

Metodologias para determinar vazão ecológica em rios

RESUMO

As vazões ecológicas têm o objetivo de garantir as condições mínimas de manutenção de ecossistemas aquáticos. Estas vazões têm sido chamadas de residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais e estão sendo cada vez mais necessárias na gestão sustentável dos recursos hídricos. A maior parte das metodologias para determinar vazão ecológica foi desenvolvida na segunda metade do século XX, algumas no início deste século. Este trabalho apresenta uma análise crítica de metodologias utilizadas para a determinação de vazões ecológicas em rios. Além de descrever os métodos, o estudo faz um quadro-resumo de cada um, classificando-os em quatro categorias: hidrológica, hidráulica, habitat e holística, conforme as abordagens utilizadas na sua concepção, bem como as aplicações e desvantagens dos mesmos. Finalizando, são feitas algumas considerações sobre as tendências de adoção das metodologias no Brasil e em outros países, sendo destacadas algumas oportunidades e necessidade de pesquisa para o aprimoramento das metodologias existentes, bem como para o desenvolvimento de novas metodologias para rios brasileiros.

PALAVRAS-CHAVE: Metodologias de vazão ecológica; ecossistemas aquáticos; vazão ecológica.

ABSTRACT

The instream flows have the purpose to ensure the minimum conditions for maintenance of aquatic ecosystems. These flows have been called residual, remaining, ecological and environmental and are increasingly essential for sustainable management of water resources. Mostly methodologies to determine the instream flow were developed in the second half of the twentieth century and at the beginning of this century. This paper presents an analysis of methodologies used to determine instream flows in rivers. Besides describing the methods, this study is a summary table of each one, arranging them into four categories: hydrologic, hydraulic, habitat and holistic according to the approaches to their conceptions as well as the applicability and inconvenience of each one. Finally considerations about trends in the adoption of methodologies in Brazil and others countries are made and some opportunities, necessities of research for the improvement of existing methodologies as well as for the development of new and more appropriate methodologies for Brazilian rivers are presented.

KEYWORDS: Environmental flow methodologies; aquatic ecosystems; instream flow.

Eloísa Helena Longhi

Eng^a Agrônoma, Mestre em Ciências Agrárias/Agronegócios (UnB), Pesquisadora da Empresa Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária do Estado de Goiás – EMATER
E-mail: elohlo@gmail.com

Klebber Teodoro Martins Formiga

Doutor em Hidráulica e Saneamento EESC-USP, Professor Adjunto da Universidade Federal de Goiás

INTRODUÇÃO

A água presta serviços e suporta funções de valor para os seres vivos em geral, e para os seres humanos, em particular. Tais funções podem ser categorizadas como: manutenção da saúde pública, desenvolvimento econômico, recreação e preservação do equilíbrio ecológico (Benetti *et al.*, 2003).

Os serviços oferecidos pela água dependem da manutenção de suas características hidrológica, morfológica, química e ecológica. O balanço adequado entre utilização da água e manutenção de sua estrutura natural permite seu uso continuado, no presente e no futuro. Uma das variáveis necessárias a fim de possibilitar a continuidade das funções oferecidas pela água é a manutenção de vazões mínimas que suportem o ecossistema aquático. São as chamadas vazões residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais (Benetti *et al.*, 2003).

Em meio ao dilema entre a preservação dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos e a demanda para a captação de água de rios para diversos usos, surge um problema, por vezes complexo, para a gestão dos recursos hídricos. Atualmente, a competição entre a captação de água e as necessidades da fauna e flora aquáticas é uma realidade e, assim, uma questão fundamental a ser considerada por gestores de recursos hídricos no mundo todo. Os métodos para determinação da vazão ecológica têm sido utilizados visando minimizar o impacto da captação de água nos recursos aquáticos (Sarmiento, 2007).

As metodologias desenhadas para avaliar vazões ecológicas sintonizadas com os avanços teóricos da ecologia de rios, surgiram somente nas décadas de 1970 e 1980. No entanto, a existência de inúmeros métodos para a determinação dessas vazões torna o processo mais complexo, sendo que a maior parte ainda utiliza o tradicional critério de vazão ecológica como um valor único, válido para todos os anos e para todas as estações do ano (Collischonn *et al.* 2005).

Os métodos para medir vazão ecológica têm sido classificados em categorias, refletindo a variação da complexidade na sua aplicação (Sarmiento, 2007). Há que se considerar ainda, a disparidade entre os resultados apresentados por diferentes metodologias atualmente utilizadas. Dentro desse contexto, esse trabalho se propõe a uma análise do surgimento das metodologias mais utilizadas no mundo, suas características e aplicações práticas.

Vazão Ecológica

Existem aproximadamente 207 metodologias, distribuídas em 44 países, para a avaliação da vazão ecológica classificadas em quatro tipos: hidrológicas, hidráulicas, habitat e holísticas (Sarmiento, 2007).

As metodologias hidrológicas são as que utilizam dados hidrológicos (séries temporais de vazões diárias ou mensais) para fazer recomendações sobre a vazão ecológica a adotar. Geralmente elas fixam um percentual ou proporção da vazão natural do curso de água em questão para representar a vazão ecológica.

O segundo tipo, as metodologias hidráulicas, considera as mudanças em variáveis hidráulicas simples, como perímetro molhado ou profundidade máxima, medidas numa única seção transversal dos rios. As vazões ecológicas são obtidas através de uma figura no qual é representada a variável em estudo e a vazão.

O terceiro tipo abrange as metodologias que utilizam o *habitat*, e objetivam avaliar a vazão ecológica quanto ao *habitat* físico disponível para as espécies pesquisadas. Estas metodologias são processos de desenvolvimento de uma política de vazão ecológica que incorpora regras variáveis ou múltiplas, para uso em negociação com base na vazão para atender as necessidades de um ecossistema aquático, considerando as demandas de abastecimento de água e de seus outros usos. Elas normalmente implicam na determinação de uma relação de vazão-*habitat*, a fim de

comparar alternativas de vazão ecológica ao longo do tempo.

As metodologias holísticas, quarto tipo, identificam os eventos críticos de vazão em função do critério estabelecido para variabilidade da vazão, para alguns ou principais componentes ou parâmetros do ecossistema do rio. Elas são, em síntese, maneiras de organizar e usar dados de vazão e conhecimento. É uma metodologia que utiliza procedimentos distintos ou métodos para produzir resultados que nenhum outro procedimento e/ou método produziria sozinho.

Diversos estudos foram realizados ao longo do tempo sobre as metodologias para a determinação da vazão ecológica, incluindo Morhardt (1986), Sarmiento, R. *et al* (1999), Tharme, R.E. (2003), IUCN-International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (2003), The World Bank (2003) e Annear, T. (2004), IFC – Instream Flow Council (2004). A seguir discorre-se sobre alguns dos métodos mais utilizados, dentro das quatro categorias acima comentadas.

Metodologias para determinar vazão ecológica

Metodologias Hidrológicas

Entre os primeiros métodos desenvolvidos com o objetivo de mensurar o valor da vazão ecológica de rios está o *One Flow Method – OFM* (Sams e Pearson, 1963 citado por Morhardt, 1986). Este estudo apresenta um método para determinar uma vazão ótima para a desova de peixes (salmonídeos).

Em 1974 foi elaborado o Método *Northern Great Plains Resource Program – NGPRP*, (NGPRP, 1974; Morhardt, 1986), para os rios salmonícolas das Montanhas Rochosas do Oeste dos Estados Unidos, embora possa ser utilizado em qualquer curso de água, a fim de recomendar vazões ecológicas para a postura e crescimento de espécies de peixes, bem como vazões de descarga para o transporte de sedimentos.

O NGPRP recomenda vazões ecológicas para cada mês do ano, baseando-se na curva de permanência de vazões. As curvas são obtidas a partir de um registro histórico de vazões médias diárias iguais ou superiores a 20 anos, no qual são eliminadas as vazões de seca e de cheia. A exclusão é necessária, pois o método pressupõe que os componentes biológicos mais representativos de um sistema aquático são essencialmente mantidos pelas condições hidrológicas que se verificam em anos normais ou médios e não por acontecimentos extremos, que ocorrem durante curtos períodos de duração (Wesche & Rechar, 1980). A vazão ecológica recomendada para cada mês é igual à vazão que é igualada ou excedida em 90% do tempo, com exceção para meses de vazões mais elevadas, nos quais a vazão ecológica corresponde à vazão que é igualada ou excedida em 50% do tempo.

Em 1975 foi desenvolvido o “Método de Hope” (Hope, 1975, citado por Morhardt, 1986). Este modelo foi obtido através de uma modificação feita no Método NGPRP, tendo em vista a recomendação de vazões adequadas para postura, proteção e alimentação dos peixes, bem como para a lavagem de substratos finos depositados no fundo do leito do rio. A vazão que é igualada ou excedida 80% do tempo é a recomendada para suportar as atividades diárias das espécies de peixes. A vazão recomendada para desova é aquela igualada ou excedida 40% do tempo e a vazão que é igualada ou excedida 17% do tempo é recomendada como uma vazão de descarga para um período de 48 horas.

Também em 1975 foi desenvolvido o “Método de Tennant ou de Montana”, o qual se baseia apenas em simples variáveis hidrológicas (Tennant, 1976). Tennant definiu o ecossistema fluvial em função da vazão,

expressa em porcentagem, com relação à vazão média anual do rio, calculado para o local do aproveitamento hidráulico. Recomenda uma vazão ecológica amparada num conjunto de percentagens em relação à vazão média anual, calculada para o local do aproveitamento hidráulico, recorrendo-se a diferentes percentagens para os períodos de Outubro-Março e Abril-Setembro. A correta aplicação deste método abrange as seguintes etapas:

1. Determinação da vazão média anual no local do aproveitamento hidráulico;
2. Observação do curso d’água durante os períodos em que a vazão no mesmo é aproximadamente igual a 10%, 30% e 60% da vazão média anual, documentando-o com fotografias dos vários tipos de *habitats* característicos;
3. Utilização da informação obtida para preparar recomendações de vazões ecológicas conforme a Tabela 1.

| Vazão Ecológica | Vazão Recomendada | |
|---------------------|--|-----------------|
| | (porcentagem em relação à vazão média anual) | |
| | Abril – Setembro | Outubro – Março |
| Lavagem ou máxima | 200% | |
| Ótima | 60 – 100% | |
| Excelente | 60% | 40% |
| Muito bom | 50% | 30% |
| Bom | 40% | 20% |
| Fraco ou degradante | 30% | 10% |
| Pobre ou mínima | 10% | 10% |
| Degradação elevada | 0 – 10% | |

Tabela 1. Regime de vazões recomendado pelo Método de Tennant (Tennant, 1976).

No entanto, na prática, a aplicação do Método de Tennant raramente envolve o reconhecimento de campo, sendo a recomendação de vazões baseada unicamente na tabela desenvolvida por Tennant (Morhardt, 1986).

De um modo geral, a metodologia descreve que uma vazão correspondente a 10% da vazão média anual é insuficiente para sustentar uma pequena condição de *habitat* para os peixes, pois a largura do leito, a profundidade e a velocidade do

escoamento são significativamente reduzidas, a temperatura da água pode subir tornando-se um fator limitante para algumas espécies, principalmente durante os meses de verão, as populações de macroinvertebrados são bastante afetadas, podendo colocar em

risco a produção piscícola do curso d'água e a vegetação ripícola poderá ficar sujeita a estresse hídrico. Uma vazão correspondente a 30% da vazão média anual mantém uma boa qualidade de *habitat*. A largura do leito, a profundidade e a velocidade do escoamento, bem como a temperatura, são mantidas a níveis satisfatórios para a maior parte das espécies, as populações de macroinvertebrados são afetadas, mas em níveis que não colocam em risco a produtividade piscícola e a vegetação ripícola não é afetada. Vazão entre 60 a 100% promove excelente condição de *habitat* para a maioria das formas de vida aquática e dos usos previstos (Morhardt, 1986).

O Método de Tennant tem sofrido diversas modificações que visam adaptar melhor o regime de vazões ecológicas calculado ao regime natural de vazões nas diversas regiões diferentes daquela para a qual o método foi desenvolvido. Sua limitação é que só deverá ser aplicado a cursos de água morfologicamente semelhantes àqueles a partir dos quais a técnica foi desenvolvida, sendo indicado para rios grandes, com 50 metros de largura ou mais, que exibem pouca variação da vazão ao longo do ano, isto é, inferior a 8m³/s (Sarmiento, 2007).

Em 1976 foi elaborado o "Método Califórnia" (Waters, 1976; Alves, 1993). Desenvolvido para quantificar a relação entre a vazão e a área disponível para desova e crescimento das espécies de truta existentes nos rios da Califórnia, nos Estados Unidos.

É um método semelhante ao "Método de Washington" (Collings, 1974 citado por Alves, 1993), metodologia do tipo Hidráulica, apresentado mais à frente, pois envolve a elaboração de mapas planimétricos para velocidade, profundidade, material aluvionar e cobertura. Pode-se, caso necessário, recorrer à simulação hidráulica. As informações para confecção dos mapas planimétricos ou para a simulação hidráulica são obtidas em seções transversais selecionadas em cada local

de amostragem, para as vazões de interesse, nunca inferior a três. São considerados fatores de ponderação, entre zero e um, para cada um dos parâmetros acima mencionados no cálculo do valor do *habitat*. O índice de qualidade de *habitat* é denominado preferência líquida de *habitat* (PLH). A principal limitação desse método é a não inclusão de nenhuma orientação sobre os critérios a serem seguidos para a recomendação da vazão ecológica. Conforme Morhardt (1986), este método é o precursor do *Instream Flow Incremental Methodology*.

O Método do Q_{7,10} (vazão média mínima de sete dias consecutivos, com dez anos de recorrência), desenvolvido em 1976 (Chiang e Johnson, 1976 citados por Loar e Sale, 1981), recomenda vazões ecológicas baseado numa série histórica de vazões, mais especificamente a vazão mínima que se observa durante sete dias consecutivos, para um período de verificação, à mesma época do ano, de dez anos. Havia sido anteriormente utilizado para a construção de estações de tratamento de efluentes, sendo determinada a vazão que permite manter condições adequadas de qualidade da água. Ele tem sido utilizado principalmente no Leste e Sudoeste dos EUA. A determinação do Q_{7,10} é feita em duas etapas. Na primeira, calcula-se o valor do Q₇ para todos os anos do registro histórico considerado. A segunda resume-se na aplicação de uma distribuição estatística de vazões mínimas para o ajuste dos Q₇ calculados, sendo as distribuições de *Gumbel* e *Weibull* as mais utilizadas.

O Q_{7,10} é um método muito utilizado para concessão da outorga de água no Brasil. Sua utilização para recomendação de vazão não possui base ecológica, pois não considera as especificidades dos ecossistemas e ignora a dinâmica natural da ictiofauna e ictioflora, existentes num curso de água.

Em 1977, o Departamento de Recursos Naturais da Geórgia, nos Estados Unidos, utilizava como mecanismo para a definição da vazão ecológica a vazão Q_{7,10} (Sarmiento,

2007). As opções quanto ao Q_{7,10} para a concessão da outorga de água são: mínima vazão Q_{7,10} mensal; opções de vazões médias para rios regularizados ou não regularizados; estudo específico de vazão ecológica para o local. Uma preocupação com a diretriz do Q_{7,10} é o risco da água permanecer nos reservatórios tendo somente vazões mínimas sendo liberadas, particularmente durante os períodos de vazões baixas, devidas a períodos de secas severas ou mesmo das variações sazonais das precipitações.

Segundo Sarmiento (2007), o estado do Texas utiliza dois métodos hidrológicos para definição da vazão ecológica: um é o "Método de Lyons" e o outro, para o planejamento das águas, é o *Consensus Criteria for Environmental Flow Needs, CCEFN*. O "Método de Lyons" foi desenvolvido em 1979, por Barry W. Lyons, biólogo da *Wildlife Department* do *Texas Parks and Wildlife Department – TPWD*. A metodologia usa porcentagens de vazões médias diárias como parâmetro para determinar a vazão ecológica nos rios do Texas. Para o licenciamento, as vazões ecológicas são 40% da vazão média mensal de outubro-fevereiro, e 60% da vazão média mensal de março-setembro. Os valores de 60% foram escolhidos para uma maior proteção durante o período crítico de verão e primavera. Os níveis de 40% e 60% são obtidos através do uso do método do perímetro molhado. Esses limites são aplicados na maioria dos rios do Texas para determinação da vazão ecológica na concessão da outorga de água.

O *CCEFN (TWDB, 1979; Sarmiento, 2007)*, parte das diretrizes do Plano das Águas do Texas elaborado pelo *Texas Water Development Board*. O critério adotado é a vazão natural – a vazão estimada que estivesse no rio sem os impactos da interferência humana na sua bacia hidrográfica. Enquanto o Método de Lyons utiliza dados medidos para o valor da vazão, *CCEFN* usa valores percentuais da vazão natural na derivação de vazão e vazão remanescente. Contudo, os dois métodos produzem valores diferentes para a vazão ecológica para um mesmo rio no Texas.

Em 1980 foi elaborado o “Método de Utah” (Geer, 1980; Morhardt, 1986), que parte da hipótese de que a vazão mínima mensal para o período de registro considerado é apropriada para recomendar uma vazão ecológica para as épocas de inverno e verão. Segundo Morhardt (1986), o método é essencialmente arbitrário, pois não existe evidência

comprovando que sua aplicação resulta numa vazão adequada à ictiofauna ou a outros requerimentos.

Também em 1980 foi desenvolvido o *Aquatic Base Flow (ABF)* para a região da Nova Inglaterra nos EUA (Larsen, 1980 citado por Morhardt, 1986). O *ABF* tem por objetivo criar condições adequadas de vazão à manutenção dos organismos aquáticos

dos cursos de água. A premissa básica do *ABF* é que as vazões médias ou recomendadas são suficientes para as espécies de peixes. As recomendações de uma vazão ecológica, a partir desse método, são feitas com base numa série histórica de vazões, a partir da qual é calculada a média para o mês mais seco do ano (Tabela 2).

| Estação do Ano | Série histórica de vazões | |
|-------------------------------|--|---------------------------------|
| | Inferiores a 25 anos (m^3s^{-1}/Km^2) | Superior ou igual a 25 anos (a) |
| Abril –1ª quinzena junho(b) | 0.29 | 100% média de agosto (c) |
| 2ª quinzena de junho-setembro | 0.04 | 100% média de agosto (c) |
| Outubro-Março (b) | 0.07 | 100% média de agosto (c) |

(a) rio natural, bacia hidrográfica superior a 130km², precisão superior ou igual a 10%; (b) períodos de postura e incubação; (c) se a vazão no curso de água a montante da barragem for inferior a média do mês de setembro, então a vazão a manter é a vazão que se verifica nesse local do curso de água. Obs: os dados fornecidos são referentes ao Hemisfério Norte.

Tabela 2. Vazões ecológicas recomendadas pelo *ABF* (Larsen, 1980 citado por Morhardt, 1986).

O nível de precisão deste método é baixo. Se uma série histórica de vazões diárias, igual ou superior a 25 anos estiver disponível, o cálculo é baseado na média do mês mais seco do ano. Por outro lado, se esta série for menor do que 25 anos, a vazão ecológica será calculada como uma porcentagem em função da área de drenagem obtida a partir de mapas. Para Russel (1990) citado por Alves (1993), estudos comparativos com outros métodos sugerem que os resultados obtidos através deste método são mais conservadores, ou seja, as vazões recomendadas são superiores às obtidas com outros métodos.

Em 1981 foi desenvolvido o *Maximum Steelhead Spawning Area Method* (Osborn, 1981; Morhardt, 1986), com o propósito de estimar vazões para permitir a máxima área de *habitat* utilizada pelas espécies de salmonídeos. De acordo com Morhardt (1986), a falha deste modelo está na

falta de especificação de um procedimento para recomendação da vazão ecológica a partir da vazão calculada.

Outro modelo é o *RVA – Range of Variability Approach* (Richter *et al*, 1997). O propósito do *RVA* é fornecer uma estrutura para a gestão dos rios a fim de restaurar ou manter a variabilidade natural dos regimes hidrológicos para recuperação/conservação dos ecossistemas aquáticos. Na aplicação do método caracterizam-se as vazões diárias para um período de registro refletindo regimes hidrológicos naturais (não alterado pelo efeito antrópico) utilizando 32 indicadores de alteração hidrológica obtidos com o método *IHA – Indicadores de Alteração Hidrológica*, abordado na sequência. Seleciona-se uma extensão da variação desses parâmetros para formular metas iniciais de vazão ecológica para a gestão do rio. As metas de vazão ecológica são utilizadas para a gestão de estratégias

(operações de reservatórios e derivações de águas), refinadas como indicado pelo monitoramento ecológico de longo termo e como requerido para a conservação dos ecossistemas aquáticos.

O método utiliza observações hidrológicas, constando basicamente dos seguintes passos: caracterizar a variação de vazão utilizando 32 parâmetros ecológicos; selecionar a vazão de gestão desejada com base nesses parâmetros; projetar um sistema de gestão que atenderá ao desejado; implementar o sistema de gestão e monitorar os seus efeitos; repetir a caracterização anualmente e comparar os novos valores àqueles desejados na gestão; incorporar nova informação de monitoramento e revisar seu sistema de gestão ou o *RVA* desejado quando necessário.

Alguns pesquisadores consideram o *RVA* uma metodologia holística, pois pode ser aplicado nas fases pré e pós-construção de

barragens, o que é um fator positivo. Neste caso são definidos 33 parâmetros ecológicos relevantes que caracterizem a frequência e duração das flutuações

das vazões. Para cada parâmetro RVA é definido um cenário de referência, baseado em percentuais ou desvio padrão.

Para se determinar a condição das águas impactadas, as flutuações do parâmetro RVA são obtidas pela equação:

$$\text{Alteração Hidrológica} = \left[\frac{\text{Frequência observada} - \text{Frequência desejada}}{\text{Frequência desejada}} \right] \times 100$$

A frequência observada é aquela que está na variação de referência (período de pós-construção da barragem), sendo a referência definida como o período onde a vazão é o cenário de referência (período de pré-construção da barragem). Se o parâmetro RVA resultar no cenário de referência, a alteração hidrológica é zero. Se mais parâmetros estiverem no cenário de referência, o valor da alteração é positivo, e no caso de que menos parâmetros estiverem dentro do cenário de referência, ter-se-ão valores negativos de alteração.

O “Método IHA” (Richter *et al*, 1997) é um dos componentes do método RVA. O RVA tem sido aplicado em mais de 30 estudos de vazão ecológica nos Estados Unidos, no Canadá e na África do Sul.

O IHA calcula um conjunto de características hidrológicas, ou indicadores, para avaliar alteração hidrológica. Inclui quatro passos: definição de série de dados de interesse para o ecossistema; cálculo dos valores dos atributos hidrológicos; cálculo da estatística intra-anual; calcula os valores dos indicadores de alteração hidrológica. O método pode ser utilizado para comparar a condição do sistema com ele mesmo ao longo do tempo (antes e após o impacto); comparar a condição de um sistema com outro sistema, ou ainda comparar condições atuais com simulações de modelo de futuras modificações (Sarmiento, 2007).

Jenq Tzong Shiau (2004) utilizou o RVA para a determinação da vazão ecológica após a construção de um vertedouro lateral denominado *Taitung*, na bacia do rio Peinan, na Tailândia. O vertedouro foi construído para suprir água na agricultura. O estudo empregou 32 parâmetros

hidrológicos. O objetivo do trabalho foi fazer com que a vazão após a construção do vertedouro atendesse às variações das vazões existentes antes da construção do mesmo, com a mesma frequência dessas vazões.

Metodologias hidráulicas

Foi desenvolvido em 1967 o “Método da Região 4 do *USFWS*” (*United States Fish and Wildlife Service*), o qual possibilita a recomendação de vazões ecológicas que permitam a manutenção das características gerais do *habitat* para as populações de salmonídeos em riachos de montanha dos estados de Utah, Idaho e Wyoming, Sudoeste dos Estados Unidos (Herrington e Dunham, 1967, citados por Alves, 1993).

Sua aplicação consiste na caracterização de seções transversais, nas quais os seguintes parâmetros são levantados: dimensão, estrutura do leito do rio, substrato e características das margens. Através de um modelo de simulação hidráulica são definidas curvas de *habitat* em função da vazão, a partir das quais é feita a recomendação de uma vazão ecológica.

O *Washington Toe-Width Method*, desenvolvido pelo *Department of Fisheries, The Department of Game*, e o *U.S. Geological Survey (USGS)*, para determinar a vazão ecológica mínima para peixes (Swift, 1976; Morhardt, 1986). Os resultados de nove anos de medições de altura da lâmina e de velocidade da água nos rios foram utilizados para calcular o *habitat* por unidade de área, para cada vazão medida. *Toe-width* é a distância entre as margens do rio medida no fundo. Essa largura do rio é usada como uma equação para a determinação da vazão

necessária para permitir a reprodução de salmões.

O “Método de Oregon”, desenvolvido em 1972 (Thompson, 1972; Loar e Sale, 1981), utiliza conceitos de largura ponderada utilizável e largura utilizável de rios na determinação de vazões mínimas e ótimas requeridas para a locomoção, desova, incubação e crescimento das espécies selecionadas. Os critérios de *habitat* são baseados na velocidade e profundidade do escoamento, para as quais é verificada a presença de peixe. A largura utilizável (LU) é definida segundo um critério binário, ou seja, utilizável ou não utilizável, considerando uma gama de valores de velocidade e profundidade utilizados pela espécie, para cada uma das fases do seu ciclo de vida. A largura ponderada utilizável (LPU) usa um fator de ponderação, que varia de zero a um, para cada variável. Para calcular a LPU, as seções transversais são divididas uniformemente em subseções, caracterizando-as por uma largura, uma profundidade e uma velocidade média. A largura de cada subseção é, então, multiplicada pelo fator de ponderação correspondente à velocidade e profundidade da subseção, o que permite quantificar em termos relativos o valor do *habitat*. A curva dos fatores de ponderação pode ser obtida através da opinião de especialistas ou através de observação em campo, levando em consideração, se possível, cada uma das fases do ciclo de vida das espécies em estudo.

Em 1973 foi desenvolvido o “Método do Colorado” ou da Região 2 do *USFWS* (*United States Fish and Wildlife Service*), para os rios salmonícolas das Montanhas Rochosas do Estado do Colorado, Estados Unidos, o qual se baseia na seleção e simulação

hidráulica de áreas críticas do rio (Russel e Mulvaney, 1973; Wesche e Rechar, 1980). Para tanto, são definidas seções transversais onde é feita a simulação hidráulica de diversos parâmetros, tais como: perímetro molhado, área da seção transversal, velocidade média, profundidade máxima e raio hidráulico, a partir dos quais são definidas curvas de variação em relação à vazão. A recomendação de uma vazão ecológica é feita recorrendo-se ao critério do ponto de inflexão das curvas geradas, ou então se considera a vazão capaz de manter 75% da área selecionada como crítica (Loar e Sale, 1981).

Em 1974 foi elaborado o “Método de Washington” para o *Washington Department of Fisheries*, Washington, EUA (Collings, 1974; Alves, 1993). O método referido envolve a cartografia de trechos do rio para determinar áreas de postura e crescimento para as espécies consideradas. São selecionados no mínimo três locais de interesse, nos quais são definidas, em cada área, quatro seções transversais. Ao longo de cada seção transversal, e se possível entre elas, são feitas medições de velocidade e de profundidade para no mínimo cinco valores de vazão. É importante que os valores de vazão de interesse estejam dentro do intervalo de interesse. Os valores obtidos permitem definir um mapa de isolinhas para a profundidade e velocidade.

Para cada vazão, são construídos mapas planimétricos, para desova e crescimento, que mostram as diferentes combinações de velocidade e profundidade. A partir destes mapas são medidas as áreas com adequadas combinações de velocidade e profundidade, com as quais são elaboradas curvas de área de postura e de crescimento em função da vazão. A vazão recomendada corresponde aos picos das respectivas curvas, sendo a vazão ecológica definida como sendo aquela capaz de manter 75% da área máxima de postura ou de crescimento. A grande vantagem desse método é a forma gráfica, não sendo necessário recorrer à simulação hidráulica.

No ano de 1983 foi elaborado o “Método do Perímetro Molhado” – MPM (Annear e Conder, 1984). Esse método admite a existência de uma relação direta entre o perímetro molhado e a disponibilidade de *habitat* para a ictiofauna. São definidas seções transversais em locais onde se julga haver uma grande variação do perímetro molhado com a mudança na vazão, geralmente locais com velocidades altas e profundidades baixas (zonas de rápidos). Posteriormente são realizadas medições de profundidade e velocidade, para no mínimo três vazões, podendo recorrer-se à simulação hidráulica. A partir da simulação hidráulica define-se um gráfico que relaciona o perímetro molhado com a vazão, então se identifica o principal ponto de inflexão da curva, a partir do qual o aumento da vazão traduz-se num aumento pouco significativo do perímetro molhado e numa rápida deterioração das condições de *habitat*. A vazão referida no ponto de inflexão é a vazão recomendada, considerando como pressuposto que a vazão ecológica obtida nas zonas de corredeiras é igualmente adequada para os outros tipos de *habitat*.

Liu *et al*, 2007 define o conceito de velocidade de vazão ecológica bem como o raio hidráulico ecológico e propõe o método “Raio Hidráulico Ecológico” que considera informações do rio (incluindo raio hidráulico, coeficiente de rugosidade e gradiente hidráulico) e a velocidade necessária para a manutenção de certas funções ecológicas. O método foi empregado na determinação da vazão ecológica na seção transversal do rio *Niqu*, tributário do rio *Yalong*, situado na China. Os resultados obtidos com o método foram comparados com aqueles do Método Tennant.

Metodologias habitat

Em 1982 surge o *Instream Flow Incremental Methodology - IFIM* (Bovee, 1982). O IFIM foi desenvolvido pelo *Cooperative Instream Flow Service Group*, atualmente *Aquatic Systems Branch of the National Ecology*

Research Center, USFWS, em Fort Collins, Estados Unidos da América, para a resolução de problemas que dizem respeito à gestão dos recursos hídricos que envolvam a implementação de qualquer tipo de empreendimento hidráulico em rios, objetivando diminuir o impacto negativo causado aos ecossistemas.

O método IFIM baseia-se no princípio de que a distribuição longitudinal e lateral dos organismos aquáticos é determinada, entre outros fatores, pelas características hidráulicas, estruturais e morfológicas dos cursos de água. Cada organismo tende a selecionar as condições que lhe são mais favoráveis no curso de água, correspondendo a cada variável de *microhabitat* (velocidade, profundidade, substrato e cobertura) um grau de preferência que é proporcional à aptidão do valor da variável para a espécie (Alves, 1993). Conforme Bovee *et al.*, (1998) a área do rio que possui condições ambientais favoráveis para a manutenção de uma população piscícola, pode ser quantificada em função da vazão.

Uma série de procedimentos teóricos e computacionais interligados compõe o IFIM, os quais descrevem características temporais e espaciais de *habitat*, como conseqüência a uma dada alternativa de alteração do regime fluviométrico dos rios. A natureza incremental desta metodologia provém do fato de como cada problema é encarado, permitindo que a solução seja encontrada a partir de variações na vazão, partindo-se de um valor inicial considerando várias alternativas, tornando-se adequado às necessidades dos diversos usuários da água e evitando, assim, os conflitos e a degradação ambiental.

O método pode ser aplicado não só a estudos de vazões ecológicas, mas também a estudos de impacto ambiental nos ecossistemas decorrente de qualquer tipo de perturbação que ocorra no curso de água. Uma visão

geral do roteiro de aplicação do método é apresentada a seguir:

a) Os estudos com o *IFIM* iniciam com a pesquisa da história do rio para determinar quais as espécies de peixes estão presentes, bem como para entender suas histórias de vida. Os estudos podem desejar saber, por exemplo, onde e quando ocorre a reprodução dos peixes. Consultando biólogos, identificam-se os locais apropriados para estudo. Como não é viável estudar cada metro quadrado do rio, locais de estudo são selecionados para representar grandes segmentos do mesmo. Para cada local de interesse, o estudo estabelecerá transectos ao longo do rio. Aí serão medidas a profundidade e a velocidade da água em pontos fixos ao longo de cada transecto, fazendo-se os registros de outras informações relativas ao *habitat*, tal como o tipo do substrato presente em cada ponto;

b) A equipe retornará várias vezes nos pontos para situações de vazões baixas, médias e altas. Isso fornecerá uma gama de profundidades e velocidades para calibrar os modelos computacionais. As visitas são planejadas primeiramente para revisar a história hidrológica do rio. Muitas vezes, os peixes podem ser observados através de mergulho para identificar que espécies estão no rio, que tipos de áreas eles estão usando e o que estão fazendo (desova, reprodução, etc). Também serão registradas as profundidades, velocidades e substratos utilizados pelos peixes, informação essa empregada para modelar o *habitat* preferencial dos mesmos;

c) Os dados adquiridos durante os trabalhos de campo são levados para um programa de computador capaz de desenhar e prever como uma variação de vazões afeta a distribuição das profundidades e velocidades. Esses resultados necessitam de revisão e calibração;

d) Tais resultados não indicam como o *habitat* dos peixes é afetado pela variação da vazão. Assim sendo, os dados devem ser levados para outro programa de computador, junto com a informação descrevendo as

preferências de *habitat* pelas diferentes espécies e estágios de vida. A informação pode indicar, por exemplo, que um peixe adulto prefere água profunda e veloz, enquanto um peixe jovem prefere água rasa e com menor velocidade ou mesmo parada;

e) O resultado dos procedimentos de cálculo do *IFIM* fornece um valor conhecido como área utilizada ponderada para cada espécie de interesse e respectivo estágio de vida. Essa área expressa (em m² por metro linear de rio) como a disponibilidade do *habitat* dos peixes é afetada pelas alterações nos níveis de água do rio;

f) Considerando que para diferentes espécies e estágios de vida correspondem diferentes necessidades de vazões, uma única vazão não poderá simultaneamente maximizar *habitat* para todas as espécies. O desafio é conciliar essas necessidades de modo a proteger todas ou o maior número possível de espécies. Isso requer que os biólogos usem os resultados do modelo em combinação com outra informação para estabelecer um regime de vazão final. Isso pode envolver alguma negociação de prioridades de gestão. Outras atividades tais como pesca, recreação, irrigação, navegação, etc, também precisam ser consideradas na obtenção da vazão ótima.

Nestler *et al.*, (1993) utilizou o “Método *RCHARC*” – *The Riverine Community Habitat Assessment and Restoration Concept* para estudar os efeitos das alterações de vazões sobre a biota aquática em projetos de canais. É um método para avaliar o *habitat* dos rios sob condições de vazões baixas. O método combina elementos conceituais do *Index of Biotic Integrity (IBI)* e do Sistema *PHABSIM*. - *Physical Habitat Simulation* (programa de computador utilizado para quantificar os atributos hidráulicos adequados contra atributos hidráulicos inadequados de *habitat* de espécies selecionadas e estágios de vida em função da vazão). Geralmente ele é utilizado para projetos de recuperação e de avaliação do trecho do rio restaurado sob condições de referência. Envolve as seguintes hipóteses: cada vazão específica é garantida por uma distribuição de profundidades e

velocidades e, a estrutura da comunidade aquática é estreitamente relacionada à diversidade hidráulica, como descrita pelas distribuições de freqüências de profundidades e velocidades.

O modelo possui as seguintes características: não faz as comparações quantitativas entre trechos do rio (as avaliações são qualitativas); faz ligações entre observações de campo, resultados de pesquisas e entendimento da diversidade de *habitat*; não utiliza o critério de adequação das espécies para calcular *habitat*; requer dados de geometria do rio, hidrologia, níveis de água, diminuição de profundidades e dados sobre o *microhabitat*, como transporte de sedimento, oxigênio dissolvido e temperatura da água.

O método “*Tidal Distributary/Estuary Method*” (Duke Engineering, 1999), é uma técnica incremental de prover vazões para manter o refúgio no canal na baixa-mar e nas áreas de inundação nas preamares. O propósito do método é determinar vazões que manterão os processos e recursos do estuário. A técnica utiliza um modelo de regressão que correlaciona os níveis de água no estuário como uma função da maré e a vazão para estabelecer *habitat* adequado para manter os peixes e as comunidades de vegetação. Uma restrição é que o método não leva em consideração a salinidade, fator importante nos estuários. Ele fornece informações, mas não respostas.

O método *Hatfield e Bruce Western Salmonid Regressions* (Hatfield & Bruce, 2000), estabelece uma série de equações para avaliar a vazão que maximiza a área usada ponderada (WUA) nos estudos com o *PHABSIM*, para até quatro estágios da vida de tipos de trutas e salmões. Os autores propõem o método para o nível de reconhecimento.

O *MesoHABSIM – Mesohabitat Simulator* (Piotr Parasiewicz, 2001 citado por *IFC*, 2004), é semelhante ao *PHABSIM*, módulo integrante de *IFIM*. O propósito do *MesoHABSIM* é fornecer um meio para avaliação de *habitat* que pode ser utilizado em cenários de

reabilitação de rios, incluindo alternativas de regimes de vazões para todo o rio ou uma seção transversal. É similar ao *PHABSIM*, considerando-se que ambos quantificam atributos físicos do *habitat*, fazendo relação com aqueles dos requerimentos de *habitat* adequados para espécies selecionadas e estágios de vida como uma função da vazão. Enquanto o *PHABSIM* envolve a pesquisa detalhada do *micro habitat* dentro de locais de amostragem selecionados, o *MesoHABSIM* utiliza o mapeamento de *mesohabitat* de todas as seções do rio sob condições de vazões múltiplas.

O método *Demonstration Flow Assessment – DFA*, (IFC, 2004), utiliza para a determinação da vazão ecológica a observação direta das condições do *habitat* do rio para diferentes vazões, e um grupo de profissionais elege as alternativas de vazões. Faz uso de procedimentos que podem ser divididos em duas partes. A primeira parte é geral e trata da análise de decisão fundamentada no julgamento. Essa parte inclui: estrutura da decisão enfocando a avaliação através de seus objetivos e contornos; modelagem conceitual identificando os processos-chaves e mecanismos pelos quais a variável escolhida afeta os recursos estudados; definição de indicadores mensuráveis baseados nos modelos conceituais; observação de como as medições responde às variáveis estudadas e, análise dos resultados e incertezas para eleger alternativas de gestão. A segunda parte é ecológica: quantificação do *habitat* como uma forma de avaliar os efeitos das alternativas de gestão e inclui identificação de tipos específicos de *habitat* que serão desejáveis para razões específicas; estimativa da quantidade desses tipos de *habitat* para cada alternativa e avaliação das alternativas de como elas proverão as desejadas quantidades de cada tipo de *habitat*. A subjetividade e a incerteza são as maiores limitações no uso do *DFA*, pois não utiliza a quantificação. Tem sido muito aplicado no licenciamento de hidrelétricas nos Estados Unidos e é fundamentalmente

similar ao método *PHABSIM*, integrante do *IFIM*.

O método *WAIORA – Water Allocation On River Attributes*, desenvolvido em 2003, estuda a variabilidade dos elementos químicos e hidrofísicos do curso de água em função de mudanças na vazão e como essa variabilidade afeta o meio biótico definindo-se, assim, os valores de vazão em função de limitações na variabilidade desses indicadores impostas pelas necessidades das espécies (Reis, 2007).

Metologias holísticas

O Método Holístico (Arthington *et al*, 1992) foi desenvolvido na Austrália para estudar a vazão ecológica levando em conta todo o ecossistema do rio, podendo incluir áreas associadas, tais como pântanos, água subterrânea e estuários. Adicionalmente, considera todas as espécies que são sensíveis à vazão, como invertebrados, plantas e animais, contemplando ainda os aspectos das cheias, secas e qualidade da água. Representa as bases conceituais e teóricas para a maioria dos métodos holísticos para a determinação da vazão ecológica. Geralmente essa metodologia reúne um grupo de profissionais e pode envolver a participação de todas as partes interessadas, resultando em um processo holístico. Os profissionais fazem julgamentos acerca das conseqüências ecológicas para várias vazões no rio, em relação aos aspectos quantitativos e temporais. Uma desvantagem do método é o custo elevado na aquisição de dados

King e Louw (1998) empregaram a Metodologia *BBM–Building Block Methodology* na África do Sul. Ele foi desenvolvido por pesquisadores locais e o *DWF – South African Department of Water Affairs and Forestry*. Consiste em três fases: preparação para *workshop*, incluindo consulta às partes interessadas, estudos de escritório e de campo para a seleção do local, análise geomorfológica do trecho do rio, pesquisas sociológicas e de integridade

do *habitat* do rio, estabelecimento de objetivos para a condição futura do rio, avaliação da importância ecológica e econômica do rio, análises hidráulica e hidrológica; *workshop* multidisciplinar para construção da variação do regime de vazão através da identificação das características da vazão ecológica essencial em termos mensais; ligação da vazão ecológica necessária com a fase da Engenharia de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, com modelagem do cenário e análise hidrológica. O método é aplicável a rios regularizados e não regularizados, quando estiver se tratando da restauração das vazões (King & Louw, 1998).

Foi desenvolvida na África, pela *Southern Waters and Metsi Consultants*, uma metodologia holística com componente sócio-econômico, denominada *Downstream Response to Imposed Flow Transformations – DRIFT*, (King *et al*. 2003). A aplicação do *DRIFT* compreende quatro módulos:

- 1) Módulo biofísico - utilizado para descrever a condição presente do ecossistema, a fim de prever sua mudança para alterações de vazões;
- 2) Módulo sociológico - utilizado para identificar riscos da subsistência de usuários devido à alteração de vazões e quantificar suas ligações em termos de recursos naturais e perfis de saúde;
- 3) Módulo de desenvolvimento de cenários - une os primeiros dois módulos através de um banco de dados visando obter previsões das conseqüências da alteração de vazões;
- 4) Módulo econômico - gera descrição de custos para mitigação e compensação para cada cenário. Essa metodologia tem aplicação limitada na região Sul da África. O *DRIFT* foi empregado no *The Lesotho Highlands Water Project – LHWP*, (World Bank, 2003).

A metodologia *DRIFT* contém um processo para avaliar as conseqüências sociais para cada cenário de vazão, bem como meios para avaliar os custos econômicos para a regularização de vazões em função dos efeitos nos peixes e em outros recursos naturais, bem como nos serviços realizados pelas comunidades.

Na sequência a tabela apresenta um resumo das metodologias de determinação de vazão ecológica de rios utilizadas mundialmente, critérios que cada uma utiliza, suas principais aplicações, bem como suas desvantagens.

| | METODOLOGIA | O QUE UTILIZA | APLICAÇÃO | DESVANTAGEM |
|-------------|---|---|--|--|
| HIDROLÓGICA | <i>One Flow Method (OFM)</i> - (Sams e Pearson, 1963) | Dados hidrológicos (características da seção) | Desova de peixes (salmonídeos) | Custo elevado na aquisição de dados |
| | <i>Northern Great Plains Resource Program</i> (NGPRP, 1974) | Curva de permanência de vazões (série histórica de vazões naturais) | Desova/crescimento de peixes; vazões de descarga e transporte de sedimentos | Não recomendado para cursos de águas quentes |
| | Método de <i>Hope</i> (Hope, 1975) | Curva de permanência de vazões (série histórica de vazões naturais) | Desova/crescimento de peixes; vazões de descarga e transporte sedimentos | Não recomendado para cursos de águas quentes |
| | Método de <i>Tennant</i> ou de <i>Montana</i> (Tennant, 1976) | Dados hidrológicos (largura do leito, profundidade, velocidade do escoamento, etc.) | Desova/crescimento de trutas; vazões de descarga e transporte de sedimentos | Válido somente para a região que foi desenvolvido; inexistência de validação biológica |
| | Método <i>Califórnia</i> (Waters, 1976) | Mapas planimétricos para velocidade, profundidade, material aluvionar e cobertura | Quantificar vazão e área para desova e crescimento de trutas | Faltam critérios e orientações para recomendação de vazão ecológica |
| | Método $Q_{7,10}$ (Chiang e Jonhson, 1976) | Série histórica de vazões naturais | Construção de estações de tratamento de efluentes e concessão de outorga de água | Não considerar a especificidade dos ecossistemas e a dinâmica natural da ictiofauna |
| | Método de <i>Lyons</i> (Barry W. Lyons, 1979) | Dados hidrológicos (série histórica de vazões naturais) | Concessão de outorga de água e determinação da vazão ecológica | Limitações para aplicação em rios de outras regiões |
| | <i>Consensus Criteria for Environmental Flow Needs – CCEFN</i> (TWDB, 1979) | Dados hidrológicos (percentuais da vazão natural estimada antes da antropização) | Parte das diretrizes do Plano das Águas do Texas (EUA) | Limitações para aplicação em rios de outras regiões |
| | Método de <i>Utah</i> (Geer, 1980) | Dados hidrológicos (série histórica de vazões naturais) | Recomendar vazão ecológica | Método arbitrário, carece comprovação de adequação para a ictiofauna |
| | <i>Aquatic Base Flow ABF</i> (Larsen, 1980) | Série histórica de vazões naturais (média para o mês mais seco do ano) | Manutenção dos organismos aquáticos nos cursos de água | Baixo nível de precisão e resultados mais conservadores |
| HIDROLÓGICA | <i>Maximum Steelhead Spawning Area Method</i> (Osborn, 1981) | Dados hidrológicos e série histórica de vazões naturais | <i>Habitat</i> para espécies de salmonídeos e outras espécies de peixes | Falta especificação de procedimento para recomendação de vazão ecológica |
| | | Série histórica de vazões | Gestão de rios restaurar ou | Definição de |

| | | | | |
|------------|--|---|---|---|
| | <i>Range of Variability Approach (RVA)</i> (Richter <i>et al</i> , 1997) | naturais (32 Indicadores de alteração hidrológica) | manter a variabilidade natural dos regimes hidrológicos p/ recuperação/conservação ecossistemas aquáticos | parâmetros requer muito rigor e trabalho |
| | Indicadores de Alteração Hidrológica - IAH (Richter <i>et al</i> , 1997) | Dados hidrológicos (série histórica de vazões) | Comparar condições de sistemas de avaliação hidrológica | Dificuldade na coleta de dados (necessita de muitas informações) |
| HIDRÁULICA | Método da Região 4 do USFWS (Herrington e Dunham, 1967) | Caracterização de seções transversais/modelo de simulação hidráulica | Permitir manutenção das características do <i>habitat</i> para populações de salmões em rios de montanha | Método de uso restrito em regiões montanhosas |
| | <i>Washington Toe-Width</i> (Swift, 1976) | Distância entre as margens medida no fundo do rio | Determinar vazão ecológica mínima para peixes | Requer tempo e rigor em medições de altura de lâmina e velocidade da água |
| | Método de <i>Oregon</i> (Thompson, 1972) | Conceitos de Largura Ponderada Utilizável e Largura Utilizável de rios | Vazões mínimas e ótimas para locomoção, desova, incubação e crescimento de espécies de peixes | Custo elevado |
| | Método do <i>Colorado</i> (Russel e Mulvaney, 1973) | Seções transversais com seleção e simulação hidráulica de diversos parâmetros do rio | Preservação de espécies salmonícolas das Montanhas Rochosas (EUA) | Trabalhoso e de custo elevado |
| | Método de <i>Washington</i> (Collings, 1974) | Cartografia de trechos do rio (mapa de isolinhas) | Proteger o <i>habitat</i> de espécies de peixes selecionadas | Muito trabalho de campo e custo elevado |
| | Método do Perímetro Molhado (MPM) (Annear e Conder, 1984) | Informação hidráulica do rio/simulação hidráulica/construção de gráfico | Boas condições de <i>habitat</i> para a ictiofauna | Considera as características físicas e não as necessidades da biota do rio |
| | Raio Hidráulico Ecológico (Liu <i>et al</i> , 2007) | Informação do rio (raio hidráulico, rugosidade e gradiente hidráulico) | Determinar velocidade de vazão ecológica do rio | Carece de credibilidade |
| HABITAT | <i>Instream Flow Incremental Methodology - IFIM</i> (Bovee, 1982) | Procedimentos teóricos (história do rio, espécies de peixes e ciclo de vida, etc.) e computacionais (vazões, profundidades e velocidades) | Gestão de recursos hídricos reduzindo impactos negativos aos ecossistemas, protegendo todas ou o maior número possível de espécies | Requer muitos dados de campo; difícil uso; requer bom entendimento das espécies de estudo |
| | Método <i>RCHARC</i> (Nestler <i>et al</i> , 1993) | Combina conceitos do <i>IBI</i> (caracteriza biologicamente comunidades de peixes de riachos) e <i>PHABSIM</i> (pesquisa do <i>microhabitat</i> de locais de amostragem selecionados) | Avaliar o habitat dos rios sob condições de vazões baixas (estuda efeitos de alterações de vazões sobre biota aquática em projetos de canais) | Não faz comparações quantitativas entre trechos do rio e requer grande número de dados |
| | <i>Tidal Distributary/ Estuary Method</i> (Duke Engineering, 1999) | Modelo de regressão que correlaciona níveis de água como uma função da maré e vazão | Manutenção de processos e recursos de estuários (<i>habitat</i> adequado para peixes e vegetação) | Não considera a salinidade, fator importante nos estuários |

| | | | | |
|-----------|--|--|---|--|
| | <i>Hatfield e Bruce Western Salmonid Regressions</i> (Hatfield & Bruce, 2000) | Equações que avaliam vazão que maximiza a área usada ponderada com estudos do PHABSIM | Proteção do <i>habitat</i> de trutas e salmões | Recomendado apenas para nível de reconhecimento |
| | <i>Mesohabitat Simulator MesoHABSIM</i> (Piotr Parasiewicz, 2001; IFC, 2004) | Sistema <i>MesoHABSIM</i> (mapeamento do <i>habitat</i> de todas as seções do rio sob vazões múltiplas) | Fornecer avaliação de <i>habitat</i> para utilizar em cenários de recuperação de rios | Dificuldade de logística para o estudo; custo elevado |
| | <i>Demonstration Flow Assessment – DFA</i> (IFC, 2004), | Observação direta do <i>habitat</i> do rio sob diferentes vazões, profissionais elegem as alternativas adequadas | Licenciamento de hidrelétricas / permitir reprodução de salmões | Subjetividade e incerteza, pois não utiliza quantificação |
| HOLÍSTICA | <i>Building Block Methodology – BBM</i> (King & Louw, 1998) | <i>Workshop</i> com partes interessadas, estudos de escritório e de campo, pesquisa sócio-econômica, análise hidráulica e hidrológica do rio | Rios regularizados e não regularizados, em se tratando da restauração das vazões; considera todos os organismos aquáticos | Julgamento de sua efetividade necessita de tempo |
| | <i>Método Holístico</i> (Arthington <i>et al</i> , 1992) | Profissionais fazem julgamentos acerca das conseqüências ecológicas para várias vazões no rio, em relação aos aspectos quantitativos e temporais | Recuperação de ecossistemas de rios, pântanos, estuários e águas subterrâneas | Não possui conjunto estruturado de procedimentos para uso; requer treinamento especializado; custo elevado na aquisição de dados |
| | <i>Downstream Response to Imposed Flow Transformations – DRIFT</i> (King <i>et al</i> . 2003). | Módulos de estudo biofísico, sociológico, de desenvolvimento de cenários e módulo econômico | Recuperação de ecossistemas de rios e regiões ribeirinhas | Limitação das interações sinérgicas entre diferentes cenários de vazões |

Tabela 3. Resumo das metodologias mais adotadas para determinação de vazão ecológica em rios.

Metodologias adotadas no Brasil

No Brasil, as técnicas utilizadas para determinação de vazões ecológicas em rios resumem-se aos métodos hidrológicos, sendo mais específico o método da vazão $Q_{7,10}$, adotando-se como vazão ecológica uma fração deste valor referencial, adotando-se também metodologias hidráulicas, principalmente o método da curva de permanência, no qual a vazão ecológica é uma fração da Q_{90} (vazão associada à permanência de 90% no tempo), ou da Q_{95} (vazão

associada à permanência de 95% no tempo). A partir do ano 2000, iniciou-se a utilização da metodologia *habitat*, especificamente o método IFIM. Salienta-se que todas as abordagens são destituídas de significado ecológico e que a vazão ecológica é determinada indiretamente, a partir dos critérios de outorga adotados pelos Estados (Reis, 2007).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei n. 9433/97, preconiza que a vazão residual ou remanescente deve satisfazer às seguintes demandas: sanitária, ecológica (vazão ecológica),

abastecimento humano e industrial, dessedentação de animais, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, lazer, dentre outras, não havendo uma clara definição de como será calculada essa vazão.

O Método Tennant foi empregado na elaboração dos planos diretores de recursos hídricos das bacias dos rios das Velhas e Paracatu, no estado de Minas Gerais (Froes, 2006).

Sarmento *et al* (1999) apresenta o estado da arte da vazão ecológica. Uma das suas conclusões foi

que para o Brasil a legislação e as metodologias que tratavam sobre vazão residual eram escassas. Concluiu também que as metodologias existentes nos Estados e nas instituições federais brasileiras recomendavam vazões residuais (vazões a permanecer a jusante das obras hidráulicas) fundamentadas somente em parâmetros hidráulicos, desconsiderando a ecologia aquática, ou seja, utilizavam o método $Q_{7,10}$, sendo praticado até a presente data.

Pelissari (2000) realizou o primeiro trabalho de pesquisa formal no Brasil em vazão ecológica, utilizando os métodos *IFIM*, *Tennant*, Perímetro Molhado, *ABF* e $Q_{7,10}$ para a determinação da vazão ecológica no rio Timbuí, no Espírito Santo. Além deste, Pelissari, juntamente com outros pesquisadores, contribuiu com os seguintes estudos: “Índices de Preferência de *habitat* para peixes na determinação da vazão residual do Rio Timbuí” (Pelissari *et al.*, 1999);

“Determinação da demanda ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, no Espírito Santo” (Pelissari *et al.*, 2001); “Vazão ecológica a ser considerada no licenciamento ambiental dos sistemas de abastecimento de água” (Pelissari *et al.*, 2001); “Vazão ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, no Espírito Santo” (Pelissari *et al.*, 2003); “Determinação da vazão ecológica do rio Santa Maria da Vitória para caracterização da disponibilidade hídrica atual e futura da Grande Vitória-ES” (Pelissari *et al.*, 2004).

Curado, (2003), apresenta indicadores de vazões mínimas de referência em sub-bacias do rio Miranda, no estado do Mato Grosso do Sul. Aplicou métodos para o estabelecimento de vazão mínima, definida através de valores numéricos que representam a quantidade de água que deve permanecer no leito do rio. A metodologia proposta foi aplicada a uma seção no Rio Aquidauana, sendo posteriormente repetida para

comparação com outra seção no Rio Miranda.

Sarmento *et al.* (2005) executou o projeto de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL para Furnas, determinando a vazão ecológica do Rio Paraíba do Sul a jusante da Usina Hidrelétrica de Funil, no Rio de Janeiro. Fez a simulação de *habitat*, e por conseqüência, determinou a vazão ecológica do rio a jusante da Central Hidrelétrica de Funil até a cidade de Resende, através do método *IFIM*.

Cenário no uso das metodologias

Tharme (2003) apresenta uma estatística mundial e as tendências sobre o uso de metodologias para a avaliação de vazões ecológicas, mostrada na Tabela 4. Pelo menos 207 metodologias foram identificadas em 44 países.

| Metodologia | Percentual do Número Global (207) de Metodologias Existentes - (%) |
|----------------------|--|
| Hidrológica | 29,5 |
| Hidráulica | 11,1 |
| Habitat | 28,0 |
| Holística | 7,7 |
| Outros & Combinações | 23,7 |

Tabela 4. Metodologias de vazão ecológica por tipo e proporções relativas de utilização no mundo (Tharme, 2003).

A metodologia Hidrológica se destaca em 29,5%, seguida pela metodologia Habitat, com 28,0 %. Tennant é o método mais utilizado, do tipo hidrológico, em 16 estados ou províncias na América do Norte.

Pelo menos 25 países aplicaram o método. A aplicação do método requer a confiabilidade dos dados da série histórica hidrológica. A qualidade dos dados biológicos é importante, como por exemplo, a fase

da periodicidade da vida dos peixes. Além disso, a vazão média anual trabalhada pelo método, muitas vezes não reflete o aspecto sazonal da hidrologia. Por outro lado, o método tem baixo custo, é rápido e fácil. Não requer necessariamente medições de campo, mas ajudariam na validação do método. Os resultados apresentados são relativamente consistentes quando aplicados em rios de diferentes regiões.

O *IFIM* tem sido considerado como a metodologia que utiliza o *habitat* de modo científico e confiável para avaliar a vazão ecológica. O método permite avaliar os aspectos temporais e espaciais do *habitat* do rio como uma conseqüência das propostas de gestão dos recursos hídricos. A coleta de dados requer muito tempo,

equipamentos caros e necessita equipe multidisciplinar para trabalhar os seus módulos e a interpretação das análises requer biólogos treinados.

Dois pesquisas foram realizadas em 1981 e 1996 sobre as práticas de vazão ecológica nos Estados e Agências Federais dos Estados Unidos e do Canadá (Reiser, 1989). Quarenta e seis Estados e doze Províncias Canadenses responderam à pesquisa. Os resultados da pesquisa mostraram que o método mais comumente aplicado (utilizado em 38 estados ou províncias) para avaliar a vazão ecológica é o *Fish and Wildlife Service Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)*. O *RVA* foi empregado em mais de 30 estudos envolvendo a vazão ecológica nos EUA, Canadá e África do Sul. Esse método permite estabelecer metas provisórias de vazões e estratégias de gestão do rio sem dados ecológicos de longo período. A disponibilidade de dados hidrológicos confiáveis limita a aplicação de todos os parâmetros *IHA*, podendo gerar incertezas na interpretação da variação natural dos parâmetros (Sarmiento, 2007).

Na metodologia Hidráulica (11,1%), o método do Perímetro Molhado é o mais utilizado no mundo e terceiro na América do Norte, na última década. Abrange somente vazões baixas e não considera a variabilidade inter-anual. Adicionalmente, não considera a geomorfologia do canal, a qualidade da água, e é aplicado para canais com remansos bem definidos. Para canais com seções transversais com formas parabólicas ou em forma de V, a relação perímetro molhado e vazão não apresentam o ponto de inflexão bem definido. É aplicado a rios que não possuem medições hidrológicas.

Segundo Tharme (2003) as tendências nos tipos de metodologia, considerando o mundo dividido em seis regiões (Australasia, parte restante da Ásia, África, América do Norte, Américas do Sul e Central, Europa e Oriente Médio) mostram que a Europa e a América do Norte são as que mais empregam a metodologia Hidrológica

com 38 e 26%, respectivamente. Tem pouco uso na Ásia Pacífica, excluindo Austrália e Nova Zelândia. A metodologia Hidráulica é mais utilizada na América do Norte (76%), bastante utilizada também na Europa e Australasia. Dentre todas as metodologias que utilizam o Habitat, os Estados Unidos lidera com 51%, sendo pouco utilizado nas outras cinco regiões. A região da Australasia se destaca no uso da metodologia Holística (65%) dentre todas as metodologias. Em segundo lugar está a África, com 29%. Na Europa o emprego desse tipo de metodologia ocorre somente na região do Reino Unido.

Todos os tipos de metodologias são empregados na Austrália e na Europa, sendo que somente dois tipos, que são utilizados por todas as regiões (as metodologias Hidrológica e Habitat), são praticados nas Américas Central e do Sul. A Nova Zelândia tem investido nas metodologias Hidrológica e Habitat, dando pouca atenção à metodologia Holística. Os Estados Unidos e Canadá têm feito poucos esforços em explorar a metodologia Holística, focando as suas pesquisas em metodologia Habitat. As metodologias consideradas nos Estados Unidos, Austrália e Canadá são determinadas pelos Estados. Portugal, Itália e Espanha têm utilizado a metodologia Hidrológica, a França, a metodologia Habitat. O Brasil e o Japão estão na vanguarda nos desenvolvimentos regionais para avaliação da vazão ecológica. A Austrália e a África do Sul sobressaem no uso da metodologia Holística (Tharme, 2003).

No Brasil, o tema vazão ecológica foi tratado pela primeira vez formalmente por Sarmiento *et al*, (1999). Em geral, a fixação de vazões ecológicas (de referências, residuais, remanescentes) tem sido feita principalmente através da legislação nos níveis Estadual e Federal, principalmente para uso nos procedimentos administrativos de concessão de outorga de água e construção de barragens. A maioria desses procedimentos segue, indiretamente, a metodologia

hidrológica utilizando o conceito de $Q_{7,10}$. Em segundo lugar em aplicações destaca-se o método de Tennant com poucas aplicações. Luz *et al*, 2004, usou o método IHA – Indicators of Hydrologic Alteration no rio São Francisco. A metodologia Hidráulica aparece em alguns trabalhos através do Método do Perímetro Molhado.

O método IFIM, metodologia Habitat, foi aplicado pioneiramente no país no ano de 2000, nos rios Timbuí e Santa Maria da Vitória, no Espírito Santo e no rio Paraíba do Sul em 2004, no estado do Rio de Janeiro. Essas são as únicas aplicações do IFIM que se tem registro no país (Sarmiento, 2007).

Em 2006 a Câmara Técnica de Análise de Projetos do CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos realizou uma discussão sobre critérios para a definição de vazão ecológica, vazão remanescente ou vazão mínima, através de apresentações de profissionais e de representantes de diversas instituições.

DISCUSSÃO

Este estudo objetivou descrever as características das principais metodologias utilizadas para a determinação de vazões ecológicas em rios. São muitas as metodologias existentes, no entanto devido à complexidade, facilidade de aplicação, variabilidade de custos, entre outros fatores, um número reduzido delas são realmente utilizadas na prática. Estas metodologias diferem em níveis de complexidade, com métodos simplificados necessitando de poucas informações, tais como vazões históricas, área de drenagem, e métodos mais complexos, os quais requerem uma maior gama de dados e informações, bem como dificuldade em adquiri-las (substrato do rio, profundidades, etc.)

Através de estudos comparativos conduzidos, sabe-se que muitas vezes, vazões recomendadas por um método mais complexo como, por exemplo, o Método IFIM, está muito próximo da faixa de vazões resultantes de um método simples, como o Método

de Tennant. Isto demonstra que há a possibilidade, em situações de insuficiência de dados e/ou recursos materiais e humanos, de utilizar métodos de menor complexidade e mais acessíveis.

CONCLUSÕES

• As metodologias mais antigas, utilizadas há mais tempo para determinar vazões ecológicas não foram desenvolvidas com esse fim específico, sendo adaptadas ao longo do tempo para esse propósito.

• Só recentemente, acompanhando a crescente preocupação com as questões ambientais, é que surgiram metodologias especialmente desenvolvidas para a determinação de vazões ecológicas, que incorporam variáveis ambientais na concepção.

• As metodologias Habitat e as metodologias Holísticas são as que agregam critérios que levam em conta o meio ambiente de modo abrangente e com visão sistêmica.

• Há carência de metodologias desenvolvidas especificamente para aplicação em rios de regiões tropicais, como os brasileiros. Tais rios apresentam características bem diferentes dos rios de regiões de clima temperado, onde a maior parte das metodologias para determinação de vazões foram desenvolvidas e aplicadas.

REFERÊNCIAS

ALVES, M.E. **Métodos de determinação do caudal ecológico**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 1993. 162 p.

ANNEAR, T.C.; CONDER, A.A. **Relative bias of several fisheries instream flow methods**. North American Journal of Fisheries Management, 4. p. 451-539. 1984.

ARTHINGTON A.H.; KING, J.M.; O'KEEFE, J.H.; BUUN, S.E.; DAY, J.A.; PUSEY, B.J.; BLUHDORN, D.R. &

THARME, R. **Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystems**. In Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment, Pigram JJ, Hooper BP (Eds). The Centre for Water Policy Research, University of New England: Armidale, Australia, 1992.

ARTHINGTON, A.H. **Environmental Flow Assessment with Emphasis on Holistic Methodologies**. Proceedings of Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries. Volume II. Welcomme R. (Eds). FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, 2004.

BENETTI, A.D.; LANNA, A.E.; COBALCHINE, M.S. **Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos: Vol. 8, n.2 Abr/Jun, 2003.

BOVEE, K.D. **A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology**. Instream Flow Information Paper 12. U.S.D.I. Fish Wild. Serv., Office of Biol. Serv. FWS/OBS-82/26: 1982. 248 p.

COLLISCHONN, W; Souza, C. F.; Freitas, G. K. ; Priante, G. R.; Agra, S. G.; Tassi, R., 2005. **Em busca do hidrograma ecológico**. Recursos Hídricos: Jovem Pesquisador, Fortaleza: ABRH, 2005.

CURADO, L.C. **Indicadores de vazões mínimas de referência em sub-bacias do rio Miranda**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Tecnologias Ambientais. Campo Grande, 2003.

REIS, A.A. dos. **Estudo comparativo, aplicação e definição de metodologias apropriadas para determinação da vazão ecológica na bacia do rio Pará, em Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 2007. 191p.

DUKE ENGINEERING. **Instream Flow Council**. 2004. Instream Flows for Riverine Resource Stewardship. Cheyenne, Wyoming. 5400 Bishop Boulevard. ISBN 0-9716743-1-0.

FROES, C. Apresentação na 52ª Reunião da Câmara Técnica de Análise de Projeto do CNRH-Conselho Nacional de Recursos Hídricos. 2006. (célia.froes@igam.mg.gov.br).

GONÇALVES, M.A., KOIDE, S., NETTO, O.M.C. **Revisão e aplicação de alguns métodos para determinação de vazão mínima garantida em cursos de água**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba.

GORE J.A.; NESTLER J.M. **Instream flow studies in perspective**. Regulated Rivers: Research and Management 2: 1988. p. 93-101.

HATFIELD, T.; BRUCE, J. IFC-Instream Flow Council. 2004. Instream Flows for Riverine Resource Stewardship. Cheyenne, Wyoming. 5400 Bishop Boulevard. ISBN 0-9716743-1-0. 2000.

IFC- Instream Flow Council, 2004. **Instream Flows for Riverine Resource Stewardship**. Cheyenne, Wyoming. 5400 Bishop Boulevard. ISBN 0-9716743-1-0.

IUCN- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. **The Essentials of Environmental Flows**. 2003.

KING, J.M.; LOUW, D. **Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology**. Aquatic Ecosystem Health and Restoration, 1998. 1: 109-124.

LIU, C.; MEN, B. **An Ecological Hydraulic Radius Approach to Estimate the Instream Ecological Water Requirement**. Progress in Natural Science, Volume 17, Issue 3 March, 2007. pages 320-327.

LOAR, J. M.; SALE, M. J. **Analysis of Environmental Issues Related to Small-**

- Scale Hydroelectric Development.** V. *Instream Flow Needs for Fisheries Resources.* Environmental Sciences Division Publication No. 1829, ONRL/TM-7861. Oak Ridge, Tennessee (EUA), Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 1981.
- LUZ, L. D.; Luz, J. A. G. da; Amorim, F. B.; Proença C. N.; Pires, A. S., **Vazões mínimas e vazões ecológicas - Qual a necessidade de água em um rio?** In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, Ma, 2004.
- LUZ, L. D.; AMORIN, F. B.; LUZ, J. A. G. da. **Alterações hidrológicas no baixo trecho do Rio São Francisco e Aspectos ecológicos – elementos para definição de vazões ecológicas.** In: Anais do VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza, CE. ABES, 2006.
- MORHARDT, J.E. **Instream Flow Methodologies.** EA Engineering Science and Technology, Inc. California, USA, 1986.
- PELISSARI, V. B.; SARMENTO, R.; TEIXEIRA, R. L. **Índices de preferência de habitat para peixes na determinação da vazão residual do Rio Timbuí.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, Belo Horizonte, MG. Livro de Resumos BH: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. p.157.
- PELISSARI, V. B. **Vazão ecológica de rios: estudo de caso: Rio Timbuí, Santa Teresa, ES.** 2000. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFES, Espírito Santo, 2000.
- PELISSARI, V. B.; SARMENTO, R. **Determinação da Demanda Ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, Estado do Espírito Santo.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 14. João Pessoa, PB, 2001.
- PELISSARI, V. B.; SARMENTO, R.; TEIXEIRA, R. L. **Vazão ecológica a ser considerada no licenciamento ambiental dos sistemas de abastecimento de água.** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 21. João Pessoa, PB, 2001.
- PELISSARI, V.B.; SARMENTO, R. **Vazão Ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, ES.** V Simpósio Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente. Vitória, ES, 11 a 15 de agosto, 2003.
- PELISSARI, V. B.; SARMENTO, R. **Determinação da vazão ecológica do rio Santa Maria da Vitória para caracterização da disponibilidade hídrica atual e futura da Grande Vitória.** Revista Ciência e Tecnologia em Vitória – FACITEC. Vitória, ES, 2004.
- REISER, D. W; WESCHE, T. A.; ESTES, C. **Status of instream flow legislation and practise in North America.** Fisheries 14(2): 22–29. 1989.
- RICHTER, B.D.; Baumgartner, J. V.; Wigington, R.; Braun, D. P. **How much water does a river need?** Freshwater Biology. 37: 231-249. 1997.
- SARMENTO, R.; PELISSARI, V. B., 1999. **Determinação da vazão residual dos rios: estado da arte.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, ABRH. Belo Horizonte, MG. 1999.
- SARMENTO, R.; PELISSARI, V. B. **Determinação da Vazão Ecológica do Rio Paraíba do Sul a jusante da Usina Hidrelétrica de Funil.** In: V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Florianópolis-SC, 2006.
- SARMENTO, R. **Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo.** UNESCO/ANA/CBHSF, 2007.
- SHIAU, J. T. **Feasible Diversion and Instream Flow Release Using Range of Variability Approach.** Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 130, No. 5, pp. 395-404, (doi 10.1061/(ASCE) 0733-9496(2004)130:5(395)) J, 2004.
- STALNAKER C.B.; LAMB, B. L.; HENRIKSEN, J.; BOVEE, K; BARTHOLOW, J. **The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM.** National Ecology Research Center, Internal Publication. National Biological Survey: Global Perspectives 425. Fort Collins, CO, USA, 1994.
- TENNANT, D.L. **Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources.** Fisheries 1(4): 6–10. 1976.
- THARME, R.E. **A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers.** River Research and Applications. 19: 397-441. 2003. Published online in Wiley Interscience (www.interscience.wiley.com).
- THE WORLD BANK. **Environmental flows: concepts and methods.** Technical Note C.1. Washington, DC, 2003.
- WESCHE, T.A.; RECHARD, P.A. **A summary of instream flow methods for fisheries and related research needs.** Water Resources Research Institute Eisenhower Consortium Bulletin, 9, University of Wyoming, Laramie, 1980.