

ESTUDO COMPARATIVO, APLICAÇÃO E DEFINIÇÃO DE METODOLOGIAS APROPRIADAS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO ECOLÓGICA NA BACIA DO RIO PARÁ, EM MINAS GERAIS

Alberto Assis dos Reis¹; Mauro Naghettini² & Marcelo de Deus Melo³

RESUMO --- Nos últimos anos, apesar dos inegáveis progressos institucionais e legais, vem crescendo a demanda pelos recursos hídricos, cujas limitações, sob os aspectos qualitativo e quantitativo, são sobejamente conhecidas, agravando, assim, os conflitos entre os usos e usuários da água. Com isso, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento e aprimoramento de métodos e técnicas que permitam o crescimento sustentável. A vazão ecológica traduz-se principalmente na proteção da biota presente nos corpos d'água, com a manutenção da integridade dos processos naturais que se dão entre o meio físico e o biológico, além de vinculada às variações do regime hidrológico natural. Neste trabalho, efetuou-se um estudo comparativo entre as metodologias mais recentes de determinação de vazão ecológica, focalizando principalmente nas de classificação de habitats, como os modelos *WAIORA* e *RHYHABSIM*, buscando selecionar aquela ou aquelas que melhor se adaptam à realidade brasileira, levando em consideração as necessidades físico-químicas da ictiofauna, os conceitos mais modernos de gestão de recursos hídricos, bem como as restrições de caráter econômico, e propondo adaptações que levem a uma maior aplicabilidade da metodologia às nossas necessidades. O estudo foi levado a termo em um trecho do rio Pará, a jusante do aproveitamento hidrelétrico de Cajurú, localizado na região centro-sul do estado de Minas Gerais.

ABSTRACT --- In the recent years, despite the undeniable progress at the institutional and legal instances, it has been observed a growing demand for water resources, whose restrictions, under both aspects of quality and quantity, are well known. This tendency has the undesirable effect of aggravating the conflicts among different uses and users of water resources, thus making even more necessary the development and improvement of management techniques that promote sustainability. The notion of ecologic flows is related to the idea of preserving the existing aquatic biota in water bodies, thus allowing the water environment to sustain the integrity of the natural processes interfacing the physical and biological phenomena, especially in their relations linked to variations of hydrological regime. This paper presents a comparative study among recent methodologies for determining ecological flows, focusing on those based on habitat classification, such as the *WAIORA* and *RHYHABSIM* models, searching for the one or the ones that are adequate for the Brazilian reality, taking into account (i) the physical and chemical needs of the fish populations, (ii) the modern concepts of water resources management, and (iii) economic restrictions. The study was carried out in the reach of the Pará river, downstream the Cajurú hydropower plant, located in the south-central region of the Brazilian state of Minas Gerais.

Palavras chave: vazão ecológica, gestão de recursos hídricos, biota aquática.

1) Mestrando – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Escola de Engenharia – UFMG. Rua Clemente de Faria 232, B. Industrial, Contagem, MG, 32235-310 – email: betoreis@cemig.com.br

2) Professor – Universidade Federal de Minas Gerais

3) Engenheiro de Planejamento Hidroenergético – CEMIG – mdeus@cemig.com.br

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, apesar dos inegáveis progressos institucionais e legais, vem crescendo a demanda pelos recursos hídricos, cujas limitações, sob os aspectos qualitativo e quantitativo, são sobejamente conhecidas. Com efeito, o aumento da demanda agrava os conflitos entre os usos e usuários da água. Com isso, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento e aprimoramento de métodos e técnicas que permitam o crescimento sustentável, ou seja, o desenvolvimento das atividades antrópicas sem que haja maiores prejuízos para o meio ambiente, tanto sob o cenário atual, quanto prospectivo.

A sociedade moderna, na busca do atendimento de suas necessidades crescentes de água, vem aumentando cada vez mais sua interferência no regime dos cursos d'água, com a implantação de barragens, retificação de leitos, dentre outras atividades. No intuito de amenizar o impacto dessas obras sobre o meio ambiente, são utilizadas metodologias de determinação da vazão ecológica em cursos e corpos d'água. A vazão ecológica traduz-se principalmente na manutenção dos fluxos mínimos sazonais de água necessários para a sustentação e proteção da biota presente nos corpos d'água e trechos fluviais.

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.

O rio é um sistema pulsante, regulado pelo regime hidrológico de sua bacia hidrográfica, ou seja, as condições do ambiente fluvial se alteram a cada trecho, em função do regime de escoamento do curso d'água (Schwarzbald, 2000). Desta forma, em uma visão moderna, a vazão ecológica não é apenas um valor fixo e sim, de fato, deve refletir a sazonalidade das vazões naturais dos rios.

Desta forma, no presente trabalho, buscou-se selecionar, dentre as metodologias mais recentes de determinação de vazão ecológica, aquela ou aquelas que melhor se adaptam à realidade brasileira, levando em consideração as necessidades físico-químicas da ictiofauna, os conceitos mais modernos de gestão de recursos hídricos, bem como as restrições de caráter econômico, e propondo adaptações que levem a uma maior aplicabilidade da metodologia às nossas necessidades. O estudo foi levado a termo em um trecho do rio Pará, a jusante do aproveitamento hidrelétrico de Cajurú, localizado na região centro-sul do estado de Minas Gerais.

2. JUSTIFICATIVA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até a presente data, no Brasil, não existem muitos trabalhos relacionados à determinação da vazão reduzida de cursos d'água. Na maioria dos casos, são usadas metodologias baseadas

unicamente nos regimes hidrológicos dos cursos d'água. São usados, como referência, valores como a $Q_{7,10}$ (vazão mínima média com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos), a Q_{95} e Q_{90} (vazões com 95% e 90% de permanência no tempo respectivamente), dentre outros. Entretanto, nenhum desses parâmetros tem uma clara associação com as alterações causadas nas características hidráulicas do trecho fluvial e, muito menos, com os efeitos sobre a biota local. De fato, sob a ótica ambiental, tais metodologias podem ser consideradas cada vez menos recomendáveis.

Nos reservatórios de hidrelétricas, sempre se constata a necessidade de, em certos momentos, manter a vazão restringida em um trecho de rio entre o barramento e a casa de força ou a jusante dessa, por motivos operativos ou de manutenção. Nessas situações surge a questão: qual a vazão a ser mantida sem que haja prejuízos à biota do curso d'água? Na etapa de viabilidade técnica-econômica de empreendimentos hidroenergéticos, a definição deste valor de vazão ecológica é de grande importância, pois dependendo do valor adotado, ele pode trazer grandes impactos ambientais se for subestimado, ou, se for superestimado, pode aumentar sobremaneira os custos a ponto de inviabilizar o empreendimento. Segundo *Ministry for the Environment* (1998) da Nova Zelândia, pode-se definir uma seqüência lógica de tomada de decisão para os gerenciadores de recursos hídricos, a qual encontra-se ilustrada no fluxograma da figura 1.

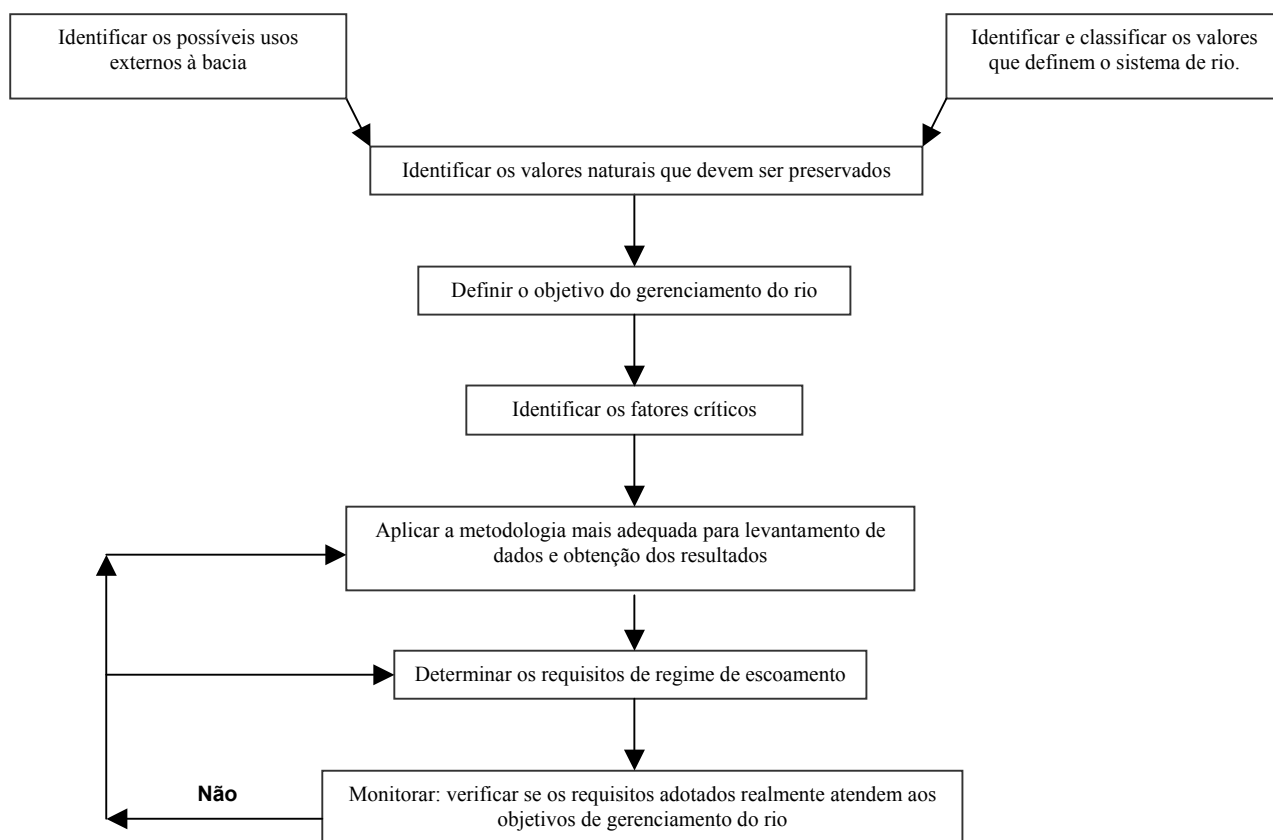


Figura 1 - Seqüência lógica de tomada de decisão para gerenciadores de recursos hídricos
(Adaptado de: Ministry for the Environment, 1998)

Dentro do plano diretor de bacias hidrográficas, uma questão bastante importante para a gestão dos recursos hídricos, deve ser a determinação da vazão mínima a ser mantida de modo a garantir a manutenção do meio biótico do curso d'água, ou que interfira o mínimo possível na dinâmica da vida aquática, permitindo, assim, o desenvolvimento sustentável e a manutenção dos recursos naturais para as próximas gerações. Nesse contexto, a questão-chave para a gestão dos recursos hídricos é a determinação das vazões necessárias para sustentar os valores naturais que identificam um sistema fluvial. Esses valores são os ecológicos, os estéticos e os valores tradicionais e culturais da população ribeirinha.

Como valores ecológicos pode-se citar o suporte à migração das espécies, a manutenção dos *habitats* (em termos de produção de alimento e qualidade da água) e áreas de preservação, principalmente no que diz respeito aos trechos de reprodução das espécies, dentre outros. Na determinação da capacidade de suporte à vida, o gestor pode optar por uma série de possibilidades. Como exemplo, pode-se decidir pela manutenção da capacidade histórica de suporte à vida do rio.

Os valores estéticos dizem respeito principalmente às características naturais do local e até a elementos recreativos, sendo determinados por propriedades físicas e naturais das margens, acompanhados dos valores culturais das pessoas que vivem ao longo delas, os quais podem variar através do tempo, da cultura e dos vários setores da sociedade.

Os valores tradicionais e culturais das populações ribeirinhas estão ligados principalmente aos valores religiosos, dando aos cursos d'água um valor muito além do material. Nesse, a água é tratada como uma força vital que alimenta todo o meio ambiente, inclusive as comunidades que vivem às suas margens. Assim, a qualidade da água e o regime hídrico têm grande importância nas atividades culturais e econômicas das populações que vivem às suas margens.

Como se pode ver, a determinação da vazão residual passa por avaliações bastante complexas de elementos que são afetados pela variação do regime hidrológico, os quais alteram o comportamento hidráulico do rio e que, por sua vez, influenciam toda a vida biológica do curso d'água. Esse é o elemento chave para o gerenciamento de recursos hídricos, por meio do qual se deve promover o desenvolvimento econômico de forma sustentável, ou seja, preservando o meio ambiente nos cursos d'água. Por isso, entende-se que não é aconselhável a utilização, como parâmetro para vazão ecológica ou residual, apenas de valores baseados em séries históricas e dados estatísticos. Deve-se, na verdade, fazer uma análise mais criteriosa, estudando o comportamento hidráulico do rio e como ele afeta os ambientes que dele dependem.

Existe um número grande de variáveis que controlam os recursos hídricos. De fato, considera-se que os rios são um produto de variáveis que operam em diferentes escalas, temporais e espaciais. *Ministry for the Environment* (1998) sugere a seguinte organização em níveis hierárquicos destas variáveis, destacando-se a forte interação entre aquelas de um mesmo nível:

Variáveis de escala regional: o clima, as atividades humanas e a geologia atuando no nível macro;

Variáveis na escala da bacia: a vegetação, o regime de escoamento, os sedimentos e o relevo, esses operando em um segundo nível;

Variáveis na escala do trecho fluvial: as variáveis de qualidade da água, tais como nutrientes, pH, sólidos suspensos, temperatura e oxigênio dissolvido, assim como as variáveis hidrofísicas, tais como largura do canal, granulometria do substrato e sua estabilidade, velocidade da água, sólidos suspensos, inclinação do leito e profundidade da água. Nessa escala, são definidos os chamados micro-habitats.

Atualmente, estão disponíveis algumas técnicas para o planejamento e determinação de vazões residuais. Em situações de baixa intensidade, não são requeridos muitos detalhes porque as questões são mais diretas. Portanto, podem ser utilizadas técnicas com respostas rápidas e a custos relativamente baixos, entre as quais destacam-se:

Métodos hidrológicos – várias técnicas hidrológicas estão disponíveis; sua facilidade de aplicação reside no fato que seu uso requer apenas a existência de uma série local de dados fluviométricos. O uso da série temporal pressupõe que as vazões observadas suportam a biota aquática em níveis aceitáveis (Weshe e Rechard, 1980), o que somente se aplica para bacias não desenvolvidas, com baixa influência antrópica, ou com padrão de desenvolvimento bastante estável.

Método de Tennant (Tennant, 1976) – esse método consiste de uma série de valores sazonais de vazão, os quais representam porcentagens da vazão média anual, conforme ilustrado na tabela 1. Tennant usou 10 anos de observações pessoais em Montana (EUA) e no meio oeste dos Estados Unidos, para caracterizar os rios dentro da variabilidade da qualidade do habitat da truta, baseado em medições de vazões. Tennant também recomendou a ocorrência de eventos periódicos de cheias para que sejam removidos sedimentos e outros materiais do fundo do rio.

Tabela 1 - Regimes de vazão recomendados pelo método de Tennant para peixes, vida aquática e recreação, para a região noroeste dos EUA.

Condição do rio	Vazão recomendada (porcentagem da vazão média anual)	
	Outubro – Março (seco)	Abril – setembro (chuvoso)
Lavagem ou máxima	200 %	
Faixa ótima	60% – 100%	
Excepcional	40%	60%
Excelente	30%	50%
Boa	20%	40%
Regular ou com degradação	10%	30%
Má ou mínima	10%	10%
Faixa de degradação elevada	0% - 10%	

As seguintes técnicas, denominadas intermediárias, são menos generalistas e buscam melhor analisar a influência da variação da vazão nas características do ambiente aquático:

Aproximação de Tennant Modificado – O analista pode iniciar uma análise exploratória dos habitats de importância reconhecida, para as espécies de interesse, em correspondência a proporções (ou frações) da vazão média anual. Em seguida, coleta-se os dados da seção transversal do rio como largura, profundidade e velocidade, para cada vazão, reformulando as recomendações da tabela de Tennant. Nesse caso, a nova tabela deverá refletir observações empíricas do analista e irá tratar especificamente das espécies de interesse.

Técnica do perímetro molhado – A técnica do perímetro molhado (Anner e Conder, 1984) é um outro método usado com algum sucesso no estado americano de Montana e em outros locais. De acordo com essa metodologia, o valor desejado de vazão mínima decorre de um índice de habitat que incorpora as características do canal. A técnica do perímetro molhado seleciona a mais estreita seção transversal do rio, a qual é supostamente capaz de promover o mínimo de habitat necessário, constituindo-se em um trecho crítico representativo do restante do curso d'água. O procedimento usual é encontrar o ponto de inflexão na relação perímetro molhado e vazão do rio, o qual será o referencial para o habitat mínimo aceitável. Para vazões superiores àquela correspondente à do ponto de inflexão, o perímetro molhado aumenta de forma mais lenta. Uma vez que a vazão de inflexão é estimada em uma seção estreita, supostamente capaz de promover o mínimo de habitat, considera-se que outras áreas do habitat também estão protegidas.

Por outro lado, quando os problemas tornam-se mais complexos e as negociações mais acirradas, geralmente ligadas à implantação de empreendimentos específicos, faz-se necessária a utilização de técnicas que sejam capazes de responder, de forma concisa e precisa, o comportamento das variáveis de interesse com a variação da vazão. Recentemente, alguns grupos de pesquisadores vêm apresentando promissoras metodologias na determinação da resposta da ictiofauna às mudanças em seu habitat, dentre as quais destacam-se:

Metodologia IFIM – Instream Flow Incremental Methodology (Stalnaker et al., 1995) – Trata-se de um conjunto de métodos para acesso de habitat, recomendados para situações nas quais gerenciamento de recursos hídricos está voltado para a preservação de determinadas espécies. Estes métodos são relativamente mais caros devido à grande quantidade de informação de campo a ser coletada, para servir como parâmetro de entrada para as diversas etapas metodológicas. A metodologia IFIM habilita os gerenciadores de recursos hídricos a quantificar a disponibilidade de regimes de escoamento, natural e modificado, para espécies selecionadas. Em condições adequadas, é forçoso reconhecer o IFIM como o método mais acurado para estabelecer uma vazão mínima para a sustentação de determinadas espécies (Washington State Department of Ecology, 1999). O

método *IFIM* fornece uma estimativa da quantidade disponível de habitat para diferentes vazões; cabe ao gerenciador, entretanto, decidir qual é a quantidade aceitável.

Modelo *WAIORA* – *Water Allocation On River Attributes* (NIWA, 2004) – Trata-se de um modelo baseado nas metodologias para acesso de habitat, no qual estuda-se a variabilidade dos elementos químicos e hidrofísicos do curso d'água, com a variação das vazões, e como essa variabilidade afeta o meio biótico, permitindo, assim, a definição de valores de vazão em função de limitações na variabilidade destes indicadores. As principais variáveis hidráulicas do curso d'água avaliadas no modelo são: largura, profundidade e velocidade do fluxo, dentre outros. Avalia-se, também, como variáveis físico-químicas, a temperatura da água e a concentração de oxigênio dissolvido, os quais são fortes limitadores da vida em corpos d'água, de cuja variabilidade depende a presença de determinadas espécies. O modelo não define qual é a vazão ecológica, mas descreve a variabilidade dos elementos analisados, em função da variação da vazão. A decisão deve ser tomada pelo usuário, tendo como base as limitações impostas pelas espécies aquáticas. Os principais parâmetros químicos, físicos e hidráulicos adotados, bem como seus limites máximos e mínimos, são definidos a partir do levantamento das espécies existentes na bacia, e do conhecimento das preferências de habitat dessas espécies, tais como: profundidade, temperatura, oxigênio dissolvido, dentre outros elementos necessários à manutenção da biota. Para tais elementos deve-se obter, dentro do possível, seus indicadores ótimos e os valores máximos ou mínimos necessários à sobrevivência e desenvolvimento das espécies.

Vazões de alívio – Referem-se às vazões elevadas, operadas periodicamente, recomendadas para a remoção de silte, sedimentos e outros materiais finos que se acumulam no leito do rio, além de saís que se acumulam em zonas estagnadas. De fato, a variação sazonal das vazões fluviais atua de forma decisiva no comportamento do ecossistema aquático e da zona de transição terra/água, conforme apresentado por Junk et al. (1989), citado por Garcia e Andreazza (2004). Durante as cheias, essa zona de transição promove a conexão entre o rio propriamente dito e as ricas fontes de recursos biológicos localizadas nas margens e várzeas, produzindo-se uma rápida ciclagem de nutrientes e matéria orgânica, o que resulta em uma produção primária maior do que a que ocorre na calha principal de cursos d'água regularizados. Em águas doces tropicais, os peixes respondem à elevação do nível d'água mais rapidamente do que em relação ao aumento das chuvas locais, movendo-se para habitats aquáticos recentemente alagados em planícies que antes estavam secas. O aumento da velocidade da água pode ser sucedido por uma suave queda da temperatura e elevação da turbidez, juntamente com alterações químicas [Lowe-McConnell (1999), citado por Garcia e Andreazza (2004)].

Segundo Collischonn et al. (2006), não é suficiente a definição de uma vazão mínima a ser mantida a jusante de uma seção fluvial. Em alguns casos, mesmo para vazões superiores à vazão

definida como “ecológica”, podem ocorrer danos ambientais importantes. De fato, o período de águas altas é o principal período de alimentação, crescimento e de acúmulo de reservas de gordura, que servirá para que os peixes resistam ao período de estiagem, quando passam por um período de menor disponibilidade de alimento. Desta forma, os peixes nascem em períodos de fartura de alimentos, acompanhado da existência de abrigos contra os predadores entre a vegetação (Lowe-McConnel, 1999).

As cheias parecem afetar diferentemente a reprodução e o recrutamento de espécies com estratégias reprodutivas determinando, assim, a variação na composição e estrutura das assembléias de peixes numa escala inter-anual. As grandes inundações tendem a favorecer a reprodução das espécies migradoras de longa distância, as quais desovam nas regiões mais altas da bacia e utilizam ambientes alagados nas fases iniciais de desenvolvimento, sendo que aquelas duradouras podem maximizar o recrutamento. As espécies sedentárias com cuidado parental ou fecundação interna parecem se reproduzir independentemente do regime de cheias, enquanto as migradoras de curta distância mostram tendências intermediárias (Agostinho et al., 2004 a, b, citado por Bailly, 2006).

Em função da grande importância da sazonalidade das vazões fluviais para a fauna aquática e adicionalmente ao estudo comparativo de metodologias, faz-se a proposta, no presente artigo, de hidrogramas de vazão de alívio, aplicados no período chuvoso do ano, na forma de uma distribuição de vazões com amplitudes diferentes para cada fase do período chuvoso, em função dos valores das cheias observadas para o trecho de estudo. Estes valores caracterizam claramente o início do período de cheias, o seu ápice e a cheia de encerramento do período chuvoso.

A estratégia adotada para o presente artigo é a emulação da seqüência lógica para tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, ilustrada na figura 1, por meio da aplicação e comparação de algumas metodologias para determinação da vazão ecológica, com foco no modelo *WAIORA*, por ser ainda pouco conhecido no meio técnico brasileiro. Tomou-se como estudo de caso o trecho do rio Pará, imediatamente a jusante da PCH Cajurú, localizado na região centro-sul de Minas Gerais.

3. METODOLOGIA

3.1. Definição da bacia hidrográfica para o estudo de caso

Bacia do Rio Pará em Minas Gerais: O universo de estudo está localizado logo a jusante da Pequena Central Hidrelétrica de Cajurú. As características que levaram à escolha deste trecho do rio Pará foram:

- Existência de um longo histórico de vazões consistidas;
- O trecho de estudo fica relativamente próximo a Belo Horizonte;
- O reservatório é de cabeceira;

- A bacia possui monitoramento de qualidade da água;
- Possibilidade de controle operacional da vazão, por parte da Cemig Geração e Transmissão S.A., concessionária do referido aproveitamento.

3.2. Conhecimento da morfologia do rio e definição dos trechos de estudo

Nesta etapa, foi estudado o perfil do rio e foram definidos três trechos com seus regimes característicos, a saber, remansos, corredeiras e um regime intermediário. Isso pôde ser feito por meio de mapas, levantamentos topográficos existentes, fotos aéreas da região, além de imagens de satélite. Após o estudo de escritório, foram realizadas visitas a campo com o objetivo de verificar se os trechos candidatos realmente atendiam às condições necessárias para o estudo, de modo a concretizar e confirmar os trechos definitivos.

3.3. Caracterização física e hidrológica da bacia e dos trechos de estudo

Nesta etapa, fez-se a descrição dos usos e ocupação do solo da bacia, relevo, clima, vegetação predominante e regime de chuvas, dentre outros. Para os trechos de estudo foram feitos levantamentos das informações existentes nos postos fluviométricos da bacia e, a partir de métodos estatísticos e de regionalização, foram obtidas as curvas de permanência, as vazões características e outras informações que caracterizem o regime hidrológico do rio.

3.4. Levantamento das características do meio biótico e das necessidades das espécies na bacia de estudo

Para obtenção destes dados, foram pesquisados os levantamentos e estudos ictiológicos já realizados para a bacia de interesse conhecendo-se, assim, as espécies da ictiofauna com maior interesse de preservação, as espécies nativas e aquelas que, em conjunto, melhor caracterizam a fauna do curso d'água. Além disso, dentro destes estudos, buscou-se levantar quais são as necessidades hidráulicas, físicas e químicas dessas espécies, necessárias à sua sobrevivência e reprodução. Buscou-se também, dentro do possível, valores mínimos e máximos destes indicadores, bem como os valores ótimos, para que se tenha uma referência para tomadas de decisão e definição de limites aceitáveis.

3.5. Campanhas de campo e calibração do modelo WAIORA

Nesta etapa, foram levantadas 5 seções transversais em cada um dos trechos de regime lento e intermediário e 3 seções no trecho de rápidos. Os dados foram coletados para 5 amplitudes de vazões, com diferença de pelo menos 15% entre elas ou 25mm de diferença de nível, sendo 3 coletas no período de seca e 2 próximas do período chuvoso. Foram medidos os parâmetros hidráulicos e coletados dados sobre temperatura da água e oxigênio dissolvido nas seções de cada trecho de estudo. De posse dos dados, procedeu-se à calibração do modelo WAIORA.

3.6. Cálculo das vazões pelas diversas metodologias

Com o modelo calibrado, foram simulados diversos cenários para chegar-se a uma vazão de referência. Foram calculadas as vazões ecológicas propostas pelas metodologias do Perímetro Molhado, de Tennant, do método $Q_{7,10}$ e pelo método da Curva de Permanência de Vazões. Seus resultados também foram simulados no modelo *WAIORA*, de forma a se obter uma estimativa do comportamento do trecho de rio para estes valores de vazão.

Fez-se a análise da sensibilidade dos diversos parâmetros do modelo para se conhecer seu comportamento com as variações de vazão, o que forneceu subsídios para a discussão dos resultados e determinação do regime proposto.

Finalmente, foi calculada a vazão de alívio para o trecho de estudo e feitas as comparações do regime ecológico proposto com as características morfométricas e hidrológicas do rio e da bacia hidrográfica.

3.7. Análise dos resultados e discussão

Procedeu-se a uma análise crítica de todos os valores de referência encontrados para cada modelo e, a partir daí, fez-se a proposta de um regime ecológico para o trecho de estudo. Além disso, foram discutidas as comparações realizadas e sua aplicabilidade na extrapolação para outros pontos da bacia, bem como a generalidade da metodologia proposta. A discussão dos resultados obtidos é objeto do item que se segue.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cálculo da Vazão ecológica pelo método do modelo *WAIORA*

As melhores estimativas do comportamento do curso d'água, simulado no modelo *WAIORA*, são obtidas quando a modelagem de habitat é pré-estabelecida pelo *software RHYHABSIM*, desenvolvido por Jowett (1999), o qual é um modelo que possibilita a modelagem da resposta do *habitat* em função de mudanças hidrológicas. O arquivo de calibração é, em seguida, importado pelo *WAIORA*, que o utiliza para simulação da geometria do rio e também como base para os modelos de temperatura e oxigênio dissolvido. Portanto, esse é o primeiro passo da calibração. Na sequência são preenchidos os dados relativos aos parâmetros físico-químicos da área de estudo.

A partir desse ponto, procede-se à calibração propriamente dita do modelo *WAIORA*, durante a qual os parâmetros são ajustados até se obter um resultado coerente com as medições realizadas em campo. Na etapa subsequente, são preenchidos os parâmetros de tomada de decisão, relativos às necessidades das espécies de peixes. A tabela 2 mostra um resumo dos principais parâmetros de tomada de decisão que foram avaliados nos resultados das simulações do modelo *WAIORA*.

Tabela 2 - Parâmetros de tomada de decisão avaliados, para a preservação do habitat para as espécies ícticas.

Parâmetro de tomada de decisão	Efeito Esperado
Profundidade média superior à 0,50m	Manutenção das áreas de passagem
Concentração de OD superior à 5,0 mg/l	Manutenção dos limites ótimos para as espécies
Temperatura máxima inferior à 30°C	Evitar mortandade de indivíduos
Velocidade média superior à 0,04 m/s	Promover a renovação da água nos ambientes
Redução máxima em 30% na Largura média do curso d'água	Evitar redução drástica da área de habitat
Análise de sensibilidade das curvas dos parâmetros	Busca de maior estabilidade na variação dos parâmetros em função de variações da vazão.

Com o modelo calibrado e as condicionantes ecológicas inseridas, o modelo *WAIORA* fornece como resultado uma série de gráficos e tabelas que retratam o comportamento da variável de interesse em função da variação da vazão e informa sobre o atendimento, ou não, aos requisitos mínimos. Com a análise desses resultados, pôde-se definir que a vazão para o período seco que atende, simultaneamente, aos 3 trechos de estudo foi de 3,40 m³/s. A vazão para o período úmido que atende, simultaneamente, aos 3 trechos foi a vazão de 9,10 m³/s.

Para maiores detalhes, o leitor pode efetuar o *download* dos softwares *WAIORA* e *RHYHABSIM*, além de seus respectivos manuais do usuário, por meio de acesso à URL <http://www.niwasience.co.nz/ncwr/tools/waiora>.

4.2. Cálculo da Vazão ecológica pelo Método do Perímetro Molhado

Para o cálculo da vazão ecológica, pelo método do perímetro molhado, escolheu-se a seção mais estreita do trecho fluvial em estudo que, além disso, apresentava menor profundidade e uma geometria retangular. Portanto, trata-se de uma seção crítica para o curso d'água, apresentando uma das menores áreas disponível de habitat para as espécies aquáticas. Dentre as treze seções levantadas, aquela que apresentava estas características possuía a largura aproximada de 41,4 m e profundidade média de 2,2 m, para uma vazão em torno de 33 m³/s.

Para determinação da curva perímetro molhado versus vazão, utilizou-se o modelo computacional *HEC-RAS – River Analysis System*, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*. Trata-se de um programa de domínio público, amplamente utilizado em simulações hidráulicas e hidrológicas.

Nota-se que a curva obtida ilustrada na figura 2, apresenta uma pequena inflexão para uma vazão em torno de 0,6 m³/s, mas o ponto de inflexão mais significativo ocorre na vazão em torno de 4,9 m³/s. A partir deste ponto, tem-se uma variação menos significativa do perímetro molhado em relação ao aumento da vazão, sendo este, portanto, o índice de habitat para a seção. Como esta é uma seção crítica para o rio, em relação à área disponível de habitat, supõe-se que a vazão ecológica que satisfaz a esta seção atenderá, também, às outras seções do rio. Portanto, de acordo com o método do perímetro molhado, a vazão ecológica para o trecho de estudo é $Q_{\text{MPM}} = 4,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

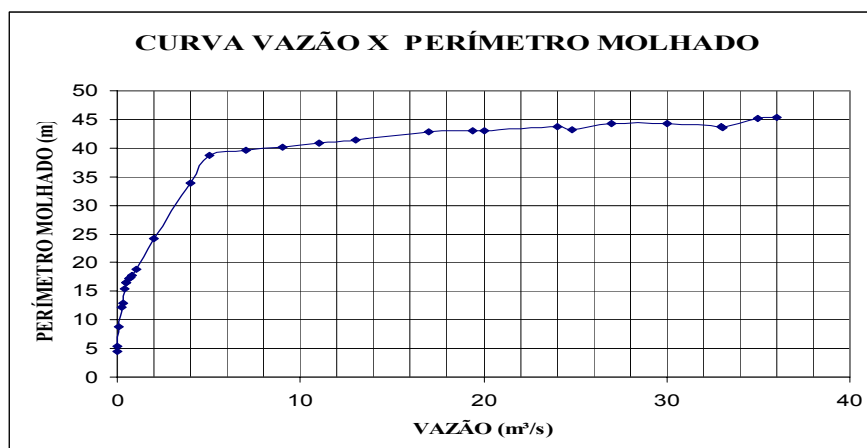


Figura 2 - Curva vazão versus perímetro molhado para seção A do trecho 2

4.3. Cálculo da vazão pelo método de Tennant

No método de Tennant, a vazão ecológica é definida em função do grau de preservação pretendido. O índice de habitat é definido a partir de porcentagens da vazão média de longo termo do curso d'água. Para a definição da vazão média de longo termo para o curso d'água, foi utilizada a série histórica da estação fluviométrica 40150000 – Carmo do Cajurú, com medições de 1936 à 2005. O valor obtido para a vazão média foi: $Q_{\text{MLT}} = 36,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Com base na tabela proposta por Tennant e considerando uma vazão média de longo termo - $Q_{\text{MLT}} = 36,0 \text{ m}^3/\text{s}$, obtém-se a faixa de vazões indicada na tabela 3. Vale observar que o método de Tennant já possui uma primeira consideração a respeito da sazonalidade das vazões pois, apresenta diferentes faixas de vazões para o período seco e para o período chuvoso buscando, assim, uma melhor representatividade do ecossistema.

Tabela 3 - Regime de vazões recomendado pelo método de Tennant

Condição do Rio	Vazão recomendada (porcentagem da vazão média anual)	
	Abril – setembro (seco)	Outubro – Março (chuvoso)
Lavagem ou máxima	72.00	
Faixa ótima	21.60	a 36.00
Excepcional	14.40	21.60
Excelente	10.80	18.00
Boa	7.20	14.40
Regular ou com degradação	3.60	10.80
Má ou mínima	3.60	3.60
Faixa de degradação elevada	0.00	a 3.60

4.4. Cálculo da vazão pelo método Q_{7,10}

A vazão Q_{7,10}, ou seja, a vazão mínima média anual de 7 dias de duração com período de retorno de 10 anos, é utilizada em alguns estados brasileiros como vazão de referência para outorga dos usos dos recursos hídricos superficiais. Nesse caso, a vazão ecológica é obtida indiretamente multiplicando-se a Q_{7,10} por um valor entre 0,5 e 1,0.

Para cálculo da Q_{7,10}, utilizou-se a série histórica da estação de Carmo do Cajurú, apenas entre 1936 e 1953, que representa o período anterior à instalação da PCH Cajurú, a qual introduziu alterações no regime hidrológico do trecho fluvial imediatamente a jusante daquele barramento. Foram obtidas as médias móveis com 7 dias de duração e, a partir delas, a mínima anual. Para a análise de frequência da série obtida foi utilizado o programa ALEA – Análise de Frequência Local de Eventos Anuais, desenvolvido pela UFMG e disponível para *download* por meio de acesso à URL <http://www.ehr.ufmg.br>. Foram ajustadas as distribuições de probabilidade de Weibull e Gumbel Mínimo, obtendo-se 10,17 m³/s e 10,27 m³/s, respectivamente. Como a função Gumbel Mínimo apresentou melhor ajuste, adotou-se o valor de Q_{7,10} = 10,27 m³/s para o trecho de estudo.

Para o estado de Minas Gerais, a vazão ecológica é obtida indiretamente, sendo equivalente a 70% da Q_{7,10}; nesse caso, Q_{7,10} 1 = 7,19 m³/s. Apenas para efeito de comparação, considerou-se também a hipótese de se tomar a vazão ecológica como 50% da Q_{7,10}, a exemplo da prática vigente no estado do Paraná, o que resultou em Q_{7,10} 2 = 5,14 m³/s.

4.5. Cálculo da vazão pelo método da Curva de Permanência

Para a obtenção da curva de permanência do trecho de estudo, utilizou-se também a mesma série histórica de vazões usada para o cálculo da Q_{7,10}. A figura 3, a seguir, ilustra a curva de permanência obtida para o trecho de estudo. Com base na curva de permanência apresentada, tem-se Q₉₀ = 13,2 m³/s e Q₉₅ = 10,30 m³/s. Para os cursos d'água brasileiros, com características semelhantes ao do presente trabalho, a vazão ecológica varia entre 10% e 20% da Q₉₀, dependendo do estado. Desta forma, tem-se Q_{eco10} = 1,32 m³/s ou Q_{eco20} = 2,64 m³/s.

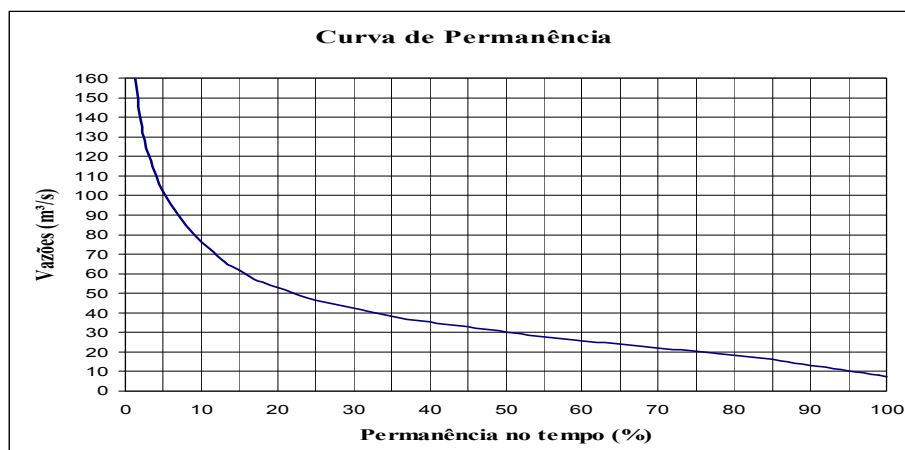


Figura 3 - Curva de permanência para o trecho de estudo

4.6. Simulações pelo modelo *WAIORA* das vazões ecológicas obtidas pelos outros métodos

Apresenta-se, na sequência, os resultados das simulações das vazões ecológicas obtidas pelas outras metodologias. Foram simulados todos os trechos de estudo, pois a vazão deve atender, simultaneamente, aos três trechos. As tabelas 4 e 5 ilustram os resultados obtidos para as simulações do trecho 1.

Tabela 4 - Resultados obtidos nas simulações do modelo *WAIORA*, para o trecho 1, das vazões obtidas pelo método do Perímetro Molhado e pelo método de Tennant

Parâmetro	M.P.M.	Tennant 1	Tennant 2	Tennant 3
Vazão (m³/s)	4,90	14,40	7,20	3,60
Profundidade média (m)	1,47	1,88	1,60	1,33
Largura (m)	42,89	44,87	43,51	42,27
Velocidade média (m/s)	0,07	0,16	0,10	0,06
Temperatura média diária da água (°C)	21,1	21,1	21,1	21,1
Temperatura máxima diária da água (°C)	21,6	21,6	21,6	21,6
Mínima concentração de oxigênio dissolvido (mg/L)	5,6	6,3	5,9	5,3

Tabela 5 - Resultados obtidos nas simulações do modelo *WAIORA*, para o trecho 1, das vazões obtidas pelo método $Q_{7,10}$ e pelo método da Curva de Permanência

Parâmetro	$Q_{7,10}$ 1	$Q_{7,10}$ 2	Q_{eco10}	Q_{eco20}
Vazão (m³/s)	5,14	7,19	1,32	2,64
Profundidade média (m)	1,49	1,60	1,02	1,24
Largura (m)	42,97	43,54	40,8	41,81
Velocidade média (m/s)	0,08	0,10	0,03	0,05
Temperatura média diária da água (°C)	21,1	21,1	21,1	21,1
Temperatura máxima diária da água (°C)	21,6	21,6	21,7	21,7
Mínima concentração de oxigênio dissolvido (mg/L)	5,6	5,9	4,3	5,0

Analisando os resultados, de todas simulações, observou-se que apenas as vazões calculadas pelo método da Curva de Permanência, com os respectivos valores de 1,32 m³/s e 2,64 m³/s, não

conseguiram atender aos critérios mínimos adotados no modelo *WAIORA*, simultaneamente para os três trechos. As demais metodologias apresentaram resultados satisfatórios.

4.7. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo *WAIORA*

Para as simulações, o modelo *WAIORA* adota o trecho como sendo uniforme, portanto, os dados físicos e hidráulicos da primeira seção representam o trecho como um todo. Desta forma, a melhor ferramenta para a análise do comportamento hidráulico dos trechos de estudo é o *software RHYHABSIM*, no qual, para cada trecho de estudo são analisadas todas as seções transversais levantadas, dando uma resposta mais realista do comportamento físico do trecho fluvial em relação às variações de vazão. Assim, apenas os parâmetros de concentração de oxigênio dissolvido e de temperatura da água tiveram seu comportamento analisado em função dos resultados do modelo *WAIORA*. A tabela 6 mostra os resultados obtidos na análise de sensibilidade dos parâmetros.

Tabela 6 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo *WAIORA*.

Parâmetro	Vazão (m³/s)
Profundidade média	5,0
Largura do rio	5,0
Velocidade média	Sem ponto de inflexão
Área molhada	5,0
Temperatura média da água	Sem ponto de inflexão
Temperatura máxima da água	Sem ponto de inflexão
Mínima concentração de oxigênio dissolvido	7,2

Na sequência, a figura 4 ilustra o comportamento do parâmetro profundidade média para o segundo trecho em estudo. Esta análise foi feita pra cada um dos parâmetros analisados e para os 3 trechos em estudo. Em alguns casos, não foi encontrado um ponto de inflexão característico.

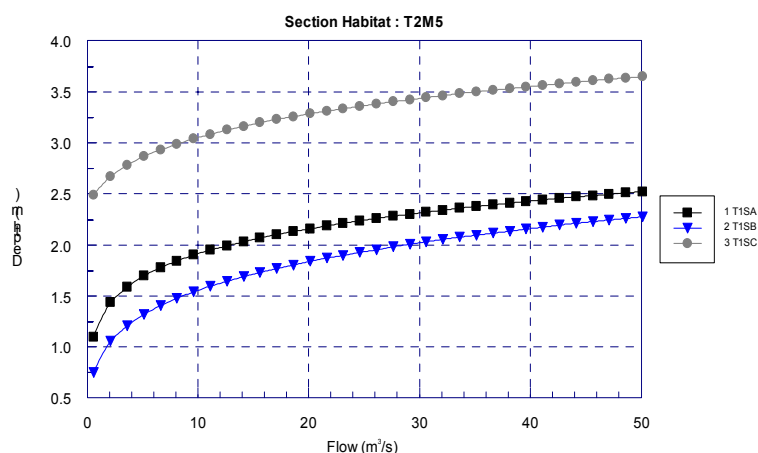


Figura 4 - Comportamento da variação da profundidade média na seção, em relação à vazão, para o trecho 2

Observando a figura 4, nota-se a presença de um ponto de inflexão para cada seção transversal. De fato, para valores de vazão acima deste ponto de inflexão, os ganhos de profundidade são menos sensíveis ao aumento da vazão, ou seja, são necessários maiores incrementos de vazão para um pequeno aumento na profundidade. Nesse trecho, os pontos de inflexão para as seções transversais variam entre 3,0 m³/s e 4,3 m³/s.

4.8. Cálculo da vazão de alívio

No presente trabalho, o hidrograma das vazões de alívio tem sua forma similar ao hidrograma triangular sintético do *SCS – Soil Conservation Service (USA)*, ou seja, com a vazão de pico ocorrendo a 0,375 do tempo de base. Devido à sua forma simples, este tipo de hidrograma facilita o cálculo de volumes e a operação da usina para atendimento a esta defluência. A duração do hidrograma de cheia foi definida como sendo a do tempo de base médio para a bacia na região de estudo. Este valor foi obtido analisando a hidrógrafa da estação fluviométrica de Carmo do Cajurú – 40150000, chegando-se a um tempo de base de 8 dias para o hidrograma de cheia na região de estudo.

No entanto, observando-se o comportamento da hidrógrafa do rio, nota-se que o valor de 72,0 m³/s, sugerido por Tennant, é ultrapassado com facilidade várias vezes ao ano durante o período de cheia. Além disso, nota-se a presença de três picos característicos que formam a estação chuvosa, o primeiro que ocorre, geralmente em novembro, com uma cheia moderada marcando o início da estação chuvosa; o segundo, quando ocorrem os picos máximos, nos meses de dezembro, janeiro ou fevereiro, com seu ápice geralmente em janeiro; e a última cheia, normalmente no mês de março.

De forma a subsidiar a determinação dos valores para cada um dos eventos de cheia, os resultados das análises de frequência foram reunidos na tabela 7, que retrata estes resultados além de outros parâmetros hidrológicos.

Tabela 7 - Resumo da análise de frequência para os eventos máximos na estação 40150000

Mês:	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Q TR = 2 anos (m ³ /s)	52,85	99,13	133,90	101,60	85,91
Q TR = 5 anos (m ³ /s)	88,06	154,10	213,60	180,00	137,20
Q média mensal (m ³ /s)	31,09	51,30	63,90	57,90	46,40
Q média máx. mensal	62,02	113,00	149,00	123,00	96,40
Q máx. anual TR = 2 anos (m ³ /s)	171,10				
Q máx. anual TR = 5 anos (m ³ /s)	247,60				
Q média de longo termo (m ³ /s) - Q _{MLT}	36,00				

Adotou-se o período de retorno de 2 anos como referência para definição das vazões. Desta forma, o pico de cheia, somado à vazão de base, para ao início da estação chuvosa, ou seja, em novembro, será de 150% da Q_{MLT}, portanto igual a 54,0 m³/s. Para o ápice da cheia, a vazão de pico, somada à vazão de base, é da ordem de 375% da Q_{MLT}, portanto igual a 135,0 m³/s. Este valor

é menor que o valor apurado para a vazão máxima anual com período de retorno de 2 anos de 171,10 m³/s. No entanto, trata-se de um valor bem acima do proposto por Tennant, de 200% da Q_{MLT} , e que se repetirá todo ano, podendo ocorrer nos meses de dezembro, janeiro ou fevereiro, conforme as cheias afluentes ao reservatório no período. Assim, espera-se que as cheias normais estejam bem representadas.

Para a cheia de fechamento do período chuvoso, somada à vazão de base, o valor adotado é de 225 % da Q_{MLT} , portanto igual a 81,0 m³/s. Esta cheia ocorrerá normalmente no mês de março.

4.9. Comparação do regime de vazão ecológica proposto, com características hidrológicas e morfométricas

A primeira comparação é feita em relação às características hidrológicas do curso d'água, confrontando as vazões ecológicas obtidas com o comportamento fluvial para anos com características seca, média e chuvosa. Além disso, é feita uma comparação em relação às vazões mínimas mensais. A figura 5 ilustra o comportamento sazonal do rio Pará, na região de estudo. Para a obtenção dos dados foi utilizada a estação fluviométrica Carmo do Cajurú – 40150000.

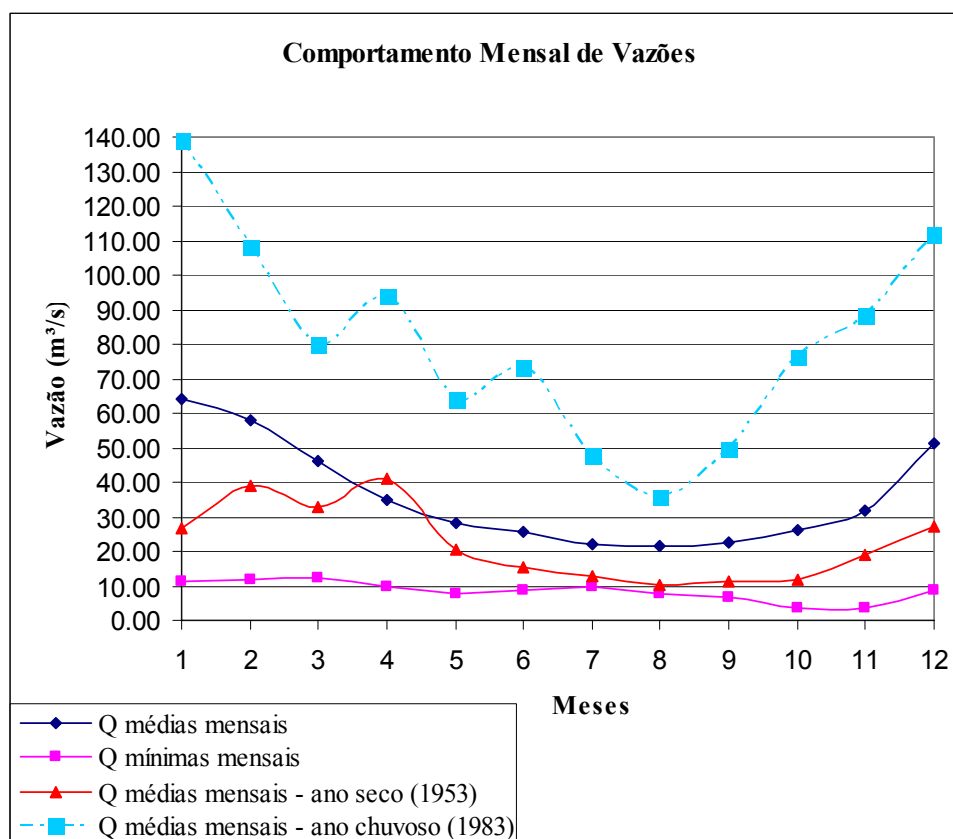


Figura 5 - Distribuição sazonal das vazões ao longo do ano.

Observa-se na figura 5, que o rio Pará, na região de estudo, já registrou valores de vazão mínima bastante reduzidos, chegando ao piso de 3,36 m³/s. Além disso, apresentou valores entre 8,9

m³/s e 12,2 m³/s no período tipicamente chuvoso, entre dezembro e março. Com esta análise do histórico de vazões, observa-se que o rio Pará, na região de estudo, já apresentou valores de vazão da mesma ordem de grandeza dos valores mínimos aqui propostos, ou seja, 5,0 m³/s para o período seco e 9,1 m³/s para o período chuvoso. Salienta-se que os valores mínimos do histórico de vazões são de ocorrência rara e os valores propostos terão caráter menos raro e, possivelmente, com maior duração. Desta forma, recomenda-se o monitoramento dos parâmetros físico-químicos, verificando sua aceitabilidade. As vazões de alívio buscam representar, de forma mais fidedigna, a sazonalidade típica das vazões no curso d'água em questão.

Com relação às características morfométricas do curso d'água, de acordo com os resultados obtidos nos modelos *WAIORA* e *RHYHABSIM*, os valores propostos situam-se em uma faixa menos suscetível às variações em função da vazão e, portanto, os parâmetros estarão menos sujeito a oscilações bruscas que possam trazer alguma consequência negativa às espécies.

Outro fato, observado durante a análise das seções transversais no modelo *RHYHABSIM*, refere-se à variedade de *habitats* em uma mesma seção transversal. De fato, em uma mesma seção transversal, eram observados trechos lentos e trechos rápidos, locais mais rasos e regiões mais profundas, além de diferentes tipos de substrato formando o leito. Esta variedade de *habitats* pode levar a uma maior adaptação da fauna aquática.

4.10. Avaliação da aplicabilidade da metodologia

Analisando-se os resultados obtidos, sinaliza-se que a metodologia adotada nesse trabalho, ou seja, a seqüência lógica de tomada de decisão para gerenciadores de recursos hídricos, ilustrada na figura 1, com a adoção dos modelos *WAIORA* e *RHYHABSIM*, subsidiados pela análise de sensibilidade dos parâmetros avaliados, e com as devidas adaptações para situações específicas, pode ser adotada nos mais variados casos em que se necessite determinar a vazão ecológica em cursos d'água. Destaca-se, ainda, a melhor representatividade da sazonalidade das vazões com a inclusão do cálculo da vazão de alívio.

4.11. Regime de escoamento proposto para este trecho da bacia

O alvo deste trabalho é propor um regime de vazões que melhor atenda às necessidades da fauna aquática do trecho fluvial em estudo, buscando representar a sazonalidade das vazões, que é de elevada importância para a biota aquática. Desta forma, foram propostos valores de vazão para o período seco, para o período úmido e para as vazões de alívio, a saber:

- Vazão mínima para o período seco, ou seja, de abril a setembro = 5,0 m³/s;
- Vazão mínima para o período úmido, ou seja, de outubro a março = 9,1 m³/s;
- Vazão de alívio para o início do período chuvoso, geralmente em novembro = 54,0 m³/s;

- Vazão de alívio para o ápice do período chuvoso, em dezembro, janeiro ou fevereiro = 135,0 m³/s;
- Vazão de alívio para o fechamento do período chuvoso = 81,0 m³/s.

Salienta-se, que as vazões de alívio acompanhem o regime pluviométrico observado na região, de forma, a potencializar seu efeito com a contribuição dos afluentes locais.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste artigo são:

O regime de vazões aqui proposto mostra-se bastante promissor, pois, em termos absolutos, adota valores já observados no histórico de vazões para o rio Pará, na região de estudo, além de atender aos requisitos exigidos pelas espécies de peixes e representar a sazonalidade presente nos rios tropicais, que é tão importante para a reprodução das espécies de piracema.

A metodologia proposta, cujo escopo leva em consideração conceitos modernos na gestão de recursos hídricos, atendimento às necessidades da ictiofauna local, sazonalidade das vazões e a introdução das cheias de alívio para dar maior fidelidade à representação da sazonalidade, pode ser estendida a outros cursos d'água, pela introdução das devidas adaptações para situações específicas.

A extrapolação dos valores para outros pontos da bacia mostrou-se inviável devido à grande complexidade das análises envolvidas, caminhando, então, para a aplicação da metodologia no local de interesse; viu-se que a regionalização dos resultados, em função de proporcionalidade de áreas de drenagem ou de correlações com a vazão média, não tem respaldo na realidade física.

Caso o regime proposto venha a ser empregado operacionalmente e como os parâmetros físico-químicos não foram medidos para as vazões propostas, recomenda-se a realização de uma campanha de monitoramento destes parâmetros, dentro dos patamares de vazão propostos, de forma a verificar a sua aceitação e, em caso contrário, propor medidas mitigadoras, como a alteração nos valores de vazão propostos.

BIBLIOGRAFIA

Anner, F. C. and Conder, A. A.. Relative Bias of Several Fisheries Instream Flow Methods. North America Journal of Fisheries Management 4, pp 451-539, 1984.

Bailly, D.. Influência do regime de cheias na reprodução de espécies com diferentes estratégias reprodutivas da planície de inundação do rio Cuiabá, Alto Pantanal, Brasil. Dissertação de Mestrado – UEM – Universidade Estadual de Maringá – pp. 1 – 34, Maringá - PR, 2006.

Collischonn, W.; Agra, S. G.; Freitas, G. K.; Priante, G. R.; Tassi, R.; Souza, C. F.. Em Busca do Hidrograma Ecológico. IPH-UFRGS, pp 1-21, 2006.

Decreto-lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 8 de janeiro de 1997.

- Garcia, L. A. V.; Andreazza, A. M. P.. Estabelecimento de Vazões Ambientais Efluentes de Barragens – Sugestão Metodológica. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos - Vol.9 - n.2 – pp. 5-18, abril/junho 2004.
- Jowett, I.G.. RHYHABSIM – River Hydraulic and Habitat Simulation, Computer Manual, 1999.
- Lowe-McConnell, R. H.. Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais. Edusp, pp 1-534, 1999.
- Ministry for the Environment. Flow Guidelines for Instream Values – Volumes a and b. New Zealand, may 1998.
- National Institute of Water & Atmospheric Research LTD – NIWA. WAIORA User Guide. Hamilton, New Zealand, pp.1-87, June 2004.
- Stalnaker, C.; Lamb, B. L.; Henriksen, J.; Bovee, K. and Barthlow, J.. The Instream Flow Incremental Methodology. A Prime for IFIM. U.S. Department of Interior. National Biological Service, Washington, D.C., 1995.
- Schwarzbold, A.. O que é um rio? uma abordagem sistêmica. Ciência e Ambiente, vol. 21, p. 57-68, 2000.
- Tennant, D. L., Instream Flow Regimes for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. Fisheries 1, p 6-10, 1976.
- Washington State Department of Ecology. Washougal River Fish Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology and the Toe-Width Method for WRIAs 25,26,28, and 29, Open File Technical Report Washington, Publication pp. 99-153, 1999.
- Weshe T. A. and Recharad P. A.. A Summary of Instream Flow Methods for Fisheries and Related Research Needs. Eisenhower Consortium Bulletin n. 9. Eisenhower Consortium for Western Environmental forest Research, 122p, 1980.