

IV-046 – CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE VAZÃO ECOLÓGICA DE PEQUENAS E MÉDIAS BACIAS AMAZÔNICAS

Antônia de Nazaré dos Santos Pinheiro⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Claudio José Cavalcante Blanco⁽²⁾

Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Ph.D. em Ciências da Água pela Universidade do Quebec-Canadá. Professor da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (FAESA/PPGEC/ITEC/UFPA).

Francisco Carlos Lira Pessoa⁽³⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental formado pela Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/PRODERNA/ITEC/UFPA).

Endereço⁽³⁾: Gentil Bittencourt, 3382 - Canudos - Belém - PA - CEP: 66073-220 - Brasil - Tel: (91) 3274-4235 - e-mail: fclpessoa@ufpa.br

RESUMO

O presente trabalho visou à modelagem de vazão ecológica através de modelos probabilísticos e estatísticos aplicados a séries históricas do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), de pequenas e médias bacias do Estado do Pará. Os modelos utilizados foram os seguintes: $Q_{7,10}$, Método de Tennant (ou Método Montana), 25% da Vazão Média Anual (VMA), $Q_{90\%}$ e 50% de $Q_{95\%}$. Tais modelos foram aplicados a sete bacias, sendo cada bacia, de uma das 7 regiões hidrográfica do Estado do Pará, a saber: Baixo Amazonas (bacia do rio Curuá), Calha Norte (bacia do rio Cumina-Uiri), Costa Atlântica Nordeste (bacia do igarapé da Prata), Portel-Marajó (bacia do rio Pacajás), Tapajós (bacia do rio Braço Norte), Tocantins-Araguaia (bacia do rio Parauapebas) e Xingu (Bacia do rio Uruará). Assim, tentou-se, de forma preliminar, pois em trabalhos futuros será analisado um número maior de bacias das regiões hidrográficas supracitadas e da Amazônia, determinar a vazão ecológica de bacias características de todo o Estado do Pará. Os resultados mostraram que o modelo $Q_{7,10}$ na maioria dos casos, estabelece pequenos valores de vazão ecológica. Os modelos de Tennant, 25% de VMA e 50% de $Q_{95\%}$, resultaram em valores intermediários entre os métodos $Q_{7,10}$ e $Q_{90\%}$, sendo este último, o que estabeleceu para 5 das 7 bacias estudadas maiores valores de vazão, deixando uma reserva de água maior para a sustentabilidade das bacias. Contudo, o uso de um ou outro modelo, para determinar a vazão ecológica, passa por uma análise criteriosa dos usos múltiplos das bacias analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Vazão ecológica, pequenas e médias bacias, Pará.

INTRODUÇÃO

Uma forma de se solucionar o problema de desabastecimento de inúmeras pequenas comunidades, localizadas no interior da Amazônia, é a implantação de projetos de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) nas igarapés às proximidades destas pequenas comunidades (BLANCO, SECRETAN E AMARANTE MESQUITA, 2008). Sendo que, o uso d'água para geração de energia elétrica conflitará com outros usos já existentes, tais como: o consumo humano (animal e doméstico), saneamento, transporte e lazer, irrigação entre outros. Assim, é imprescindível o estabelecimento de vazões mínimas que suportem o ecossistema aquático e sirvam para conciliar tais usos. Estas vazões têm sido chamadas de residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais.

O conceito de vazão ecológica surgiu ao longo da segunda metade do século XX, quando os problemas associados ao manejo da água começaram a ser percebidos no meio ambiente. Nos Estados Unidos, por exemplo, pesquisadores constataram que a redução da vazão de um rio estava associada à redução da diversidade de espécies ou da população de determinada espécie. As observações destes pesquisadores resultaram no que atualmente é conhecido como o Método Tennant, ou Montana, de determinação de vazão ecológica. Tal método indica qual a porcentagem de vazão que deveria ser deixada no rio para manter diferentes níveis de qualidade de habitat para peixes (BENNETI, LANNA E COBALCHINI, 2003). O tema vazão ecológica vem recebendo atenção crescente como demonstraram alguns trabalhos publicados

recentemente tais como: Caissie, El-Jabi e Bourgeois (1998), Marques et al. (2003), Benneti, Lanna e Cobalchini (2003), Silveira et al. (2006), e Pelissari e Sarmento (2001).

Neste contexto, o presente trabalho surge para analisar e aplicar modelos de vazão ecológica baseados no estudo das séries históricas de vazão. Os modelos foram aplicados a curvas de permanência de bacias hidrográficas do Estado do Pará, na busca de um valor mínimo de vazão que possa ser assumido como valor de manutenção do ecossistema. Os dados históricos de séries de vazões foram organizados em forma de hidrogramas; e também em forma de curvas de permanência.

Segundo Tucci (1993), a curva de permanência de um curso d'água é uma função hidrológica pela qual se relaciona a vazão ou nível do rio à probabilidade de que esses mesmos valores de vazão ou nível sejam superados. É utilizada quando se deseja conhecer a permanência no tempo de determinados valores de vazão. Ela pode ser estabelecida com base em valores diários, semanais ou mensais para todo o período da série histórica disponível, ou ainda, se necessário, para cada mês do ano.

A análise dos hidrogramas e das curvas de permanência permitem a identificação de vazões mínimas quer seja pelas ocorrências no tempo ou pelas probabilidades de ocorrências. Assim, tentou-se determinar um intervalo de valores mínimos de vazão que possam ser assumidos como valores de vazões ecológicas capazes de providenciar a manutenção do ecossistema da bacia hidrográfica analisada. A hipótese de que valores mínimos de vazão observados ao longo do tempo possam servir aos estudos de vazão ecológica vem do fato de que, se a bacia manteve-se com esses valores no passado, talvez ela possa continuar mantendo-se no presente e no futuro. Desde que, as ações antrópicas não exijam mais esforço hídrico da bacia estudada.

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio do CNPq por meio de uma bolsa de doutorado destinada a **Francisco Carlos Lira Pessoa** (nº do processo 142368/2010-5); e com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará – FAPESPA, por meio de uma bolsa PIBIC/UFPA/FAPESPA destinada a **Antônia de Nazaré dos Santos Pinheiro**.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo envolve dados de 7 (sete) estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Amazonas dentro dos limites do Estado do Pará, o qual abrange uma área de 1 253 164 km² (IBGE, 2010). A bacia amazônica é formada por mais de 20 mil quilômetros de rios extensos e perenes, cujo principal - Amazonas, dá nome à bacia. O rio Amazonas corta o Estado do Pará no sentido oeste/leste e deságua num grande delta estuário com inúmeras ilhas, entre elas a ilha do Marajó. No Pará, existem também os rios Tocantins e Guamá, que formam bacias independentes.

A divisão do Estado do Pará em regiões hidrográficas, estabelece 7 (sete) principais regiões hidrográficas, a saber: da Calha Norte, do Tapajós, do Xingu, do Baixo Amazonas, de Portel – Marajó, do Tocantins – Araguaia e da Costa Atlântica – Nordeste (Figura 1).



Figura 1: Regiões hidrográficas do Estado do Pará (SECTAM, 2005)

ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Foram analisados dados hidrológicos de vazões disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Água (ANA), dos quais foram utilizadas 7 (sete) estações fluviométricas, apresentadas na Tabela 1, assim como a localização (latitude e longitude) e a denominação dos postos formando o banco de dados. A Figura 2 apresenta a localização espacial de cada uma das estações consideradas no estudo.

LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

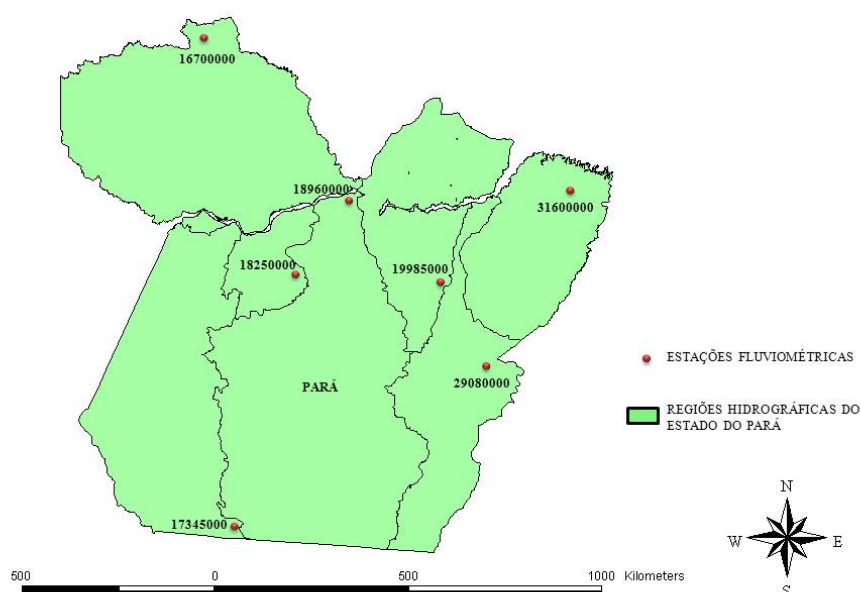


Figura 2: Localização espacial das estações fluviométricas

Tabela 1: Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Nome	Rio	Área (Km²)	Longitude	Latitude
18960000	Porto do França	Matari	—	-52:05:0	-1:47:0
18250000	Uruará	Uruará	2978	-53:33:15	-3:40:38
16700000	Tirios	Cumina-Uiri	945	-55:57:23	2:13:26
31600000	Marambaia	Igarapé da Prata	82	- 47:7;0	-1:39:8
17345000	Base do Cachimbo	Braço Norte	465	-54:54:29	-9:20:32
19985000	Pacajás	Pacajá	2682	-50:37:47	-3:50:13
29080000	Fazenda Rio Branco	Parauapebas	9398	-49:48:0	-5:47:0

CONSTRUÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA

Para a construção da curva de permanência utilizou-se o procedimento empírico (Eletrobrás, 2000), que preconiza o estabelecimento de intervalos de classe de vazões ou nível d'água, procurando ter uma quantidade razoável de valores que caíam em cada intervalo. A amplitude pode ser calculada por meio da Eq. 1.

$$d = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{(Nc - 1)} \quad \text{equação (1)}$$

onde: d – amplitude de cada intervalo, em m^3/s ; Q_{\max} – vazão máxima da série, em m^3/s ; Q_{\min} – vazão mínima da série, em m^3/s ; e N_c – número de intervalos de classe, calculado pela Eq. 2.

$$N_c = 1 + 3,3 \cdot \ln(n) \quad \text{equação (2)}$$

onde: n – número de dados da amostra; e \ln - logaritmo natural.

Definida a amplitude, determina-se a permanência percentual, contando o número de vazões que caem dentro dos intervalos de classe previamente estabelecidos, acumulando-as no sentido da maior para a menor vazão, por meio da Eq. 3.

$$P_i = \frac{n_i}{n} \cdot 100 \quad \text{equação (3)}$$

onde, P_i é a permanência do intervalo; n_i é o número de vazões acumuladas e n é o número total de vazões observadas.

Os dados de vazões diárias foram distribuídos em intervalos de classe, nos quais foi identificada a frequência de ocorrência (simples e acumulada) das vazões dentro de cada intervalo. Para o traçado das curvas de permanência foram utilizadas planilhas eletrônicas.

MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO ECOLÓGICA

Para a estimativa da vazão ecológica foram aplicados métodos hidrológicos que usam dados históricos de descargas para estabelecer requerimentos mínimos de vazões. Os métodos listados a seguir foram considerados a partir da obra de Caissie, El-Jabi e Bourgeois, 1998; e de Eletrobrás, 2000.

MÉTODO DA VAZÃO MÉDIA MÍNIMA DE 7 DIAS CONSECUTIVOS COM PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS ($Q_{7,10}$)

O cálculo da vazão mínima de 7 (sete) dias consecutivos e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) é um importante parâmetro hidrológico com grande aplicação nos estudos de planejamento e gestão de uso dos recursos hídricos. Constitui importante instrumento da Política Nacional dos Recursos Hídricos do Brasil, pois fornece estimativa estatística da disponibilidade hídrica dos escoamentos naturais de água.

Esta vazão é obtida computando-se as médias móveis das vazões diárias com janelas de 7 (sete) dias ao longo de um ano hidrológico. A mínima dessas médias é retida. O processo é repetido para cada ano hidrológico da série histórica, obtendo-se uma série de valores mínimos de vazões médias em dias consecutivos, para cada ano. Estas vazões são tabeladas em ordem crescente de magnitude juntamente com a frequência de ocorrência e o tempo de retorno, utilizando a fórmula de Weibull (Tucci, 1993), mostrada na Eq. 4.

$$f = \frac{m}{n - 1} \quad \text{equação (4)}$$

onde, f é a frequência de ocorrência, m é a ordem da vazão amostral e n é o tamanho da amostra. Neste caso o Tr (tempo de retorno) é o inverso da f (frequência).

MÉTODO DE TENNANT (OU MÉTODO DE MONTANA)

Este método foi desenvolvido a partir de observações sobre habitats e vazões feitas durante 10 anos nos estados americanos de Montana, Nebraska e Wyoming (Tennant, 1976). Baseado no histórico das vazões fluviais, o autor categorizou as condições de habitat para os rios em função das estações do ano e percentagem da vazão média anual. A Tabela 2 apresenta as recomendações do método.

Tabela 2: Recomendações de vazões pelo método de Tennant

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

Fonte: Tennant, 1976.

No estudo realizado por Caissie et al. (1998), utilizou-se a condição excelente, 30% da vazão média anual para o período seco (outubro – março) e 50% para o período chuvoso (abril – setembro). Na prática, utiliza-se 30% da vazão média anual como base para a reserva da vazão (REISER et al., 1989), este foi o caso do presente trabalho.

MÉTODO DA VAZÃO ECOLÓGICA CORRESPONDENTE A 25% DA VAZÃO MÉDIA ANUAL (VMA)

O método da vazão ecológica correspondente a 25% da vazão média anual (VMA). Baseia-se no método de Tennant ou Montana, onde 25% da VMA é considerada como vazão ecológica, ou seja, tal porcentagem de vazão é considerada como mínimo necessário para garantir a vida aquática adequada, independentemente da estação ou espécies.

MÉTODO DA VAZÃO ECOLÓGICA CORRESPONDENTE À $Q_{90\%}$

O método da vazão ecológica, correspondente à $Q_{90\%}$, utiliza valores da curva de permanência para estabelecer vazões ecológicas em uma base diária. Considera-se como vazão ecológica, o valor correspondente à vazão igualada ou excedida durante 90% do tempo em uma bacia.

MÉTODO DA VAZÃO ECOLÓGICA CORRESPONDENTE À 50% DE $Q_{95\%}$

Os critérios de outorga de direitos de uso da água no Brasil têm sido estabelecidos com base em um percentual de vazões referenciais. Um deles, diz respeito ao percentual de 50% de $Q_{95\%}$ (ELETROBRAS, 2000). Tal vazão ecológica tem sido indicada principalmente pelo setor hidrelétrico, que preconiza o uso das vazões de rios para a produção hidrelétrica, por isso o uso de um percentual de $Q_{95\%}$, sendo esta vazão utilizada como vazão de projeto de empreendimentos hidrelétricos.

RESULTADOS

Após o levantamento dos dados de vazão, referentes a cada uma das 7 (sete) estações fluviométricas selecionadas para o estudo, e a aplicação dos métodos hidrológicos utilizados para estimativa da vazão ecológica, obtiveram-se resultados de acordo com as figuras subsequentes.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de permanência de vazão para cada uma das bacias. Bem como, os valores de vazão para os métodos correspondentes a $Q_{90\%}$, e 50% de $Q_{95\%}$.

A Figura 4 apresenta os resultados encontrados por meio do método da vazão média mínima de 7 (sete) dias com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), onde foi possível comparar (graficamente) a relação entre a vazão de 7 dias observada e o tempo de retorno.

Por meio do método Tennant ou Montana, fez-se o cálculo de 30% da vazão média anual correspondente a cada uma das 7 bacias aferidas, os valores obtidos são apresentados na Tabela 3, assim como, os valores encontrados para a aplicação do método da vazão ecológica de 25% da VMA.

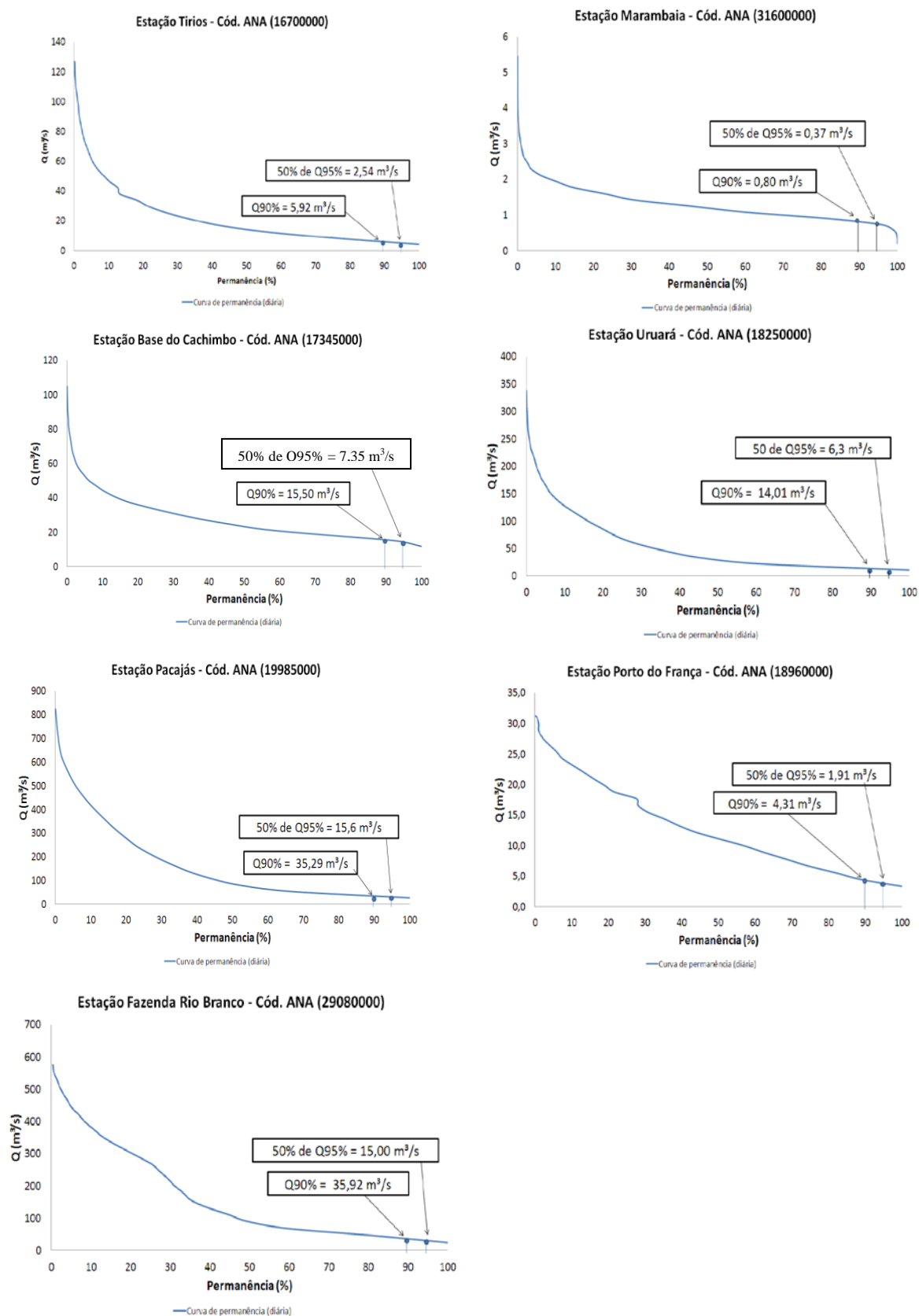


Figura 3: Curvas de permanência de vazão e vazões mínimas de referência das estações fluviométricas consideradas no estudo.

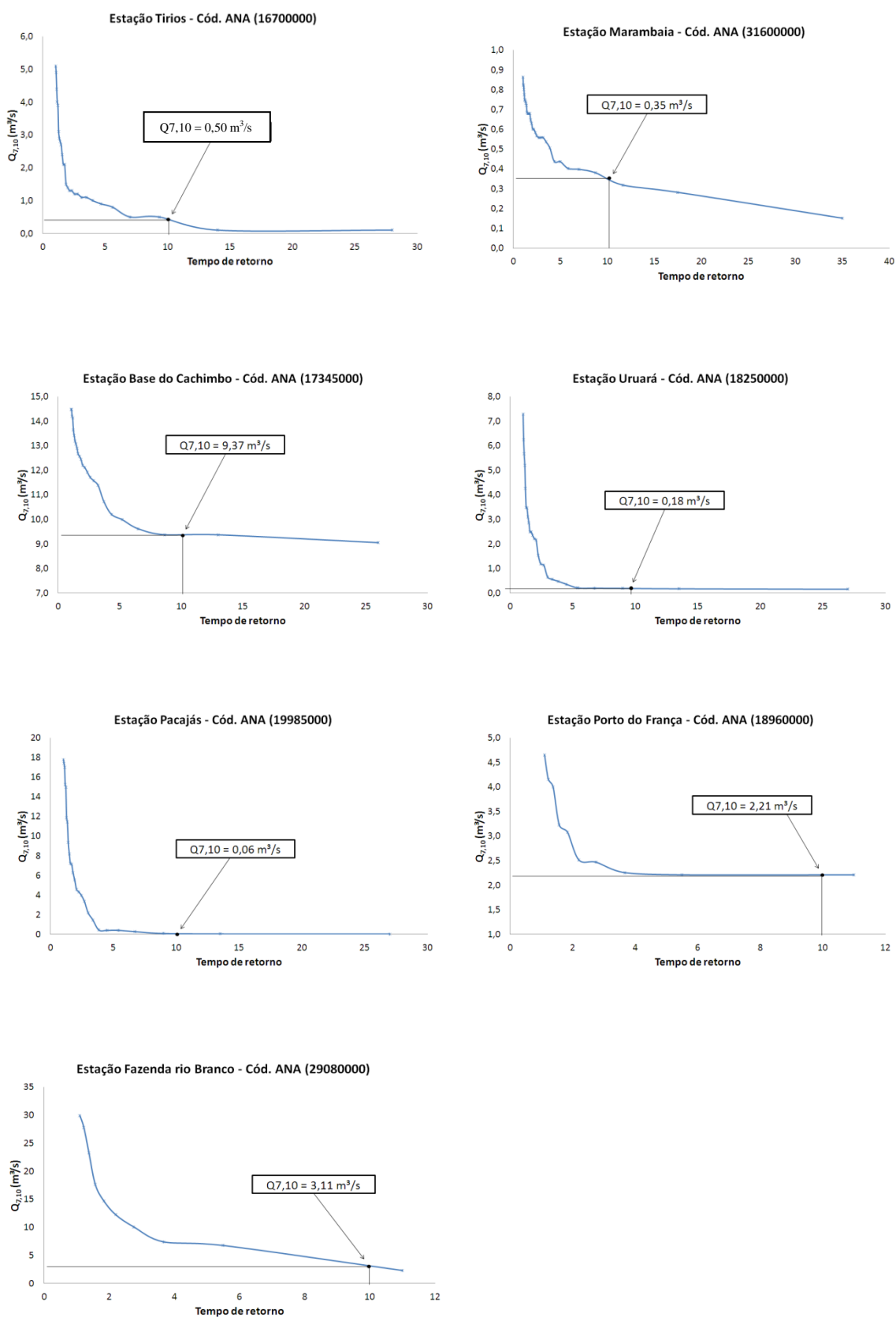


Figura 4: Vazão média mínima de 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos das estações fluviométricas consideradas no estudo.

Tabela 3: Resultados encontrados na aplicação dos métodos utilizados na estimativa da vazão ecológica.

Região Hidrográfica	Estações	Bacia	Q _{mínima} (m³/s)	Vazões ecológicas (m³/s)				
				Q _{7,10}	Tennant (30% da VMA)	25% da VMA	Q _{90%}	50% da Q _{95%}
R.H – do Xingu	18960000	Matari	0,01	2,21	3,41	2,84	4,31	1,91
R.H – Baixo Amazonas	18250000	Uruará	0,11	0,18	12,06	10,05	14,01	6,31
R.H – Calha Norte	16700000	Cumina – Uiri	0,01	0,50	5,31	4,42	5,92	2,54
R.H – Costa Atlântico Nordeste	31600000	Igarapé da Prata	0,03	0,35	0,34	0,28	0,80	0,37
R.H. do Tapajós	17345000	Braço Norte	8,58	9,37	7,22	6,02	15,50	7,35
R.H – Portel – Marajó	19985000	Pacajás	0,01	0,06	40,39	33,66	35,29	15,63
R.H – Tocantins - Araguaia	29080000	Parauapebas	2,08	3,11	38,64	32,20	35,92	15,00

A análise da tabela 3 revela que método Q_{7,10} na maioria dos casos, estabelece pequenos valores de vazão ecológica, o que pode colocar em risco a manutenção do meio ambiente que depende das 7 bacias hidrográficas analisadas. Os métodos de Tennant, 25% de VMA e 50% de Q_{95%}, resultaram em valores intermediários entre os métodos Q_{7,10} e Q_{90%}, sendo este último, o que estabeleceu para 5 das 7 bacias estudadas maiores valores de vazão.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou dois métodos probabilísticos para determinação de vazões ecológicas, analisando as curvas de permanência; outros dois baseados na vazão média anual; e um quinto baseado na distribuição das frequências da vazão média mínima de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos (Q_{7,10}). Os métodos foram aplicados a 7 estações fluviométricas do Estado do Pará.

A análise dos resultados revela que o método Q_{7,10} representa valores mínimos para as vazões ecológicas, enquanto que o método Q_{90%} representa valores máximos para as vazões ecológicas. Assim, num contexto de segurança hídrica para as 7 bacias hidrográficas analisadas, o presente trabalho indica a vazão Q_{90%} como estimativa mais adequada de vazão ecológica, num contexto quantitativo, ou seja, sem se levar em conta o que aconteceria com a qualidade das águas, no caso de uso múltiplo, se esse quantitativo de vazão fosse alocado como vazão ecológica.

Contudo, ainda se faz necessário, o desenvolvimento de uma metodologia mais abrangente para determinação de vazões ecológicas na Amazônia, a qual deve ser aplicada a um número máximo possível de bacias hidrográficas da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://www.ana.gov.br>. Acesso em: agosto / 2009.
2. BENNETI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. 2003a Current practices for establishing environmental flows in Brazil. *Rever research and applications*, Vol. 19 pp. 1-18.
3. Blanco, C. J. C. and Secretan, Y.; Mesquita, A. L. A., 2008-a, “Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective”. *Energy Sustainable Development*, 12(3): 25-33. [doi:10.1016/S0973-0826\(08\)60435-4](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60435-4).
4. D. CAISSIE, N. EL-JABI e G. BOURGEOIS. Évaluation du Débit Réserve par méthodes hydrologiques e hydrobiologiques. *Révue des Sciences de l'Eau*, 11 (1998), 347-363.
5. ELETROBRÁS. Manual de pequenas Centrais Hidrelétricas. Ministério das Minas e Energia, 2000.
6. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://ibge.gov.br/governodopara/republicafederativadobrasil>. Acesso em: 20 jun. 2009.
7. MARQUES, M. G.; MARTINEZ, C. B.; CANELLAS, A. V. B.; PANTE, A. R.; TEXEIRA, E. D. 2003. Influência dos métodos de determinação da vazão ecológica no custo de geração de energia em

- aproveitamentos hidrelétricos – estudo de caso. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos. Curitiba – PR.
8. PARÁ. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Núcleo de Hydroclimatologia. Disponível em: < <http://www.para30graus.pa.gov.br/recursos.htm> >. Acesso em: 10/04/2009.
 9. PELLISARI, V. B E SARMENTO, R. 2001 Determinação da demanda ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, Estado do Espírito Santo. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH: Aracaju, SE.
 10. SEMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Resumo técnico: Regiões Hidrográficas do Pará. 2001.
 11. SILVEIRA, A.; MOURA, R. M. P.; ANDRADE, N. L. R. Determinação da $Q_{7,10}$ para o rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil e comparação com a vazão regularizada após a implantação do reservatório de aproveitamento múltiplo de Manso. 2006. XXX Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Punta del Este – Uruguay.
 12. TUCCI, CARLOS E.M., 1993. Regionalização de Vazões. In: Hidrologia: Ciência e Aplicação / organizado por Carlos E.M. Tucci. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH-EDUSP (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4). p. 573-620.