanho do material que compõe o substrato decrescer em direção à foz dos rios. Assim, é comum encontrar-se pedras e pedregulhos em leitos de rios em áreas montanhosas e nascentes, e leitos arenosos em áreas planas e de foz. Muitos organismos aquáticos apresentam afinidades com tipos específicos de substratos. Por exemplo, muitos peixes selecionam substratos rígidos tais como pedras e pedregulhos para reprodução e desova. Nestes locais, peixes podem formar ninhos de tal forma a proteger ovas e esperma de serem varridos pelas corredeiras. A porosidade das pedras garante também o suprimento de oxigênio através da circulação da água pelos interstícios.

A temperatura de águas correntes apresenta variações temporais e locais devido a clima, altitude, faixa de mata ciliar e importância relativa da contribuição de águas subterrâneas. Todos os organismos têm sua distribuição limitada a certas latitudes e altitudes, que se refletem em faixas de temperatura viáveis para suas sobrevivências. A temperatura afeta o metabolismo dos organismos, regulando muitas atividades do ciclo de vida, tais como acasalamento, reprodução, desenvolvimento de ovos e crescimento. Em rios de pequena largura, sombras providas pela mata ciliar alteram as temperaturas de verão. Por exemplo, a derrubada da vegetação em uma pequena bacia hidrográfica na Inglaterra ocasionou um acréscimo na temperatura da água no verão em 15°C (Allan, 1995). A derrubada de matas ciliares por atividade humana tem sido uma importante causa da extinção e decréscimo na variedade e abundância de peixes em rios norte-americanos (Doppelt et al., 1993).

A solubilidade de oxigênio na água decresce com o aumento de temperatura; por outro lado, as atividades metabólicas (conseqüentemente o consumo de oxigênio) incrementam com a temperatura. Isto ocasiona que os organismos encontrem maior stress em águas com temperaturas elevadas do que em águas com temperaturas mais frias. Esta condição pode ser agravada se a estação de temperaturas mais altas coincidir com os períodos de estiagem e os de maiores demandas de água para atendimento das necessidades humanas. Tal condição configura uma situação crítica na qual muitos organismos não conseguem satisfazer seus requerimentos de oxigênio. Outro fator que afeta a disponibilidade de oxigênio aos peixes é a interação com as correntes. Oxigênio é transportado pelas estruturas respiratórias dos peixes por difusão. Conseqüentemente, a água pode ficar sem oxigênio dissolvido nas imediações dos organismos. Como a difusão depende do gradiente de concentração, a corrente tem o papel fundamental de renovar a água em contato com os peixes, provendo o necessário gradiente de concentração de oxigênio dissolvido requerido para respiração.

NÍVEIS DE VAZÕES ECOLÓGICAS

Vazões ecológicas podem ser estabelecidas considerando vários graus de proteção ao ambiente aquático. Por exemplo, Beecher (1990) fez a seguinte classificação hierárquica dos graus de proteção providos por vazões ecológicas: (a) restauração das condições pristinas, (b) não degradação com restauração, (c) não degradação, (d) nenhuma perda líquida, (e) fixação de percentagem de perda, (f) nenhuma perda de diversidade genética e (g) sobrevivência de populações.

Tunbridge e Glenane citado por McMahon (1992) propuseram os seguintes níveis de vazões ecológicas após estudarem as necessidades de uma espécie de peixe na Austrália:

1. Vazão ecológica ótima, promovendo excelentes condições para a sobrevivência, reprodução e crescimento de peixes. Este nível de vazão é recomendado especialmente para épocas seguindo períodos de stress;
2. Vazão ecológica mínima, garantindo a manutenção ou pequena redução na abundância de peixes. Esta vazão seria indicada para os anos com chuvas regulares;
3. Vazão ecológica de sobrevivência, a qual implicaria na redução na abundância de peixes, mas não em perdas de espécies. Esta vazão seria indicada para anos de baixa precipitação.

Além destes níveis de vazões ecológicas, os autores recomendam um nível de vazão de limpeza com o objetivo de remoção de sedimentos finos e sais de zonas estagnadas.

CLASSIFICAÇÃO DE MÉTODOS PARA A FIXAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS

Os métodos para o estabelecimento de vazões ecológicas têm sido classificados em vários grupos. McMahon (1992) utiliza três grupos: (1) métodos das descargas históricas, (2) métodos de limites mínimos de sobrevivência e (3) métodos de simulação de habitats. Stalnaker et al. (1995) dividem em (1) técnicas de fixação de padrões, (2) técnicas intermediárias e (3) técnicas incrementais. Tharme (apud King e Louw, 1998) identificou quatro grupos de métodos: (1) métodos hidrológicos, (2) métodos hidráulicos de classificação, (3) métodos de classificação de habitats e (4) métodos holísticos.

O presente trabalho subdividiu os métodos em seis categorias, a saber: (1) métodos hidrológicos, (2) métodos de classificação hidráulica, (3) métodos utilizando regressões múltiplas, (4) métodos de classificação de habitats, (5) métodos holísticos e (6) métodos informais. A seguir faz-se uma introdução a cada um destes métodos.

METODOLOGIAS PARA A FIXAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS

Métodos hidrológicos

Os métodos hidrológicos usam dados históricos de descargas para estabelecer requerimentos mínimos de vazões em rios. Eles são:

Método da vazão média mínima de 7 dias com período de recorrência de 10 anos (${}_7Q_{10}$) - Esta vazão é obtida computando-se as médias móveis das vazões médias diárias com janelas de 7 dias ao longo de um ano hidrológico. A mínima dessas médias móveis é retida. O processo é repetido para cada ano hidrológico da série histórica, obtendo-se uma série de valores mínimos de vazões médias em 7 dias consecutivos, para cada ano. Estas vazões são ordenadas em ordem crescente de magnitude, sendo estimadas suas probabilidades cumulativas de ocorrência e períodos de retorno. Desta tabela pode-se determinar a vazão mínima de 7 dias com período de retorno de 10 anos.

A ${}_7Q_{10}$ tem sido a vazão utilizada em estudos de qualidade de água para determinar-se a eficiência com que poluentes devem ser removidos em estações de tratamento de águas residuárias para que não ocorra violação dos padrões de qualidade da água em corpos receptores (Thomann e Mueller, 1987). Esta vazão, entretanto, é considerada por Stalnaker et al. (1995) como sendo excessivamente baixa para a manutenção de habitats aquáticos.

Método da curva de permanência de vazões - Este método utiliza valores da curva de permanência para estabelecer vazões ecológicas em uma base mensal ou anual. A curva de permanência é calculada através dos dados históricos de vazões, os quais são ordenados de forma crescente. A permanência de cada vazão observada é o percentual de vezes em que ela foi igualada ou superada.

Método das vazões anuais mínimas de 7 dias - Neste método, as mínimas das médias móveis das vazões diárias com janelas de 7 dias ao longo do ano hidrológico são retidas. O valor adotado como vazão mínima é a média dos valores retidos. Uma variação deste método é dada pelo produto entre o valor determinado e um coeficiente que varia entre 0,5 a 1,0, dependendo dos objetivos de qualidade para o rio sendo analisado.

Método de Tennant (ou Método Montana) - Este método foi desenvolvido a partir de observações sobre habitats e vazões feitas durante 10 anos nos estados americanos de Montana, Nebraska e Wyoming (Tennant, 1976). De acordo com Matola e Leestemaker (2000), o método de Tennant tem sido o segundo método mais utilizado para determinação de vazões mínimas em países desenvolvidos,

Tabela 1. Recomendação de vazões pelo método de Tennant para peixes, vida aquática e recreação; fonte: Tennant, 1976.

Condição do rio	Vazão recomendada	
	Outubro-março (seco)	Abril-setembro (chuvoso)
“Flushing” ou máxima	200% da vazão média anual	
Faixa ótima	60 - 100% da vazão média anual	
Excepcional	40%	60%
Excelente	30%	50%
Boa	20%	40%
Regular ou em degradação	10%	30%
Má ou mínima	10%	10%
Degradação severa	10% a zero da vazão média anual	

segundo o método IFIM, adiante analisado. Baseado no histórico das vazões fluviais, o autor categorizou as condições de habitat para os rios em função das estações do ano e percentagem da vazão média anual. A Tabela 1 apresenta as recomendações do método.

Para vazões superiores a 30% da vazão média anual, supõe-se que condições satisfatórias de profundidades, larguras e velocidades são atingidas. Vazões correspondentes a menos de 10% da vazão média anual caracterizariam uma situação crítica para os organismos aquáticos - haveria dificuldade de passagem em trechos dos rios, e excessiva concentração de peixes em trechos localizados. É recomendado também o uso de vazões altas, periodicamente, para remoção de silte, sedimentos e outros materiais finos dos leitos dos rios.

Método da vazão aquática de base - Esta técnica utiliza a vazão mediana do mês de menores vazões do ano como o valor mínimo de vazão residual a ser estabelecido (Kulik, 1990). Esta vazão corresponderia ao fluxo de base do rio. Além de fixar o valor mínimo, a técnica estabelece que vazões adicionais podem ser necessárias para atender as necessidades de desova e incubação de peixes.

Método da mediana das vazões mensais - Este método determina os valores de vazões residuais correspondentes aos valores das medianas das vazões para cada mês do ano. Os valores residuais simulam os padrões naturais de variação de vazões que ocorrem ao longo do ano (Bovee apud Stalnaker et al., 1995).

Método da área de drenagem - Nos casos em que a vazão não é medida, utiliza-se uma variável que a substitua. Por exemplo, em um estudo realizado na região de New England, EUA, as vazões residuais foram determinadas em função da área de drenagem da bacia hidrográfica. Neste estudo, foram recomendadas vazões residuais de 5,5 l/s km² de área de drenagem (Larson apud Stalnaker et al., 1995).

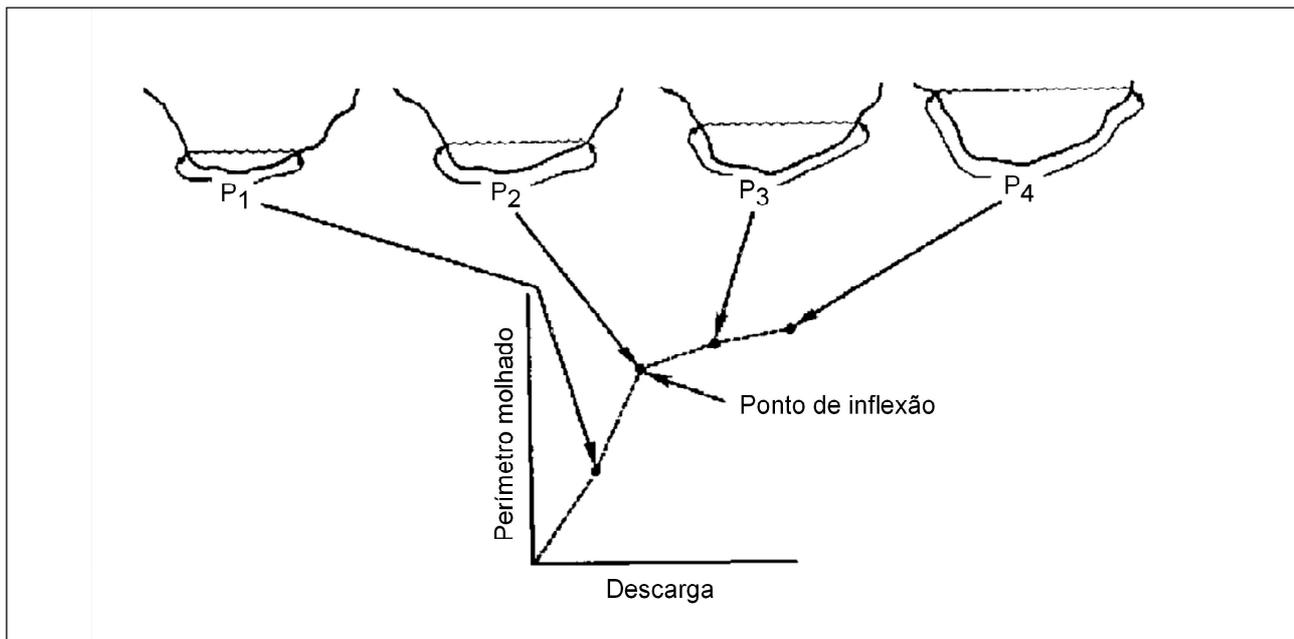


Figura 1. Método do perímetro molhado para estimar vazões mínimas. Fonte: Stalnaker et al. (1995).

Métodos de classificação hidráulica

Estes métodos utilizam um ou mais parâmetros para prever modificações nos habitats aquáticos. Exemplos de parâmetros hidráulicos utilizados são profundidade, perímetro molhado, velocidade, raio hidráulico e área molhada da seção. O Método do Perímetro Molhado supõe que as necessidades de desova e passagem de peixes em um rio são garantidas quando é mantida uma descarga mínima que é determinada em uma curva relacionando perímetros molhados com vazões. Tipicamente, o analista escolhe um trecho de rio considerado crítico para a manutenção das funções dos organismos aquáticos. Em uma ou mais seções no trecho escolhido, medem-se descargas e os correspondentes perímetros molhados. A descarga escolhida é aquela correspondente ao ponto de inflexão no gráfico. Este ponto representa a vazão acima da qual a taxa de aumento do perímetro molhado começa a diminuir. A Figura 1 exemplifica o processo de determinação da vazão ecológica por este método.

Métodos utilizando regressões múltiplas

Estes métodos utilizam regressões múltiplas para correlacionar variáveis ambientais com o tamanho das populações de peixes e invertebrados. Essas variáveis incluem atributos da bacia hidrográfica (altitude, área de drenagem, ordem do rio), do regime de vazões (vazões médias diárias, vazões médias sazonais, vazões de base), da qualidade da água (temperatura, pH, alcalinidade, dureza, condutividade,

concentração de nitratos) e estrutura do canal (profundidade média, profundidade máxima, largura, velocidade, substrato dominante, percentagem da cobertura, partes profundas e corredeiras) (Petts e Maddock, 1994). A Equação (1) é uma regressão múltipla relacionando um índice representando a população de invertebrados e variáveis de habitats. Esta equação foi ajustada para dados coletados em 28 rios da Inglaterra:

$$BMWP = a + b \cdot CS + c \cdot Q + d \cdot M + e \cdot H \quad (1)$$

sendo BMWP o escore baseado na população de invertebrados; a, b, c, d, e são coeficientes da regressão; CS é o escore baseado nas concentrações de amônia e oxigênio dissolvido; Q é a vazão com probabilidade de excedência de 95% dividida pela largura do canal; M e H são índices de cobertura e hidráulico, respectivamente. Obteve-se um coeficiente de determinação (r^2) de 0,88.

Métodos de classificação de habitats

Estes métodos combinam as características hidráulicas de um trecho de rio, tais como velocidade, profundidade e substrato, com preferências de habitat para uma dada espécie. Um exemplo é o *Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)*.

O IFIM, um dos métodos mais usados, foi desenvolvido pelo grupo de estudos de descargas mínimas do U.S. Fish and Wildlife Service na Colorado State University, Estados Unidos. Ele tem origem no final dos anos 70 e início

dos anos 80, quando muitos reservatórios para geração de energia elétrica tiveram que renovar suas licenças de operação. Desde então, o método tem sido aperfeiçoado e aplicado em centenas de estudos por agências federais e estaduais nos Estados Unidos (Stalnaker et al., 1995).

Um dos fatores que levaram ao desenvolvimento do IFIM foi o fato de que era considerado que os métodos estabelecendo vazões mínimas não ofereciam proteção suficiente para a manutenção da vida aquática. IFIM é um método incremental, simulando a qualidade e quantidade de habitats com variações nas vazões. O custo e o tempo de duração do processo são variáveis, mas estima-se que 80% dos estudos são completados em um ano a um custo inferior a \$ 45.000,00 (Stalnaker et al., 1995). A metodologia IFIM desenvolve-se em cinco fases, descritas a seguir.

Fase de identificação do problema - Esta etapa abrange dois componentes, a análise legal-institucional e a análise física. A primeira identifica todas as partes envolvidas com o projeto proposto, suas preocupações, as necessidades de informações, e como se desenvolverá o processo de decisão. A análise física, por sua vez, determina (a) a localização e a extensão geográfica das mudanças físicas e químicas do sistema, e (b) os recursos aquáticos de maior preocupação, juntamente com os objetivos de seu manejo.

A etapa de identificação é, em geral, desenvolvida através de encontros entre os órgãos de manejo e de regulação. O proponente do projeto deve indicar uma alternativa preferencial, e esta preferência deve se traduzir em séries hidrológicas supondo que o projeto está em operação como proposto. Nesta etapa deve ser desenvolvida também uma série hidrológica de base, representando ou a situação atual ou outra situação que seja consensualmente aceitável. Estas séries hidrológicas estabelecem a base para o planejamento do estudo.

Fase de planejamento do estudo - Nesta fase são identificadas as informações necessárias para atender as preocupações de cada grupo afetado pelo projeto, o que já existe, e o que será necessário obter. Resultará na elaboração de um documento conciso descrevendo quem fará o que, quando, onde, como, e por quanto. O plano deverá ser exequível, considerando os prazos, e recursos humanos e financeiros disponíveis. O planejamento do estudo levará a identificação de (a) a escala temporal e espacial das avaliações, (b) as variáveis importantes para as informações desejadas, e (c) como as informações serão obtidas, se não existirem.

Fase de Implementação do Estudo - Esta fase compreende a coleta de dados, a calibração de modelos, a simulação de alternativas, e a síntese dos resultados. A coleta de dados pode incluir temperatura, pH, oxigênio dissolvido, parâmetros biológicos, e medidas hidrológicas e hidráulicas tais como vazão, velocidade, altura d'água, substrato e co-

bertura. Estas variáveis descrevem a relação entre vazão e quantidade e qualidade de habitat disponível. Obtém-se uma série temporal de habitat de referência, a qual determina a quantidade total de habitat que estaria disponível para cada etapa de vida de cada espécie ao longo do tempo. A referência de habitat oferece a base na qual julgamentos podem ser feitos sobre propostas de manejo alternativas. Modelos de simulação devidamente calibrados são utilizados para simular novos projetos ou manejos diferentes de projetos já existentes.

Fase de Análise de Alternativas - Essa fase compara as alternativas propostas pelas partes interessadas com a condição de referência. O propósito é avaliar os impactos das alternativas, iniciar um processo de negociação, e criar novas alternativas mais compatíveis com os múltiplos interesses. São examinadas as alternativas no que se refere à efetividade, viabilidade física, riscos, e economia. A efetividade avalia a sustentabilidade das alternativas e os custos e benefícios em termos de manutenção do habitat de cada alternativa; a viabilidade física avalia se reservatórios irão secar, se direitos de uso de água são respeitados, e se haverá água suficiente para todos os usos; os riscos examinam a frequência com que os sistemas biológicos poderão entrar em colapso, e se os efeitos são reversíveis. O aspecto econômico avalia os custos e benefícios de cada alternativa.

Fase de resolução do problema - Nesta fase, os participantes devem integrar os conhecimentos acerca dos recursos biológicos e necessidades sociais para chegarem a uma solução negociada que ofereça um balanço entre valores conflitantes. De acordo com Stalnaker et al. (1995), em geral, uma solução ótima não pode ser identificada com precisão científica porque (1) valores biológicos e econômicos não são inteiramente mensuráveis, (2) informações coletadas e modelos de simulação não são perfeitos, (3) pessoas racionais chegam a diferentes conclusões, e (4) incertezas sobre o futuro estarão sempre presentes. Nesta fase procura-se identificar oportunidades para que as retiradas de água maximizem os benefícios para as partes interessadas. Stalnaker et al. (1995) sugerem que, para os casos em que as condições de habitat para a manutenção das espécies de interesse sejam boas ou ótimas, a melhor alternativa é aquela que oferece o menor desvio das condições de referência.

Os modelos PHABSIM e RHYHABSIM - Uma das ferramentas analíticas utilizadas no IFIM é o modelo de simulação PHABSIM, a forma abreviada para *Physical Habitat Simulation System*. Este modelo é utilizado na fase de implementação do estudo. Entretanto, muitas vezes PHABSIM tem sido a única parte da metodologia utilizada, e muitos autores usam PHABSIM e IFIM como sinônimos (Scott e Shirvell, 1987).

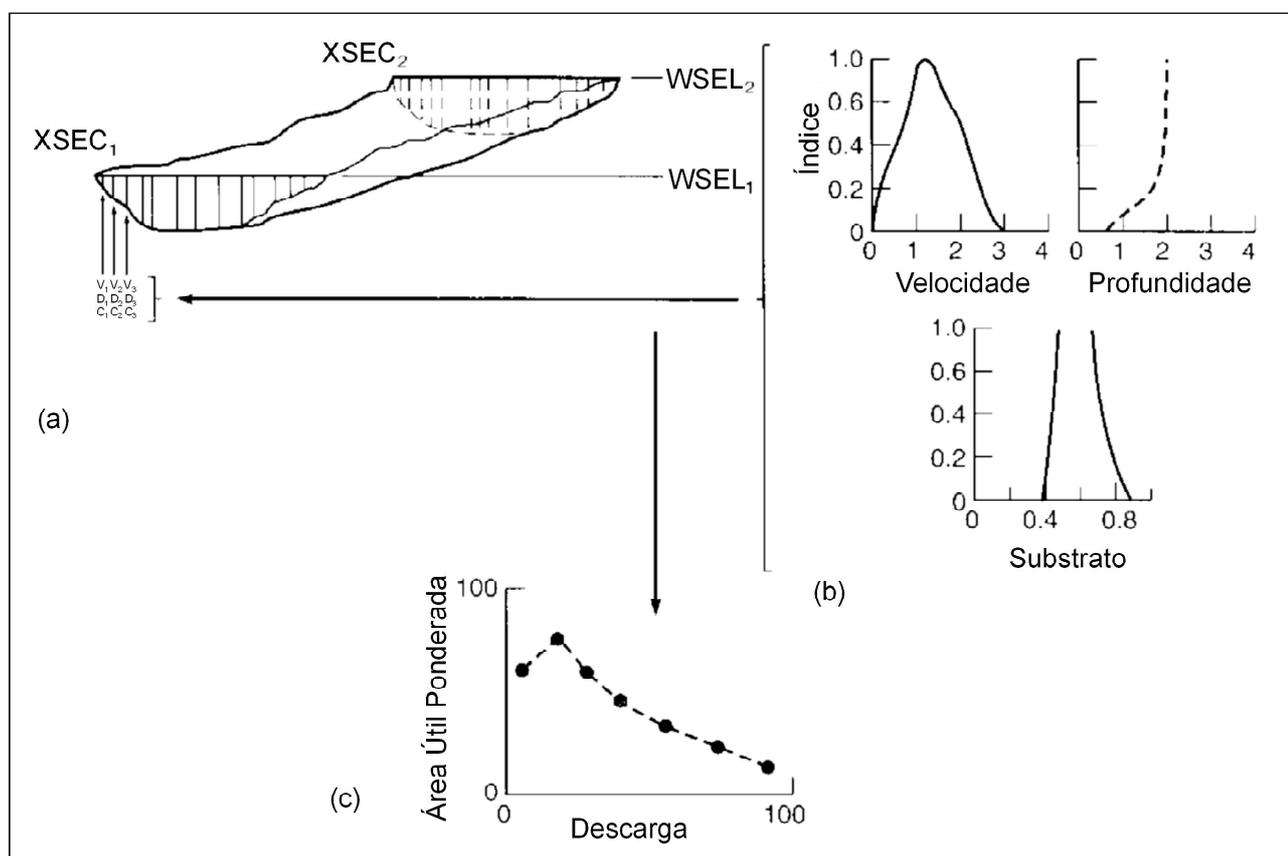


Figura 2. O processo de determinação da curva área útil ponderada versus descarga. Fonte: Allan (1995).

PHABSIM tem dois componentes principais, o hidráulico e o de habitat. O componente hidráulico simula profundidades e velocidades da água em função de vazões. O modelo hidráulico é calibrado a partir de levantamentos de campo de medidas de profundidade, velocidade, e tipo de substrato no leito do rio para diferentes vazões.

O componente de habitat do PHABSIM utiliza índices que variam entre 0 e 1 para avaliar atributos físicos de habitat. Os atributos são velocidade, profundidade, substrato e cobertura. Os índices dos atributos são denominados de “Índices de Adequação de Habitats” (Habitat Suitability Indices). Estes índices variam em função da espécie de peixe e da etapa da vida. Um índice de 1 indica a condição mais favorável do atributo para o habitat. Os índices são desenvolvidos usando (1) observações diretas dos atributos mais freqüentemente usados em uma etapa da vida da espécie em consideração, (2) opiniões de autoridades sobre os atributos requeridos para as etapas da vida, e (3) combinação de observações e opiniões de autoridades. A variação dos índices em função da variação quantitativa dos atributos produz “Curvas de Adequação de Habitats” (Habitat Suitability Curves). Para cada descarga, calcula-se o “Índice Geral de Adequação de Uso para Habitat”, através do produto dos “Índices de Adequação de Habitats”. O valor de “Área Utilizável” (Usable Area), é dado pelo produto entre

o valor do “Índice Geral de Adequação de Uso para Habitat” e a área ou comprimento de rio que é representada pela seção transversal estudada. Repete-se o processo para outras seções do rio, e soma-se todas as áreas utilizáveis. O resultado é um valor chamado “Área Utilizável Ponderada” (Weighted Usable Area). O processo é repetido para outras vazões. Por fim, prepara-se um gráfico relacionando a função “Área Utilizável Ponderada” com descargas. A vazão ótima para uma determinada espécie e estágio de vida é dada pelo valor máximo de “Área Utilizável Ponderada”. A Figura 2 exemplifica as etapas para determinação do gráfico “Área Utilizável Ponderada” versus descarga.

Espécies e estágios de vida diferentes estão presentes simultaneamente em rios; por isto, não haverá uma vazão que suporte condições ótimas de habitat ao mesmo tempo para todas as espécies e estágios de vida. A Figura 3 apresenta um exemplo de aplicação de PHABSIM a três espécies de peixes e dois estágios de vida no rio Kalama no estado de Washington, USA. Observa-se que as vazões ótimas diferem para as espécies e estágios de vida.

Um modelo similar ao PHABSIM foi desenvolvido na Nova Zelândia pelo Centro de Manejo de Peixes de Águas Doces (McMahon, 1992). O modelo denomina-se RHYHABSIM, abreviatura para River Hydraulics Habitat Simulation Program. Este modelo adota os mesmos princípios

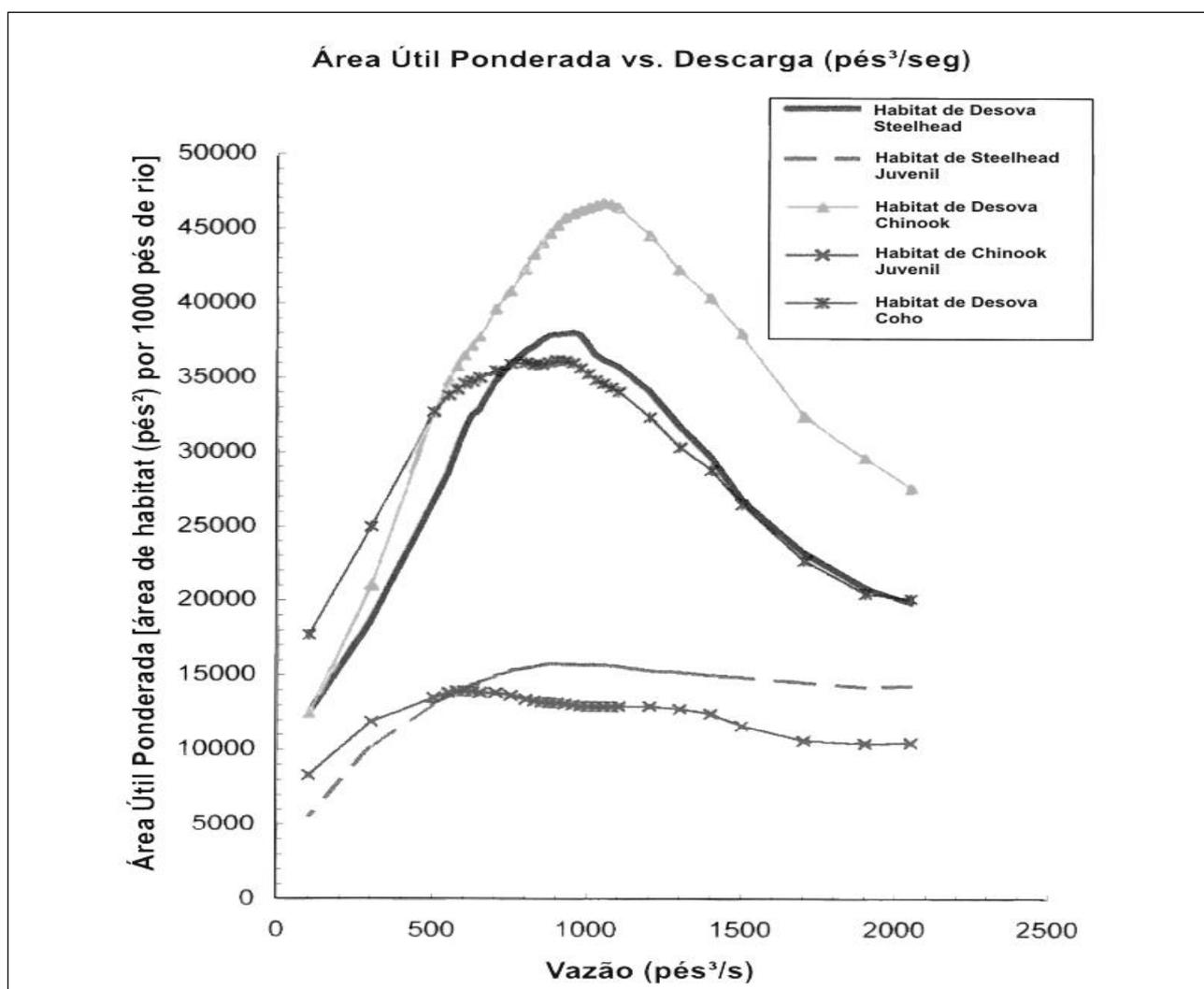


Figura 3. Curvas áreas utilizáveis ponderadas versus descargas para estudo do rio Kalama.

que o PHABSIM, mas é mais simples no sentido de que apresenta um programa único para as simulações hidráulicas e de habitats, enquanto que o PHABSIM permite ao analista escolher entre 5 modelos de simulação de habitat e 4 programas de simulação hidráulica.

Métodos holísticos

Estes métodos consideram as necessidades de todos os componentes de um ecossistema, assim como suas inter-relações, para a determinação da vazão ecológica. O Método da Construção de Blocos (Building Blocks Methodology, BBM) é um exemplo da categoria de métodos holísticos. O método foi desenvolvido paralelamente na África do Sul e Austrália pelo Department of Water Affairs and Forestry e cientistas da University of Cape Town.

A Lei Nacional das Águas promulgada na África do Sul em 1998 determina que todos os corpos hídricos do

País tenham uma Reserva, definida como a soma das vazões requeridas para atender as necessidades básicas humanas e de ecossistemas aquáticos (Republic of South Africa, 1998). O método BBM objetiva determinar as vazões para atender as necessidades de ecossistemas aquáticos.

O Método BBM depende do conhecimento disponível e da opinião de *experts*, reunidos em um processo estruturado de workshops. Nos workshops são reunidos especialistas das áreas de peixes, invertebrados aquáticos, vegetação ciliar, integridade de habitats, geomorfologia fluvial, hidráulicos, hidrólogos, químicos aquáticos e cientistas sociais. O resultado dos workshops é uma descrição quantitativa, no espaço e no tempo, do regime de vazões que deve possibilitar a manutenção do ecossistema do recurso hídrico em um estado de qualidade desejado.

A denominação *Building Block* refere-se aos componentes do regime de vazões que são específicos para o rio sendo estudado. Os “blocos” de vazão usualmente pertencem as seguintes categorias: vazões de base em períodos de estia-

gem, vazões de base em períodos de chuvas, enchentes nas estações chuvosas, pulsos de curta duração (*fresbes*) e vazões sub-superficiais na estação seca. Os mínimos volumes de água para cada “bloco” são determinados, desta forma definindo-se um regime de vazões para manter os ecossistemas aquáticos. O regime de vazões é identificado e descrito em termos de tempo de ocorrência, duração e magnitude (Water Research Commission, 2000). O Método BBM é considerado pragmático e robusto, enfocando ecossistemas em lugar de espécies, podendo ser aplicado onde as disponibilidades de informações e tempo são limitadas (King e Louw, 1998).

As atividades do Método BBM englobam três partes: (1) preparação do *workshop*, (2) execução do *workshop* e (3) atividades pós-*workshop*. A etapa de preparação do *workshop* dura aproximadamente 6 meses, ao final do qual é produzido um documento contendo todas as informações sobre a área de estudo, com capítulos escritos por especialistas. A etapa de execução do *workshop* dura entre 2 a 4 dias, com a participação de aproximadamente 20 especialistas incluindo um coordenador e facilitadores. Desta etapa resulta a definição de um regime de vazões para o corpo d’água de interesse. As atividades pós-*workshop* conectam os resultados do *workshop* com as atividades de planejamento e engenharia para o recurso hídrico em consideração.

Métodos informais

Os métodos informais são aqueles que não se enquadram em nenhuma das categorias descritas nas seções anteriores. Um exemplo de método informal é a negociação direta entre representantes de grupos com interesses conflitantes em relação ao uso da água em um rio. Scott e Shirvell (1987) descrevem o processo de negociação entre grupos de irrigantes e recreação para um rio na Nova Zelândia. Um outro exemplo de método informal é uma pesquisa de opinião entre usuários de um rio ou lago sobre os níveis de água considerados satisfatórios para suportar atividades de recreação.

DISCUSSÃO SOBRE AS METODOLOGIAS

Morhardt (citado por Sarmento e Pelissari, 1999) afirma a existência de cerca de 70 métodos para a determinação de vazões residuais, sendo os métodos IFIM, Tennant, Perímetro Molhado, ${}_7Q_{10}$ e

Fluxo aquático de base os mais usados

As vazões estabelecidas pelo *Método da Vazão Média Mínima de 7 Dias com Período de Recorrência de 10 Anos* (${}_7Q_{10}$) são consideradas por Stalnaker et al. (1995) muito baixas

para as necessidades dos organismos aquáticos. Uma alternativa a vazão ${}_7Q_{10}$ é a adoção do valor médio das mínimas vazões móveis de 7 dias selecionadas cada ano. Este é um dos critérios adotados na Inglaterra.

O *Método do Perímetro Molhado* tem sido aplicado principalmente em rios que apresentam seções transversais relativamente largas, retangulares e pouco profundas, uma vez que a forma do canal influencia os resultados da análise (Stalnaker et al., 1995). Isto limita a aplicação do método.

Embora o *Método IFIM* seja o mais aplicado em países desenvolvidos, há questionamentos em relação ao seu modelo de simulação. Por exemplo, é suposto que existe uma relação linear entre *Áreas Utilizáveis Ponderadas* e *biomassa de peixes*. Em testes de validação, entretanto, Scott e Shirvell (1987) determinaram que esta relação não foi encontrada em 74% dos casos estudados. O modelo supõe também que as únicas variáveis que determinam os locais de preferência de habitat para peixes são profundidade, velocidade, substrato e cobertura. Entretanto, fatores como a presença de outras espécies e disponibilidade de nutrientes podem ser tão ou mais importantes que as variáveis consideradas (Allan, 1995).

O *Método IFIM* não foi considerado apropriado para as condições da África do Sul (King e Louw, 1998). Os requerimentos de informações, tempo, pessoal especializado e recursos financeiros do IFIM não são disponíveis no país (Water Research Commission, 2000). Adicionalmente, IFIM é aplicado para determinar requerimentos de vazões para espécies individuais de peixes, enquanto que o enfoque usado na África do Sul para determinação de vazões é a manutenção de ecossistemas.

Em alguns casos, os resultados obtidos pelo PHABSIM não são melhores do que os obtidos utilizando-se métodos mais simples. Isto é demonstrado por estudo efetuado por Orth e Leonard (apud Allan, 1995). A Figura 4 apresenta as vazões mínimas recomendadas para manter os habitats para peixes em quatro rios no Estado da Virgínia, Estados Unidos, de acordo com os métodos de Tennant, Vazão Aquática de Base, e PHABSIM. Observa-se que a faixa de valores ótimos recomendados pelo PHABSIM encontra-se na envoltória formada pelos valores de 10% e 30% das vazões médias anuais recomendadas pelo método de Tennant para manutenção de condições de habitat que variam entre má a boa (Tabela 1). Os valores recomendados pelo método das vazões de base também se encontram entre as faixas sugeridas pelo método de Tennant. Os valores do fluxo aquático de base foram estabelecidos através da vazão mediana para o mês mais seco do ano.

Os resultados de outro estudo comparando métodos para recomendações de vazões mínimas são apresentados na Tabela 2 (Petts apud Petts e Maddock, 1994). Uma espécie de peixe avaliada em quatro estágios de seu desenvolvimento e quatro invertebrados foram estudados. Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que a vazão ecológica mínima desejável para trutas adultas pelo método PHABSIM

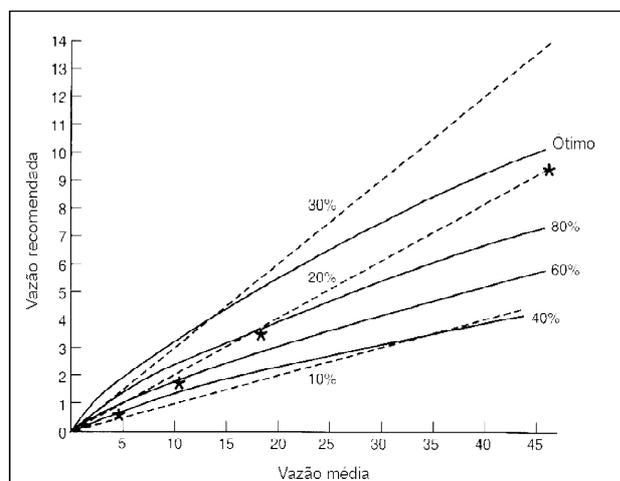


Figura 4. Vazões mínimas recomendadas para manter habitats em quatro rios no estado da Virgínia de acordo com os métodos PHABSIM (linhas sólidas), Montana (tracejadas) e Vazão Aquática de Base (asteriscos). Fonte: Allan, 1995.

Tabela 2. Recomendações de vazões mínimas no estudo de rio na Inglaterra; fonte: adaptado de Petts e Maddock, 1994.

Método	Vazão recomendada (m ³ /s)
Vazão com 95% de permanência	0,300
30% da vazão média anual	0,165
Vazão aquática de base PHABSIM	0,261
Truta	
Adulto	0,280
Desova	0,280
Juvenil	0,170
Alevinos	0,090
Invertebrados	0,127

seria de 0,28 m³/s, a qual aproxima-se da vazão média diária com permanência de 95% do tempo. A Figura 5 apresenta o gráfico descarga versus área útil para trutas adultas e juvenis para o rio estudado. Observa-se que há reduções substanciais na quantidade de habitats quando as vazões são reduzidas abaixo de um valor crítico. Por exemplo, uma vazão de 0,13 m³/s reduz a quantidade de habitat em 50% para trutas juvenis e 100% para trutas adultas. Esta vazão, entretanto, sustentam habitats para invertebrados e alevinos, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Os resultados acima descritos sugerem que, sob condições excepcionais, vazões podem ser reduzidas a uma vazão ecológica mínima emergencial. Embora as trutas adultas não iriam sobreviver nesta vazão, trutas juvenis, alevinos e invertebrados sobreviveriam, com a biota podendo recobrar-se uma vez que as vazões retornassem ao seu estado normal.

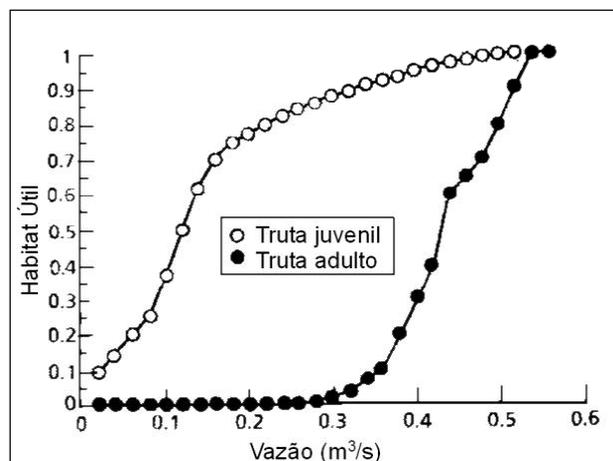


Figura 5. Exemplos de curvas habitat-descargas para trutas adultas e juvenis no rio Babingley, UK. Fonte: Petts e Maddock, 1994.

AS PRÁTICAS ADOTADAS EM OUTROS PAÍSES

Não há uma aplicação rígida de métodos de determinação de vazão residual em outros países do mundo. A escolha do tipo de método a ser utilizado depende, em parte, do porte do empreendimento, da sensibilidade e importância do recurso hídrico, e da disponibilidade de recursos humanos e materiais disponíveis. Nos Estados Unidos, o método IFIM, Instream Flow Incremental Methodology, tem sido usado por agências do governo federal e estaduais em centenas de estudos (Stalnaker et al., 1995). O método tem sido utilizado também no Canadá, Nova Zelândia, Austrália, Noruega, França, África do Sul e Inglaterra (Petts e Maddock, 1994). Métodos mais simples, entretanto, como o de Tennant e o fluxo aquático de base também são aplicados (Allan, 1995; Kulik, 1990).

Na Inglaterra, tradicionalmente, os métodos mais utilizados são os da curva de permanência de vazões e a vazão média anual mínima de 7 dias (Petts e Maddock, 1994). As vazões fixadas no método da curva de permanência representam 95% da permanência.

Na Nova Zelândia, métodos informais de negociação direta têm sido utilizados, assim como métodos estabelecendo vazões residuais em termos de percentagem de vazões médias e métodos incrementais (Scott e Shirvell, 1987).

A África do Sul adota o método de construção de blocos para todos os projetos de aproveitamento de recursos hídricos. Para estudos preliminares, métodos hidrológicos tais como Tennant e curvas de duração são utilizados (King e Louw, 1998). Métodos holísticos baseados em workshops e opiniões de especialistas também têm sido utilizados na Austrália (Arthington et al., apud King e Louw, 1998).

Tabela 3. Critérios de outorga de direito de uso da água em alguns Estados brasileiros.

Estado	Vazão referencial	Critério de outorga *	Vazão ecológica indiretamente estabelecida
PR	$7Q_{10}$	50% da vazão referencial	50% da $7Q_{10}$
MG	$7Q_{10}$	30% da vazão referencial em cursos de água usuais	70% da $7Q_{10}$
PE	Q_{90} diário	Quando o interessado promover regularização, o limite poderá ser superior desde que seja mantida uma vazão residual de 70% da vazão referencial	Exceção à regra, quando for do interesse público
		Poderão ser adotadas vazões residuais inferiores a 70% quando for de interesse público e não causar prejuízos a terceiros	
BA	Q_{90} diário	80% da vazão referencial quando não houver barramento, ou quando houver barramento em cursos de água perenes	20% da Q_{90}
		95% da vazão referencial quando houver barramento em cursos de água intermitentes	5% da Q_{90}
	Vazão regularizada com 90% de garantia	80% da vazão referencial quando não houver barramento ou quando houver barramento em cursos de água perenes	20% da Q_{90}
		95% da vazão referencial quando houver barramento em cursos de água intermitentes	5% da Q_{90}
PB	Vazão regularizada com 90% de garantia	Quando o suprimento for para abastecimento humano, o percentual pode atingir 95% da vazão referencial	10% da Q_{90}
RN		No caso de vazões regularizadas por reservatórios, a vazão residual de 20% da vazão referencial deve escoar para jusante por descarga de fundo ou por qualquer outro dispositivo que não inclua bombas de recalque	10% da Q_{90}
CE	Vazão regularizada com 90% de garantia	Nenhum usuário individualmente receberá outorga superior a 20% da vazão referencial em um dado manancial	10% ou 67% da Q_{90}
		90% da vazão referencial em cursos de água com barramento; em lagos ou lagoas, 33% da vazão referencial	

* Limite de autorizações de retirada de água acumuladas até a seção fluvial.

AS PRÁTICAS ADOTADAS EM ALGUNS ESTADOS BRASILEIROS

As práticas adotadas para a definição da vazão ecológica em diversos estados brasileiros enquadram-se dentro dos métodos hidrológicos. Ao estabelecerem seus critérios de outorga de direitos de uso de água, os estados deixam antever, de forma indireta, suas concepções sobre vazões ecológicas. A Tabela 3 resume as informações sobre critérios de outorga de direitos de uso de água para alguns estados brasileiros. Note-se que todos os estados, com exceção de Minas Gerais e Paraná, estão no Nordeste. O Ceará e o Rio Grande do Norte, por não terem rios naturalmente perenes, mas perenizados por reservatórios, estabeleceram suas vazões ecológicas tendo por base a vazão regularizada com 90% de garantia. Cabe notar que todas as abordagens são destituídas de significado ecológico.

A RELAÇÃO ENTRE VAZÕES E BENEFÍCIOS

Existe uma relação entre os benefícios e as vazões mantidas dentro do leito de rios. Em geral, as necessida-

des de vazões variam em função do método de quantificação adotado e do uso a que a vazão objetiva atender. Entretanto, independente do método adotado e uso da vazão, quase sempre a relação entre benefício e vazão apresenta-se na forma de um U invertido (Figura 6). Pode-se identificar as seguintes fases no gráfico benefício *versus* vazão:

- 1º Fase 1: rápidos incrementos de benefícios com aumento de vazões;
- 2º Fase 2: incrementos decrescentes de benefícios com aumentos de vazões;
- 3º Fase 3: vazões de benefícios máximos;
- 4º Fase 4: reduções de benefícios com aumentos de vazões;
- 5º Fase 5: reduções acentuadas de benefícios com aumentos de vazões.

Vazões muito altas ou baixas podem apresentar benefícios negativos. A vazão de benefício máximo é função do uso da água. Isto foi demonstrado em um estudo de caso apresentado por Gillian e Brown (1997) para o

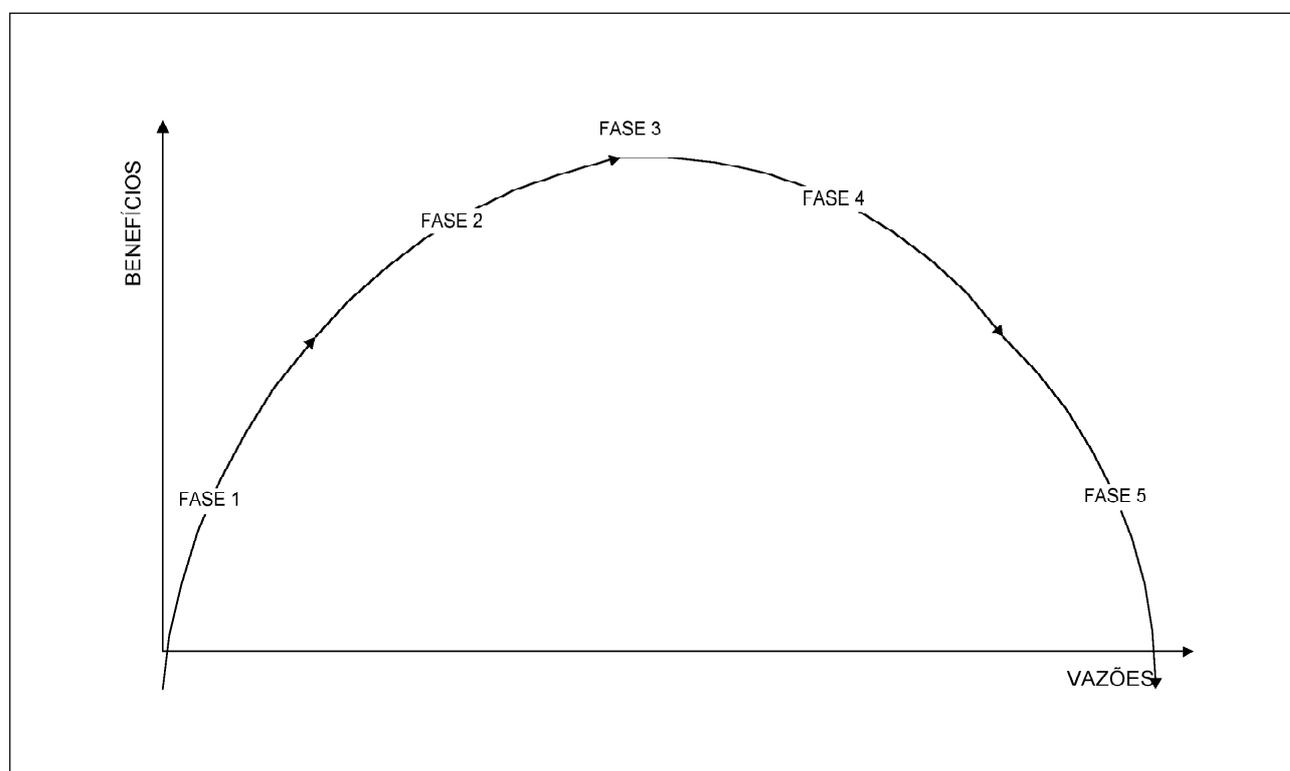


Figura 6. Relação entre benefícios e vazões. Fonte: Gillian e Brown, 1997.

rio Chama, no estado de New Mexico, Estados Unidos. Neste estudo, foram determinados quais seriam as vazões ótimas para os seguintes usos: preservação das populações de peixes, preservação das populações de macroinvertebrados, manutenção de habitats da mata ciliar, navegação recreacional com caiaques, canoas e barcos para corredeiras, pesca recreacional, manutenção da qualidade cênica, paisagística e qualidade da água e manutenção de habitats para espécies de predação para a águia careca (*bald eagle*), uma espécie em perigo de extinção. Os resultados deste estudo demonstraram que conflitos entre usos da água podem ocorrer também dentro de leitos de rios. Por exemplo, as vazões ótimas para recreação com barcos em corredeiras foram maiores do que as vazões para preservação de peixes, em qualquer época do ano. Houve conflito também entre as vazões requeridas para preservação de peixes e manutenção de habitats para as espécies de predação da águia careca durante 6 meses do ano. O que ocorre com frequência é a intersecção entre as faixas de vazões que suportam diferentes usos da água dentro de leitos de rios. Nestes casos, o atendimento das necessidades de vazões para um uso mais restritivo possibilitará atender também as necessidades de outros usos. Esta é uma das razões pelas quais as necessidades de vazões para peixes são tão frequentemente usadas em estudos para determinação de vazões mínimas.

CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu metodologias utilizadas para a determinação de vazões ecológicas em rios. As metodologias variam em complexidade, com os métodos mais simples requerendo informações mínimas (por exemplo: área de drenagem, vazões diárias) e os métodos mais complexos requerendo um volume muito maior de informações (por exemplo: substrato, cobertura, profundidades). No entanto, exemplos foram dados onde as vazões recomendadas por um método mais complexo (IFIM) encontravam-se dentro da faixa de vazões sugeridas por métodos mais simples, como os de *Tennant*, *Vazão Aquática de Base e Curva de Permanência de Vazões*. Isto sugere a possibilidade de utilizar-se métodos menos complexos em situações de ausência de informações e recursos materiais e humanos.

O método de maior complexidade tecnológica - IFIM enfoca as necessidades de vazões para uma espécie de peixe que se quer preservar, supondo-se, implicitamente, que os outros organismos aquáticos também estarão protegidos. Uma alternativa a este enfoque é o método da construção de blocos (BBM), o qual aborda as necessidades de vazões de todos os organismos aquáticos. Este método apresenta a vantagem de poder ser aplicado em situações onde as disponibilidades de informações e tempo são limitadas. Existem situações onde diferentes métodos podem ser aplica-

dos simultaneamente para a determinação de vazões requeridas para diferentes usos.

MENÇÃO

Este artigo é um resumo do estudo desenvolvido pelos autores para orientar a Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul - FEPAM no estabelecimento de vazões ecológicas para este estado. O segundo autor é bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e faz parte da Sub-Rede 4, Instrumentos de Gestão das Águas, da Rede de Recursos Hídricos apoiada pela Financiadora de Estudos e Projetos.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, J. D. (1995). *Stream Ecology. Structure and Function of Running Waters*. Chapman & Hall, London.
- BEECHER, H. A. (1990). Standards for instream flows. *Rivers* 1, p. 97-109.
- CLARKE, R. (1991). *Water. The International Crisis*. Earthscan, London.
- DOPPELT, B.; SCURLOCK, M.; FRISSEL, C. & KARR, J. (1993). *Entering the Watershed. A New Approach to Save America's River Ecosystems*. Island Press, Washington, D.C.
- FOLHA DE SÃO PAULO (2000). *Falta de saneamento mata mais que crime*. São Paulo, 16 julho, p. A1, C1-C4.
- GLEICK, P. H. (1998). *The World's Water. The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington, D.C.
- GILLILAN, D. M. & BROWN, T. C. (1997). *Instream Flow Protection. Seeking a Balance in Western Water Use*. Island Press, Washington, D.C.
- GOLDWATER, L. J. (1971). Mercury in the environment. In: *Chemistry in the Environment. Readings from Scientific American*. W. H. Freeman, San Francisco, p. 328-334.
- KING, J. & LOUW, M. D. (1998). Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1, p. 109-124.
- KULIK, B. H. (1990). A method to refine the New England aquatic base flow policy. *Rivers* 1, p. 8-22.
- MATOLA, J. & LEESTEMAKER, J. H. (2000). Towards a More Integrated Management of the Umbeluzi River. Experiences from Mozambique. Disponível no site [www.cwcr.ac.za/knprpp/jhl\(web\).html](http://www.cwcr.ac.za/knprpp/jhl(web).html)
- McMAHON, T. A. (1992). Hydrologic design for water use. In: *Handbook of Hydrology*. D. R. Maidment (ed.) McGraw-Hill, New York, p. 27.1-27.51.
- PETTS, G. E. & MADDOCK, I. (1994). Flow allocation for in-river needs. In: *The Rivers Handbook*, P. Calow e G. Petts (eds.). Blackwell Science, Oxford, p. 289-307.
- PRATT, J. (1997). *Truckee-Carson River Basin Study. Final Report. Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission*, Seattle, WA.
- REPUBLIC OF SOUTH AFRICA (1998). National Water Act. Act n. 36 of 1998. Disponível no site www.dwaf.pwf.gov.za
- SARMENTO, R. e PELISSARI, V. B. (1999). Determinação da vazão residual dos rios: estado da arte. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (CD-Rom)*. Belo Horizonte.
- SCOTT, D. & SHIRVELL, C. S. (1987). A critique of the instream flow incremental methodology and observations on flow determination in New Zealand. In: *Regulated Streams: Advances in Ecology*, J. F. Craig e J. B. Kemper (eds.). Plenum Press, New York, p. 27-43.
- STALNAKER, C.; LAMB, B. L.; HENRIKSEN, J.; BOVEE, K. & BARTHLOW, J. (1995). *The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM*. U.S. Department of Interior. National Biological Service, Washington, D.C.
- TENNANT, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1, p. 6-10.
- THOMANN, R. V. & MUELLER, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper Collins, New York.
- WATER RESEARCH COMMISSION (2000). New methodology determines river instream flow requirements. *SA Water Bulletin*. Disponível no site www.wrc.za/wrcpublications/wrcbulletin

Methodologies to Determine Instream Flow Minimum Requirements

ABSTRACT

This paper presents methods to determine "Instream Flow Minimum Requirements". The objective of these flows is the provision of minimum conditions to support aquatic ecosystems. Besides methods, the paper presents the most important physical factors for aquatic organisms in flowing waters, levels and categories of environmental flows, and the relationship between flows and benefits. Methodologies adopted by other countries and some states in Brazil are also introduced.

Key words: instream flow; ecosystems.