

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

ELABORAÇÃO DE CURVAS-CHAVE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS (BHRI), AMAZÔNIA ORIENTAL

Projeto: Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Itacaiúnas – Relatório Final

Adayana Maria Queiroz de Melo

Paulo Rógenes Pontes

Marcio Sousa da Silva

Renato Oliveira da Silva Júnior

Belém – Pará

Agosto / 2019

Título: Elaboração de curvas-chave na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental.	
PROD. TEC. ITV DS – N011/2019	Revisão 00
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M528 Melo, Adayana Maria Queiroz de.

Elaboração de curvas-chave na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental. / Adayana Maria Queiroz de Melo, Paulo Rógenes Pontes, Marcio Sousa da Silva, Renato Oliveira da Silva Júnior - Belém: ITV, 2019.

32 p. : il.

1. Curva-chave - Hidrologia. 2. Vazão - Hidrologia. 3. Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas - Carajás, Serra dos (PA). 4. Itacaiúnas, Rio - Carajás, Serra dos (PA). I. Pontes, Paulo Rógenes. II. Silva, Marcio Sousa da. III. Silva Júnior, Renato Oliveira da. IV. Título

CDD 23. ed. 551.48098115

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves / CRB 2 – 525

RESUMO

Para conhecer a vazão de um corpo hídrico estabelece-se uma relação entre o nível de água do rio (cota) e a vazão, conhecida como curva-chave. A determinação da curva-chave é importante, pois possibilita a determinação contínua de vazões do rio. Essa informação permite a estimativa de vazões de referência úteis ao estabelecimento de critérios de outorga de uso da água e de projetos hidráulicos. As variáveis utilizadas para determinação da curva são medidas em campanhas de monitoramento sazonal, por meio de equipamentos que utilizam tecnologia de efeito *Doppler*, e por meio de monitoramento em tempo real, utilizando sensores de pressão instalados em seções transversais às drenagens de interesse. Assim, o objetivo deste estudo é a elaboração de curvas-chave na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), localizada na região sudeste do Estado do Pará, e a estimativa de vazões do hidrograma e as curvas de permanência de cada seção. Foram selecionadas 8 estações fluviométricas do ITV-DS para elaboração de curvas-chave do tipo potência (4 estações) e polinomial de grau 2 (4 estações). As curvas-chave foram calibradas empregando a ferramenta *Solver* do Excel, tendo o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) como função objetivo. A extrapolação das curvas foi realizada pelo Método Logarítmico. O coeficiente NS foi considerado satisfatório na calibração das curvas-chave (NS próximo de 1 e desvios médios abaixo de 15%). Na aplicação do Método Logarítmico também se obteve resultados satisfatórios para a extrapolação das curvas-chave (NS próximo de 1 e os Erros na Cota Máxima foram baixos). As maiores vazões foram observadas na estação Fazenda Abadia, atingindo aproximadamente 2500.00 m³/s, enquanto que as menores vazões foram da estação Fazenda Sergipana, com a mínima de 0.10 m³/s. A estação Fazenda do Márcio no rio Itacaiúnas apresentou os maiores valores de Q90 (87.31 m³/s) e Q95 (51.45 m³/s), e os menores valores foram da estação Onça Puma no rio Cateté (Q90 = 2,11 m³/s e Q95 = 1,86 m³/s).

Palavras-Chave: Curva-chave. Vazão. Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas. Amazônia Oriental.

RESUMO EXECUTIVO

O objetivo da curva-chave é determinar as vazões contínuas no rio, por meio da análise gráfica e hidráulica, utilizando os dados de nível monitorados automaticamente. A curva-chave é a base para a gestão dos recursos hídricos de uma região, e é necessária para diversas análises hidrológicas: estudos de disponibilidade hídrica, potenciais hidrelétricos, captação de água, modelagem chuva-vazão, dentre outros. Este estudo é relevante para a Vale e comunidades por diversos fatores, como: estimativa de vazões máximas e hidrograma de projeto para controle e atenuação de cheias, previsão de eventos extremos (seca e inundações), dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem urbana, perímetros de irrigação, diques e extravasores de barragens, para diminuição dos custos e aumento da segurança dos projetos de engenharia da empresa (por exemplo, evitar o subdimensionamento dos vertedores das barragens), avaliação da capacidade de depuração pelo corpo hídrico, e, especialmente, a determinação das vazões de referência mínimas para outorga de uso das águas dos rios (Lei n° 9433/1997) e estimativa da disponibilidade hídrica sazonal na BHRI.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da BHRI, suas principais sub-bacias (Sororó, Itacaiúnas, Parauapebas, Vermelho, Cateté e Tapirapé), estações pluviométricas e fluviométricas em operação na bacia.....	08
Figura 2 - Visão geral da estação IFPA Rural, localizada na área interna do Campus do Instituto Federal do Pará (IFPA), próxima ao município de Marabá –PA.....	09
Figura 3 - Modelo de réguas limnimétricas instaladas, o leitor do <i>data logger</i> das estações que mostra o nível do rio e outras variáveis, e a sonda de nível HOB0.....	10
Figura 4 - Instrumentos utilizados para medição de vazão na BHRI e seção transversal obtida com o ADCP.....	10
Quadro 1 - Seções de medição de vazão na BHRI.....	11
Tabela 1 - Estações selecionadas para elaboração das curvas-chaves.....	11
Tabela 2 - Dados utilizados para elaboração das curvas-chave.....	16
Tabela 3 - Resultados da calibração e validação das curvas-chave do tipo potência.....	17
Tabela 4 - Resultados da calibração e validação das curvas-chave do tipo polinomial....	17
Figura 5 - Curvas-Chave do tipo Potência e suas respectivas equações.....	18
Figura 6 - Curvas-Chave do tipo Polinomial de grau 2 e suas respectivas equações.....	19
Figura 7 - Relação “Cota x Área” da estação Itacaiúnas-Tapirapé.....	20
Tabela 5 - Resultados da extrapolação do ramo superior das curvas-chave.....	21
Figura 8 - Extrapolação das curvas-chave das estações.....	22
Figura 9 - Hidrogramas diários e curvas de permanência das estações.....	25
Figura 10 - Curvas de permanência das vazões calculadas com a curva-chave (linha azul) e as vazões medidas em campo (linha laranja), na estação Sossego.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ANA	<i>Agência Nacional de Águas</i>
BHRI	<i>Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas</i>
CNRH	<i>Conselho Nacional de Recursos Hídricos</i>
CONAMA	<i>Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>
FLOWTRAKER	<i>FlowTracker Acoustic Doppler Velociter</i>
ICMBIO	<i>Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
ITV - DS	<i>Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável</i>
MOC	<i>Mosaico de Carajás</i>
NS	<i>Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe</i>
SINGRH	<i>Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos</i>
SISNAMA	<i>Sistema Nacional de Meio Ambiente</i>
USGS	<i>Serviço Geológico dos Estados Unidos</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	07
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	08
2.1	Área de estudo.....	08
2.2	Estações Hidrometeorológicas Instituto Tecnológico Vale (ITV-DS)	09
2.3	Análise dos dados hidrológicos.....	12
2.4	Elaboração da Curva-Chave.....	12
2.5	Extrapolação da Curva-Chave: Método Logarítmico.....	14
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
3.1	Calibração e Validação das Curvas-Chave.....	16
3.2	Extrapolação das Curvas-Chave.....	20
3.3	Hidrogramas e Curvas de Permanência.....	24
4	CONCLUSÕES.....	28
	REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

Para o estudo dos recursos hídricos em um sistema hidrológico (bacia hidrográfica) é essencial a avaliação e aquisição de dados de precipitação e vazão, pois, normalmente, são as principais entradas e saídas de água no sistema (TUCCI, 2007). Portanto, não basta apenas medir esses parâmetros, é necessário processar, corrigir e realizar a consistência dos dados medidos de forma mais eficiente possível. Sendo assim, a primeira dificuldade da medição é a validação dos dados adquiridos em um determinado local e tempo.

Dentre as variáveis mais importantes da hidrologia está a vazão, ou descarga líquida. As vazões de um corpo hídrico não podem ser medidas continuamente, pois são medições demoradas e caras, que requer logística de campo, envolvendo equipe e equipamentos. Por outro lado, o nível, fortemente relacionado a vazão, pode ser medido continuamente, por meio da instalação de sensores de pressão automáticos no leito do rio, que armazenam continuamente (em tempo real) a informação. Logo, para conhecer a vazão em tempo real estabelece-se uma relação entre o nível de água do rio (cota) e a vazão, conhecida como curva-chave (USGS, 2002).

A elaboração da curva-chave caracteriza-se como a fase inicial da consistência de dados fluviométricos, pois seu objetivo é determinar as vazões do rio, por meio da análise gráfica e hidráulica, utilizando os dados de cota (DIAS, 2016). Os processos hidrológicos que determinam as vazões são estocásticos no tempo e no espaço, dessa forma, a vazão do rio sempre será uma estimativa associada a um determinado risco de falha (MARTINS *et al.*, 2011).

A curva-chave é a base para a gestão dos recursos hídricos, e o seu desenvolvimento é requerido para diversas análises hidrológicas, como os estudos de disponibilidade hídrica, de potenciais hidrelétricos, captação de água, modelagem chuva-vazão, sistema de alerta de eventos extremos e avaliação do fluxo do rio (COLLISCHONN E DORNELLES, 2014; SAHOO *et al.*, 2014).

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é a elaboração de curvas-chave na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), localizada na região sudeste do Estado do Pará, mais especificamente nas sub-bacias dos rios: Itacaiúnas, Parauapebas, Vermelho e Cateté, bem como estimar as vazões em tempo real e determinar as curvas de permanência nos locais onde são realizadas as medições.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A BHRI está localizada na Amazônia Oriental, sudeste do Estado do Pará, entre as latitudes 05°10'-07°15'S e longitudes 48°37'-51°25'W, na região hidrográfica do Araguaia-Tocantins (BRASIL, 2003). A BHRI possui uma área de drenagem total de aproximadamente 42.000 km² (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2017b; PONTES *et al.*, 2019), e está subdividida em 6 sub-bacias principais, sendo 4 delas objeto deste estudo, a saber: do Rio Itacaiúnas (19.589 km²), do Rio Parauapebas (9.522 km²), do Rio Vermelho (7.208 km²) e do Rio Cateté (3.657 km²) (Figura 1).

Figura 1 – Localização da BHRI, suas principais sub-bacias (Sororó, Itacaiúnas, Parauapebas, Vermelho, Cateté e Tapirapé), estações pluviométricas e fluviométricas em operação na bacia.



Fonte: Relatório interno do Projeto Itacaiúnas II.

A região possui um clima tropical de monção (Am) (ALVARES *et al.*, 2014), com a temperatura média do ar em torno de 26° e umidade relativa de 80% (INMET, 1992). Com relação ao regime pluviométrico, possui duas estações bem definidas: a estação chuvosa (novembro a maio) e a seca (junho a outubro), com totais anuais de precipitação variando entre 1.800 mm e 2.300 mm na estação mais chuvosa, e de 10 mm a 350 mm na estação seca (MORAES *et al.*, 2005, SILVA JÚNIOR *et al.*, 2017a).

Predominam na bacia hidrográfica dois tipos de cobertura de solo: floresta tropical e savana de montanha; e os principais usos da terra são: pastagens, mineração e urbanização (SOUZA-FILHO *et al.*, 2016). Na parte central da bacia destaca-se a “Serra

dos Carajás”, um platô que chega a atingir 900 m de altitude, diferentemente das outras regiões da bacia, onde a altitude do relevo varia de 60 a 300 m.

Adicionalmente, existe na BHRI uma área de florestas remanescentes concentradas em um bloco contínuo chamado Mosaico de Carajás (MoC). Ocupando uma área de aproximadamente 11.700 km² (quase um quarto da área da bacia), as terras do MoC são protegidas e monitoradas por uma parceria entre o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO) e a Vale S.A. (VALE, 2017). Entretanto, fora do MoC 70% da área da bacia é ocupada por pastagens, e o restante da floresta é bem fragmentado (SOUZA-FILHO *et al.*, 2016), consequência do chamado “Arco do Desmatamento na Amazônia” que vem ocorrendo nas últimas décadas no sul do Pará, norte do Mato Grosso, Rondônia e sudeste do Acre (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; <https://www.mma.gov.br>).

2.2 ESTAÇÕES HIDROMETEOROLÓGICAS INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE (ITV-DS)

A partir do ano de 2014, o Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS) instalou uma rede de monitoramento na BHRI contendo 8 estações hidrometeorológicas (Figura 1) da empresa *Campbell Scientific do Brasil*, que medem e transmitem via satélite, a cada hora, os seguintes parâmetros: precipitação, nível dos rios, temperatura, radiação solar, umidade relativa, direção e velocidade do vento e pressão barométrica. Todas as estações possuem um modelo padrão (Figura 2), são compostas por uma torre de 10 m, onde estão instalados grande parte dos sensores, caixa plástica com equipamentos, caixa metálica com sistema de alimentação e antenas, e um suporte de 1 m de altura onde está instalado o pluviômetro.

Figura 2 – Visão geral da estação IFPA Rural, localizada na área interna do Campus do Instituto Federal do Pará (IFPA), próxima ao município de Marabá –PA.



Fonte: Relatório de instalação das estações da *Campbell Scientific do Brasil* (2015).

O ITV-DS, a partir do ano de 2015, também iniciou campanhas sazonais (trimestrais) de medições de vazão na BHRI, e em 2016 foram instaladas as réguas

limnimétricas para medir o nível (cota) dos rios nas seções de medição de vazão. Adicionalmente, foram instalados sensores de nível – próximo ao “zero” da “Régua 01” de cada seção - do tipo *transdutor de pressão (CS451)* em 6 estações, e sondas de nível HOBOT *Water Level Logger* em 4 seções. Os sensores do tipo transdutor de pressão medem o nível mínimo e máximo d’água a cada hora, enquanto que as sondas HOBOT foram programadas para medir o nível a cada 30 minutos. Na Figura 3, observa-se o modelo das réguas instaladas, o leitor do *data logger* das estações e a sonda de nível HOBOT.

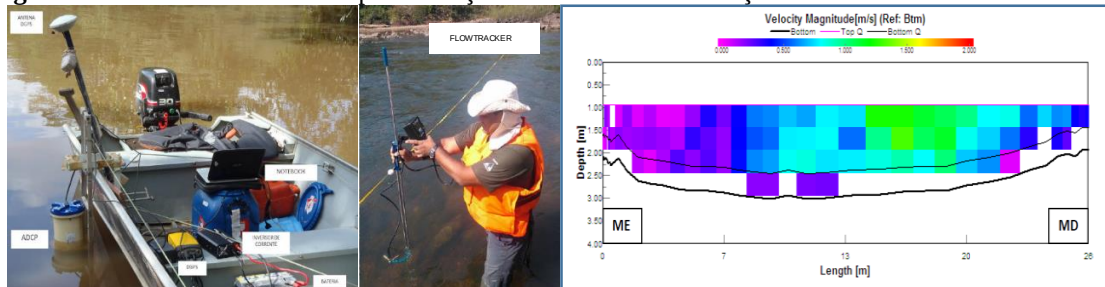
Figura 3 – Modelo de réguas limnimétricas instaladas, o leitor do *data logger* das estações que mostra o nível do rio e outras variáveis, e a sonda de nível HOBOT.



Fonte: Relatório dos serviços de instalação da empresa GEOMINAS e do Projeto Itacaiúnas II.

As campanhas de campo para medição de vazão são realizadas ao longo do ano em 16 seções na BHRI e no rio Tocantins (Figura 1), nos períodos de vazões máximas (cheia), vazões intermediárias (transição) e vazões mínimas (estiagem), totalizando 4 campanhas anuais. As campanhas consistem na medição de vazões e níveis em campo, para isso são utilizados diversos instrumentos e os seguintes equipamentos acústicos: *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* e o *FlowTracker Acoustic Doppler Velocimeter (FlowTracker2)* (Figura 4). Na Figura 4, tem-se também um exemplo de seção transversal obtida com o uso do ADCP, nela é possível observar o nível e a profundidade do rio, o comprimento e o formato da seção, e as velocidades da massa de água (em m/s), onde cada pixel representa uma magnitude diferente ao longo da seção.

Figura 4 - Instrumentos utilizados para medição de vazão na BHRI e seção transversal obtida com o ADCP.



Fonte: Relatório interno do Projeto Itacaiúnas II.

Os métodos adotados nas campanhas seguem os padrões e normas internacionais elaboradas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e recomendadas pela Agência Nacional de Águas (ANA).

A Tabela 1 apresenta as informações das estações selecionadas para a elaboração das curvas-chaves. Estas foram escolhidas por possuírem, além das réguas limnimétricas, os sensores de nível para o cálculo das vazões diárias dos hidrogramas. No Quadro 1 é possível observar os diferentes ambientes em que estão localizadas as estações.

Tabela 1 – Estações selecionadas para elaboração das curvas-chaves.

Estação	Código	Sub-bacia	Rio	Tipo*	Latitude	Longitude
Onça Puma	822083D6	Cateté	Cateté	P e F	6°31.767' S	51° 3.552' W
Fazenda Sergipana	8220D3AA	Itacaiúnas	Água Azul	P e F	6° 41.972' S	50° 27.924' W
Sossego	82207352	Parauapebas	Parauapebas	P e F	6° 26.527' S	50° 2.037' W
Salobo	822090A0	Itacaiúnas	Itacaiúnas	P e F	5° 52.363' S	50° 28.837' W
Fazenda Abadia	8220B64C	Itacaiúnas	Itacaiúnas	P e F	5° 34.733'S	49° 32.121' W
Vila Sororó - EFC	-	Vermelho	Vermelho	F	5° 37.315'S	49° 14.828' W
Itacaiúnas-Tapirapé	-	Itacaiúnas	Itacaiúnas	F	5° 39.945'S	50° 18.030' W
Fazenda do Márcio	-	Itacaiúnas	Itacaiúnas	F	5° 35.762' S	49° 44.085'W

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Nota: *Classificação de acordo com a ANA: Estação Pluviométrica (P) e Estação Fluviométrica (F).

Quadro 1 – Seções de medição de vazão na BHRI.

Estação	Seção	Estação	Seção
Onça Puma		Fazenda Abadia	
Fazenda Sergipana		Vila Sororó - EFC	
Sossego		Itacaiúnas-Tapirapé	
Salobo		Fazenda do Márcio	

Fonte: Próprio Autor, 2019.

2.3 ANÁLISE DOS DADOS HIDROLÓGICOS

Primeiramente, é realizada a listagem de todas as medições de descarga líquida e cotas das estações, levantando o maior número de informações possíveis a respeito da seção; com o auxílio dos relatórios de medições e fichas técnicas das campanhas.

Com 5 pares de medições “cota x vazão” já é possível elaborar a curva-chave, entretanto, de acordo com Taylor (2011), o ideal é no mínimo de 12 a 15 medições realizadas durante todo o regime hidrológico, com boa distribuição nos extremos máximos e mínimos da série de cotas.

Ao final da listagem dos dados, plota-se um gráfico de dispersão de pontos em uma planilha eletrônica. Se as medições se distanciarem muito da curva é preciso analisar: i) se ocorreu erro de digitação; ii) se houve alguma ocorrência *in loco* (verificar fichas de campo); iii) analisar como foi feita a leitura da cota no dia da medição; iv) verificar se houve má calibração do instrumento de medição de vazão neste período, ou uso indevido do mesmo, e v) se a medição foi realizada em lugar diferente da seção.

Se não for possível corrigir esse dado, o mesmo pode ser descartado da curva mediante justificativa. Porém, é importante manter essas medições incoerentes no banco de dados, para analisar se as futuras medições terão a mesma tendência.

2.4 ELABORAÇÃO DA CURVA-CHAVE

A curva-chave é feita por meio de uma regressão linear. Entretanto, além da relação “cota x vazão” de uma seção do rio, a definição das características do leito do rio é fundamental para o traçado da curva, pois a vazão varia de acordo com esses fatores, ainda que o nível seja o mesmo (TUCCI, 2007).

As principais características hidrodinâmicas relacionadas em uma seção transversal de um rio são: O nível (que é o nível de água do rio medido a partir de uma cota arbitrária), a vazão, a profundidade da seção transversal (distância vertical da base até a topo da seção), a geometria (obtida pelo seu traçado e perfil), a declividade superficial, os elementos da seção transversal (área molhada, perímetro molhado, raio hidráulico, largura superficial e profundidade média), a mobilidade no fundo e a rugosidade (Coeficiente K de Manning-Strickler).

De acordo com Jacon e Cudo (1989), as características geométricas da seção são dadas em função da profundidade do curso d'água, garantindo que a vazão seja função indireta do nível d'água, assim, pode-se aproximar a relação “cota x vazão” a uma expressão exponencial do tipo potência (Equação 1):

$$Q = a(h - h_0)^n \quad (1)$$

Em que h é o nível da régua (m) correspondente à vazão Q (m³/s); h_0 é o nível para o qual a vazão é nula; a e n são constantes determinadas para cada seção.

O valor de h_0 pode ser positivo ou negativo, variando de acordo com a posição do “zero” das réguas em relação ao fundo do rio. Os parâmetros de ajuste dos pares (h e Q) são calculados pela expressão linearizada (Equação 2), a e n são determinados por regressão linear e h_0 pelo método de tentativa e erro (iterativo) (CORDEIRO E MEDEIROS, 2003).

$$\text{Log}Q = \text{log}a + n \times \log(h - h_0) \quad (2)$$

Outra expressão muito utilizada é a polinomial (Equação 3), em que são mais frequentes as representações do polinômio de primeiro (reta), segundo (parabólica) ou de terceiro grau (cúbica) (JACCON E CUDO, 1989).

$$Q = a_0 + a_1h + a_2h^2 + \dots + a_nh^n \quad (3)$$

As curvas-chave são calibradas utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS). Segundo Baltokoski et al. (2010), o coeficiente NS (Equação 4) é um dos critérios estatísticos mais importantes para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos.

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{med} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{med} - \overline{Q_{med}})^2} \quad (4)$$

Onde NS é o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (adimensional), Q_{cal} é a vazão calculada pela expressão exponencial ou polinomial (m³/s) e Q_{med} é a vazão medida em campo (m³/s).

O NS pode variar do negativo infinito a 1, sendo 1 o valor indicativo de perfeito ajuste (ASCE, 1993). Quando o valor resultante de NS for maior que 0,75 o desempenho do modelo é considerado bom, para valores entre 0,36 e 0,75 o desempenho é considerado aceitável e para valores inferiores a 0,36 o modelo é julgado como inaceitável (SILVA et al., 2008).

Para ajustar os parâmetros das Equações 1 e 3 (a , n e h_0), utilizou-se a ferramenta *Solver* da planilha eletrônica *Microsoft Excel*, com o objetivo de se obter o melhor NS.

A validação das curvas é feita através da análise visual das mesmas e dos desvios (Equação 5). De acordo com Viola et al. (2012), o desvio é a tendência média das estimativas calculadas pelo modelo. A análise dos desvios é feita avaliando-se a sua distribuição uniforme nos gráficos de “desvio x cota” e “desvio x tempo” (PISCOYA *et al.*, 2013).

$$D (\%) = \left(\frac{Q_{cal} - Q_{med}}{Q_{cal}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Os desvios menores que 10% ($D < 10\%$) são classificados como muito bom, entre 10% e 15% ($10\% > D < 15\%$) bom, entre 15% e 25% ($15\% > D < 25\%$) satisfatório, e maiores que 25% ($D > 25\%$) mostram que o modelo está estimando de forma inadequada a tendência. O desvio médio é a média de todos os desvios em relação à curva-chave traçada, aqueles próximos de zero são considerados ideais, sendo aceitável até 25%. Se o desvio ultrapassar os 25%, deve ser realizada uma análise das medições por período, construindo gráficos de “cota x área” e “cota x velocidade”, para verificar possíveis mudanças na seção do rio, e com isso estabelecer um novo período de validade da curva (VIOLA *et al.*, 2012). As curvas-chave elaboradas neste trabalho são de uma série de dados brutos de nível dos rios, obtidos das estações fluviométricas do ITV-DS.

2.5 EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE: MÉTODO LOGARÍTMICO

A extrapolação da curva-chave é necessária, pois permite a determinação da vazão em situações extremas, onde não houve medição durante as campanhas.

A extrapolação do ramo inferior da curva é realizada através do prolongamento da equação da curva-chave até a cota mínima observada. De acordo com Tucci (2007), calibrar até as cotas baixas em rios perenes pode não ser possível se não existir um controle da jusante de maneira estável, então neste caso as medições são indispensáveis, já que em cotas baixas o escoamento é mais sensível e instável à calibragem. Se esta condição de controle da estabilidade for confirmada, então é possível prolongar a curva até a cota mínima, porém, o ideal é realizar medições de vazão para evitar a extrapolação no ramo inferior.

Existem diversos métodos para extrapolação da curva até as cotas superiores que utilizam as características hidráulicas da seção de medição, como o Método de Stevens (JACCON; CUDO, 1989) e o Método “Velocidade x Área” (FILHO *et al.*, 2003), entretanto, devido a necessidade de se realizar o levantamento batimétrico de todas as

seções dos rios estudados para aplicação desses modelos, será usado apenas o Método Logarítmico (FILL, 1987, TUCCI, 2007). O ideal é que futuramente, com uma série mais longa de dados e estudos a respeito das seções, a extrapolação da curva-chave seja realizada utilizando o maior número de métodos cujas condições e informações o permitam, comparando-se os resultados obtidos e realizando a avaliação/comparação desses métodos; “Método da pseudo-extrapolação” (SELFIONE, 2002).

O Método Logarítmico, mais utilizado no Brasil, pois utiliza apenas o par “cota x vazão”, baseia-se na hipótese de que pelo menos o trecho superior da curva-chave, na faixa de cotas medidas, obedece à expressão matemática exponencial do tipo potência (Equação 1), mantendo-se os mesmos coeficientes (a e n) na faixa de cotas extrapoladas. Portanto, é um prolongamento da equação da curva-chave exponencial para as cotas mais altas (FILL, 1987; SELFIONE, 2002).

De acordo com Selfione (2002), o método é chamado logarítmico, pois a solução analítica recai na aplicação logarítmica nos dois termos da mesma (Equação 2), e ao plotar a curva em escala log-log o gráfico resultante será uma reta.

Segundo Filho et al. (2003), este método é aplicável com as seguintes restrições:

- 1- Relação $Q = f(h)$ com bom alinhamento (unívoca) das medições médias e altas;
- 2- Medições existentes até uma cota suficientemente elevada para que a direção da reta seja bem definida;
- 3- Perfil transversal sem descontinuidade de forma nas cotas extrapoladas;
- 4- Seção com forma aproximadamente trapezoidal, isto é, bem encaixada;
- 5- Controle de jusante permanente entre as cotas médias e altas.

Para análise da incerteza do método calcula-se o Erro na Cota Máxima ($Eh_{máx}$) (Equação 6), que permite quantificar uma sub ou superestimativa da metodologia na cota máxima extrapolada, visto que o valor desta vazão é a referência no processo de extrapolação.

$$Eh_{máx} = \frac{(Q_{em} - Q_{cm})}{Q_{cm}} \quad (6)$$

Em que Q_{em} é a vazão gerada pela extrapolação na cota máxima medida e Q_{cm} é a vazão da curva-chave na máxima cota medida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS CURVAS-CHAVE

Inicialmente, foi realizada a coleta de todos os dados hidrológicos disponíveis, os pares de “cota x vazão” de cada seção. A Tabela 2 apresenta algumas informações utilizadas para elaboração das curvas-chave. Observa-se que a estação Onça Puma foi a que obteve o maior número de medições (11 pares cota-vazão) para o traçado da curva e nenhuma foi excluída, por sua vez Itacaiúnas-Tapirapé foi a estação com o menor número de medições utilizadas (6 pares cota-vazão), enquanto na estação Sossego, foram excluídas o maior número de medições (6 pares cota-vazão). As medições excluídas foram aquelas em que um dos componentes do par (cota ou vazão) aparentemente apresentava erro, e não foi possível realizar a correção.

Tabela 2 – Dados utilizados para elaboração das curvas-chave.

Estação	Início	Final	Nº Medições	Nº Medições excluídas	Vazões medidas (m³/s)		Cotas lidas (cm)		Série de cotas (cm)	
					Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Onça Puma	fev/17	jun/19	11	0	1.80	38.70	10	243	10	606
Fazenda Sergipana	jan/17	jun/19	9	2	4.20	83.00	25	214	11	490
Sossego	set/15	abr/18	7	6	0.00	210.31	0	378	0	920
Salobo	fev/17	jun/19	9	2	31.66	668.06	50	491	9	587
Fazenda Abadia	fev/17	jun/19	10	0	23.57	1544.77	14	431	10	575
Vila Sororó - EFC	abr/17	jun/19	7	0	4.79	432.12	21	767	10	1104
Itacaiúnas-Tapirapé	abr/17	jun/19	6	3	15.51	468.16	8	414	8	747
Fazenda do Márcio	fev/17	jun/19	9	1	16.78	1042.90	40	619	10	776

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após a análise dos dados das estações, foi feito o traçado das curvas-chave do tipo potência e polinomial de grau 2, e estas foram calibradas utilizando o coeficiente NS. As Tabelas 3 e 4, apresentam os parâmetros das equações de potência e polinomial, respectivamente, utilizadas em cada estação, assim como, os valores dos desvios médio, máximo e mínimo, e o NS.

Verifica-se que em metade das estações foram traçadas curvas-chave do tipo potência (Tabela 3) e na outra metade foram elaboradas as curvas do tipo polinomial de grau 2 (Tabela 4). Em todas as estações os resultados da metodologia são satisfatórios, nota-se que todos os valores de NS ficaram próximos de 1, dessa forma, todas as curvas-chave geradas são válidas.

Nas curvas do tipo potência (Tabela 3) o menor valor de NS foi da estação Salobo (NS = 0,976), enquanto que o maior valor foi na Fazenda Sergipana (NS = 0,995). Em

todas estas estações os valores do expoente n estão dentro da faixa recomendada pela Eletrobrás (2010), que afirma que este não deve se distanciar muito de $5/3$, valor do expoente da profundidade média em uma das representações da equação de Manning.

As curvas do tipo polinomial de grau 2 (Tabela 4) foram as que apresentaram os maiores valores de NS, com destaque para estação Sossego que obteve o maior valor (NS = 0,999) e o menor foi da estação Itacaiúnas-Tapirapé (NS = 0,984).

Em todas as estações os desvios médios e máximos ficaram na faixa do valor ideal (satisfatório até 25%), observa-se que a maioria das estações apresentou desvio médio muito bom e bom ($D < 10\%$ e $10\% > D < 15\%$), entretanto, na estação Fazenda Sergipana uma medição ultrapassou o valor máximo recomendado (34,456%). Neste caso, verificou-se uma boa distribuição de todos os desvios com o tempo, sendo então este único valor aceitável. Portanto, a análise dos desvios confirma a validação das curvas.

Tabela 3 – Resultados da calibração e validação das curvas-chave do tipo potência.

Estação	Equação Potência			NS	Desvio (%)		
	a	h0	n		Máx	Mín	Méd
Fazenda Sergipana	23.648	-0.08	1.7453	0.978	18.678	0.177	8.335
Mina Salobo	81.135	0	1.3852	0.976	-15.982	1.891	9.447
Vila Sororó - EFC	32.422	0	1.2905	0.979	16.575	1.269	8.342
Fazenda do Márcio	84.123	-0.03	1.3458	0.988	-24.259	-1.884	11.502

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 4 – Resultados da calibração e validação das curvas-chave do tipo polinomial.

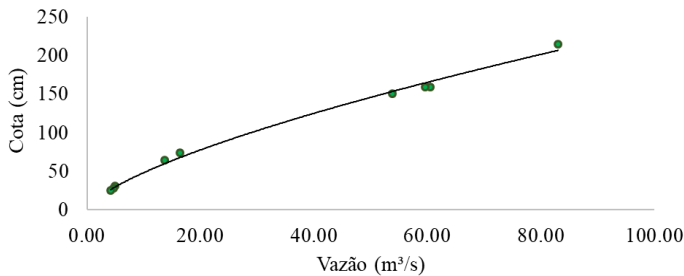
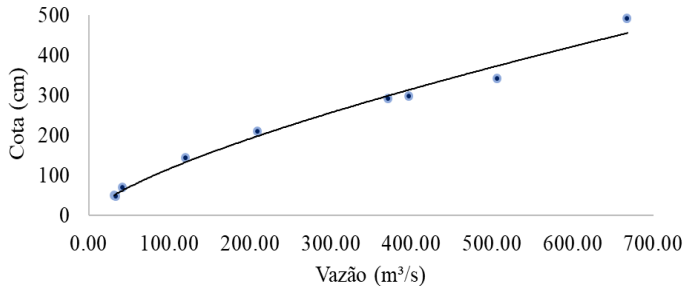
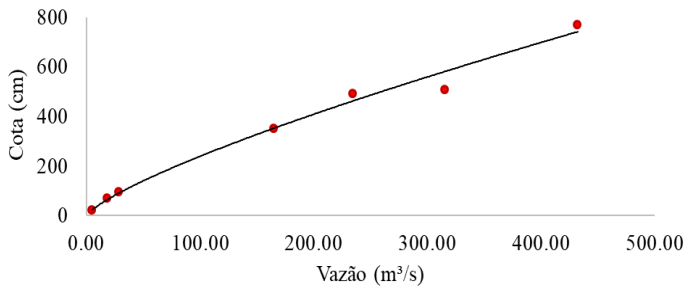
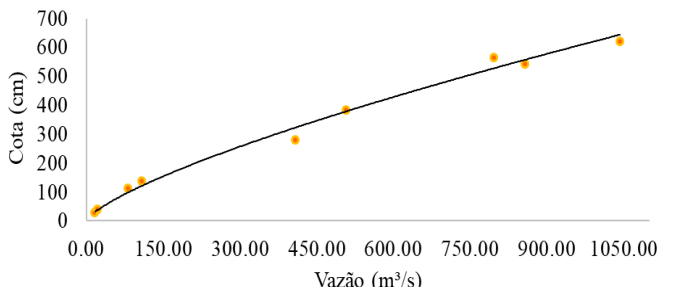
Estação	Equação Polinomial 2			NS	Desvio (%)		
	a0	a1	a2		Máx	Mín	Méd
Mina Onça Puma	1.252	5.503	4.103	0.995	15.886	-0.397	6.441
Mina Sossego	0	40.959	3.951	0.999	-3.364	0.00	0.843
Fazenda Abadia	3.743	96.719	60.395	0.998	21.647	0.147	5.085
Itacaiúnas-Tapirapé	13.216	11.459	22.600	0.984	-25.580	2.577	13.603

Fonte: Próprio Autor, 2019.

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas-chave de todas as estações, tipo potência e polinomial de grau 2, respectivamente, e suas equações para o cálculo de vazão. É possível verificar uma boa distribuição dos pontos nas curvas, um bom alinhamento das medições, com exceção apenas da estação Itacaiúnas-Tapirapé, onde se observa um alinhamento mais irregular e a falta de medições no ramo médio. Isso pode ter ocorrido porque as medições de vazão nesta estação não são realizadas sempre na mesma seção, - no período chuvoso é feita à montante da confluência com o rio Tapirapé, e no período menos chuvoso à jusante- e essa diferença “cota x área” pode ter influenciado na relação “cota x vazão”.

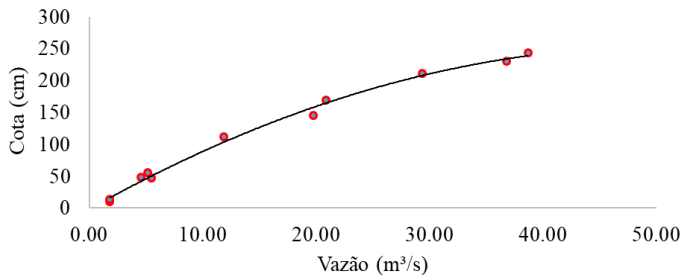
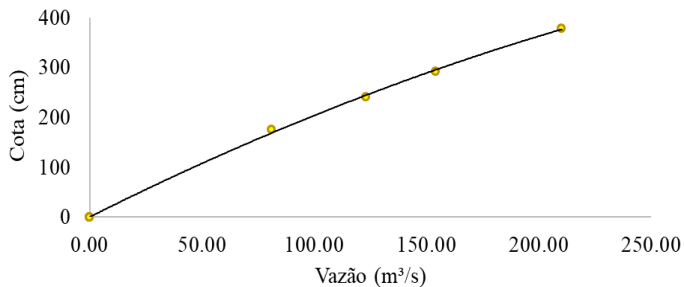
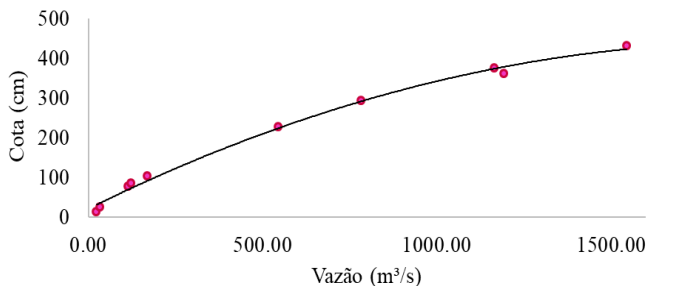
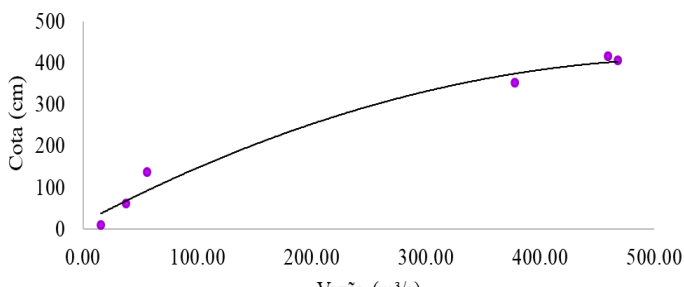
Na Figura 7, tem-se o gráfico “cota x área” da estação Itacaiúnas-Tapirapé, nota-se uma correlação muito baixa entre os pontos ($R^2 = 0,3105$); vale ressaltar que das 3 medições excluídas desta seção (Tabela 2), 2 foram do período menos chuvoso.

Figura 5 - Curvas-Chave do tipo Potência e suas respectivas equações.

Curvas-Chave tipo Potência	Equações
Curva-Chave Fazenda Sergipana 	$Q = 36.703 \times (h - 0.132)^{1.2136}$
Curva-Chave Salobo 	$Q = 81.135 \times (h)^{1.3852}$
Curva-Chave Vila Sororó 	$Q = 32.422 \times (h)^{1.2905}$
Curva-Chave Fazenda do Márcio 	$Q = 84.123 \times (h + 0.03)^{1.3458}$

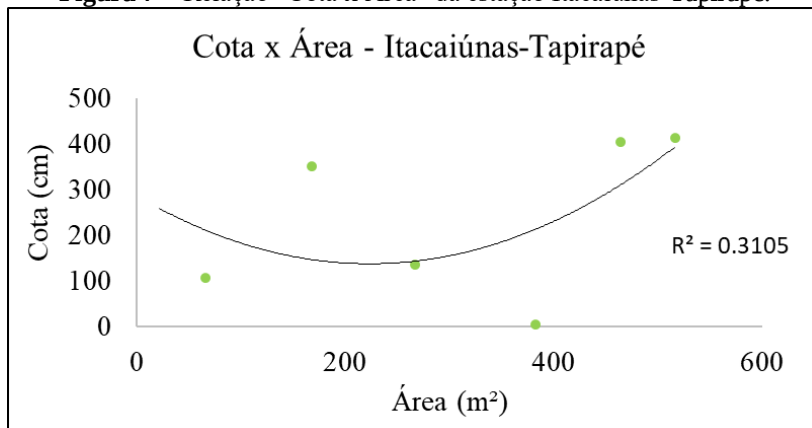
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 6 - Curvas-Chave do tipo Polinomial de grau 2 e suas respectivas equações.

Curvas-Chave tipo Polinomial	Equações
Curva-Chave Onça Puma  Gráfico da Curva-Chave Onça Puma. O eixo Y (Cota em cm) varia de 0 a 300. O eixo X (Vazão em m³/s) varia de 0.00 a 50.00. A curva é polinomial de grau 2, com pontos vermelhos e uma linha preta ajustada.	$Q = 1.252 + 5.503 \times h + 4.103 \times h^2$
Curva-Chave Sossego  Gráfico da Curva-Chave Sossego. O eixo Y (Cota em cm) varia de 0 a 400. O eixo X (Vazão em m³/s) varia de 0.00 a 250.00. A curva é polinomial de grau 2, com pontos amarelos e uma linha preta ajustada.	$Q = 40.959 \times h + 3.951 \times h^2$
Curva-Chave Fazenda Abadia  Gráfico da Curva-Chave Fazenda Abadia. O eixo Y (Cota em cm) varia de 0 a 500. O eixo X (Vazão em m³/s) varia de 0.00 a 1500.00. A curva é polinomial de grau 2, com pontos vermelhos e uma linha preta ajustada.	$Q = 3.743 + 96.719 \times h + 60.395 \times h^2$
Curva-Chave Itacaiúnas - Tapirapé  Gráfico da Curva-Chave Itacaiúnas - Tapirapé. O eixo Y (Cota em cm) varia de 0 a 500. O eixo X (Vazão em m³/s) varia de 0.00 a 500.00. A curva é polinomial de grau 2, com pontos roxos e uma linha preta ajustada.	$Q = 13.216 + 11.459 \times h + 22.600 \times h^2$

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 7 – Relação “Cota x Área” da estação Itacaiúnas-Tapirapé.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Importante destacar que o traçado da curva-chave não deve ser fixado apenas na análise numérica e visual, deve ser realizado um balanço das principais características de cada estação, entender o comportamento do curso d'água: a natureza do leito e das margens, do seu regime de escoamento e conformação, dentre outros. Muitos estudos explicam suas curvas conforme a natureza do leito (JACCON, CUDO, 1989; HP, 1999).

Portanto, é sugerido um estudo mais detalhado de todas as características dos corpos hídricos em cada estação do ITV-DS, para um melhor entendimento e aplicação das curvas-chave.

3.2 EXTRAPOLAÇÃO DAS CURVAS-CHAVE

Como foi dito anteriormente, o método logarítmico utiliza apenas as medições de cota e vazão para extrapolação das curvas-chave. Este método utiliza a Equação 1 para estimar as vazões no ramo superior da curva. Como pode ser visto na Tabela 1, comparando-se as cotas lidas em campo com aquelas medidas pelos sensores de nível (série histórica), em todas as estações é necessária a extrapolação no ramo superior da curva, já no ramo inferior todas as curvas-chave satisfazem a cota mínima observada.

Para as estações do tipo Potência (Tabela 3), foi realizado apenas o prolongamento da curva até a cota mais alta, utilizando as mesmas equações. Enquanto que, para as estações do tipo Polinomial (Tabela 4) foram determinadas novas variáveis e equações para o cálculo de vazão no ramo superior.

A Tabela 5 apresenta os resultados das extrapolações e os erros na cota máxima, referentes à aplicação do método logarítmico. Pode-se observar que todas as equações geradas obtiveram boa correlação, os valores de NS ficaram bem próximos de 1, e os

erros na cota máxima foram bem baixos, o maior erro foi na estação Itacaiúnas-Tapirapé (0,158) e o menor na estação Onça Puma (-0,001).

A Figura 8 apresenta as curvas-chave, a extrapolação, e as medições de todas as estações. Através da análise visual dos gráficos, verifica-se que o método se ajustou bem às curvas-chave, com exceção apenas da estação Itacaiúnas-Tapirapé, onde o mesmo não se alinhou muito bem à curva.

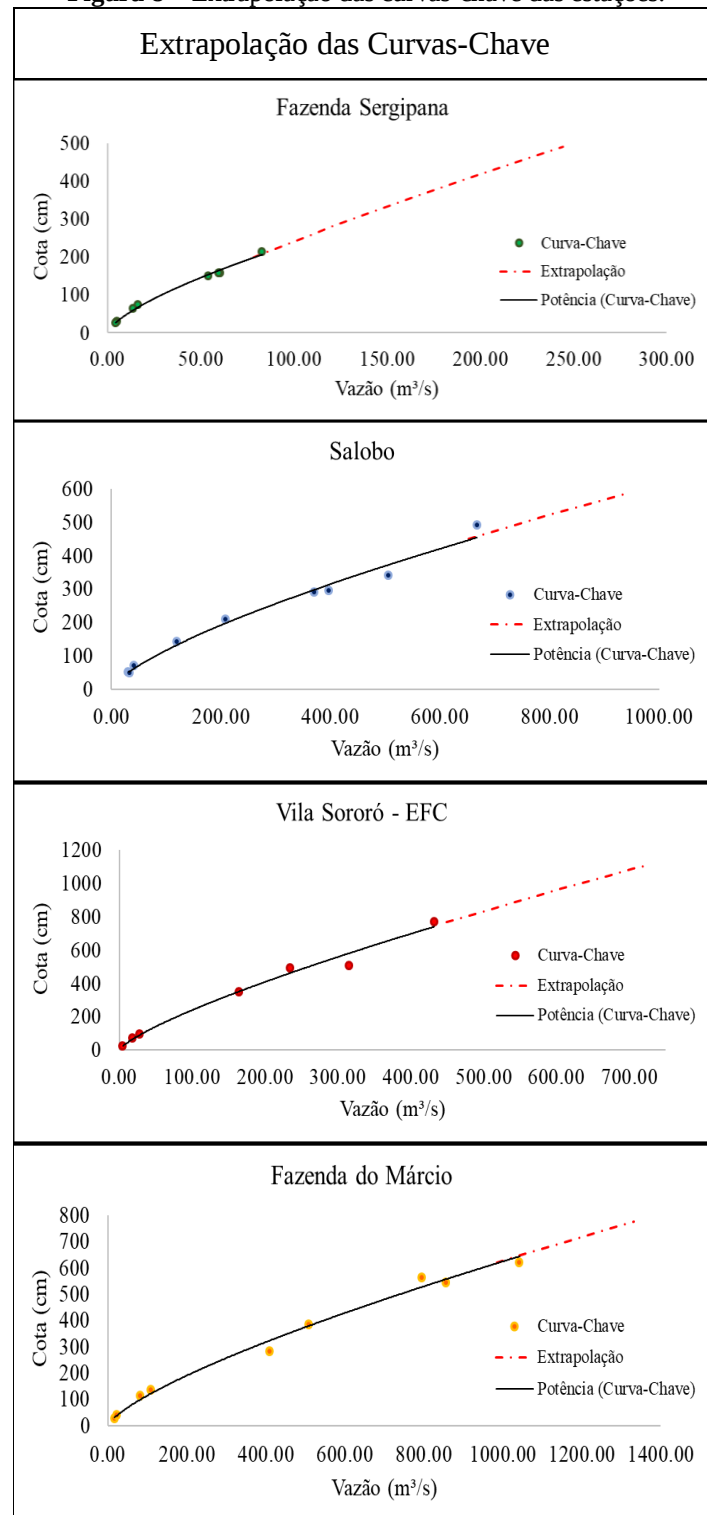
Como na estação Itacaiúnas-Tapirapé a curva-chave já havia apresentado um desalinhamento, isso pode ter interferido também na extrapolação da curva, visto que a mesma apresentou o maior erro na cota máxima (Tabela 5). Dessa forma, não é possível afirmar que o rio segue a tendência da medição da curva-chave ou da curva extrapolada, sendo então necessária a realização de mais medições na faixa de cotas médias, para confirmar ou não esta nova tendência, e o ideal é que as medições sejam realizadas sempre na mesma seção.

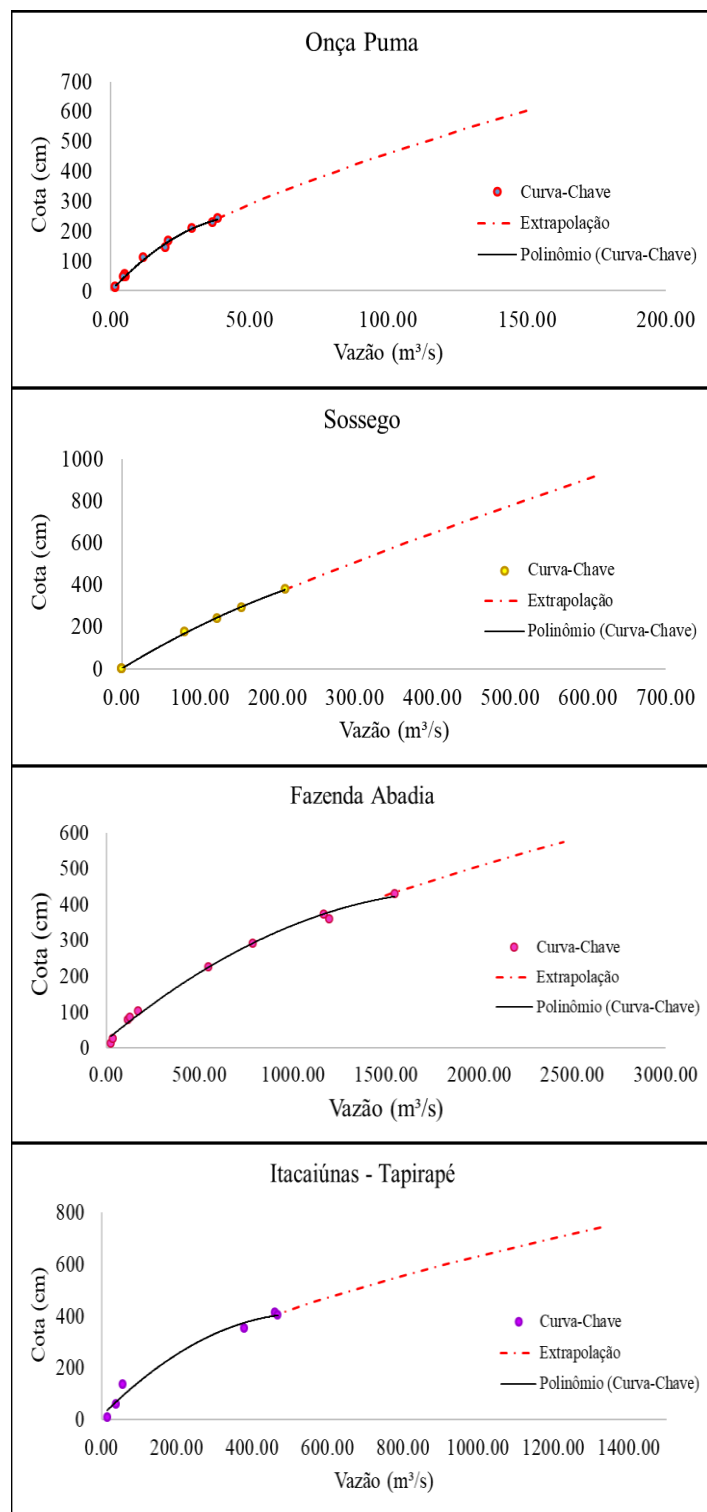
Tabela 5 – Resultados da extrapolação do ramo superior das curvas-chave.

Estação	Extrapolação			NS	Erro na Cota Máxima
	a	h0	n		
Fazenda Sergipana	23.648	-0.1	1.7453	0.978	0.031
Mina Salobo	81.135	0	1.3852	0.976	0.101
Vila Sororó - EFC	32.422	0	1.2905	0.979	0.040
Fazenda do Márcio	84.123	-0	1.3458	0.988	-0.056
Mina Onça Puma	10.281	0	1.4917	0.981	-0.001
Mina Sossego	44.439	0.07	1.1858	0.999	0.060
Fazenda Abadia	141.022	0	1.6323	0.995	-0.009
Itacaiúnas-Tapirapé	40.765	0.01	1.7394	0.992	0.158

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 8 – Extrapolação das curvas-chave das estações.





Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.3 HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA

A Figura 9 apresenta os hidrogramas diários das vazões calculadas - com as equações das curvas-chave de todas as estações - e as vazões medidas em campo, assim como suas respectivas curvas de permanência.

Os hidrogramas são gráficos que representam a variação da vazão continuamente em relação ao tempo, geralmente diário ou mensal, e auxiliam na determinação da vazão de referência do rio. Segundo a resolução do CONAMA 357/2005, vazão de referência é a “vazão do corpo hídrico utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas e a necessária articulação das instâncias do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGRH) ”.

A vazão outorgável é aquela disponível para ser outorgada, e esta é determinada utilizando as vazões de referência mínimas, para que se tenha uma condição de alta garantia de água no rio. A partir dessa condição, são realizados os cálculos de alocação da água, de modo que, quando essas vazões mínimas ocorrerem, seja garantida a retirada de água aos usuários e/ou usos prioritários (CARDOSO DA SILVA E MONTEIRO, 2004).

As vazões mínimas de referência são de elevada permanência no tempo, e as mais utilizadas são as vazões Q90 ou Q95. A vazão Q90 é determinada a partir das observações em que 90% de certo período de tempo, dentro do ano hidrológico, as vazões foram iguais ou superiores a ela, e a Q95 tem o mesmo significado que a Q90, porém, a garantia corresponde a 95% do tempo de observação.

A curva de permanência relaciona a vazão com a sua probabilidade de ocorrência ao longo do tempo, ou seja, é uma relação entre a vazão e a frequência com que esta pode ser igualada ou superada. Por meio da curva de permanência é possível determinar as vazões Q90 e Q95 do corpo hídrico.

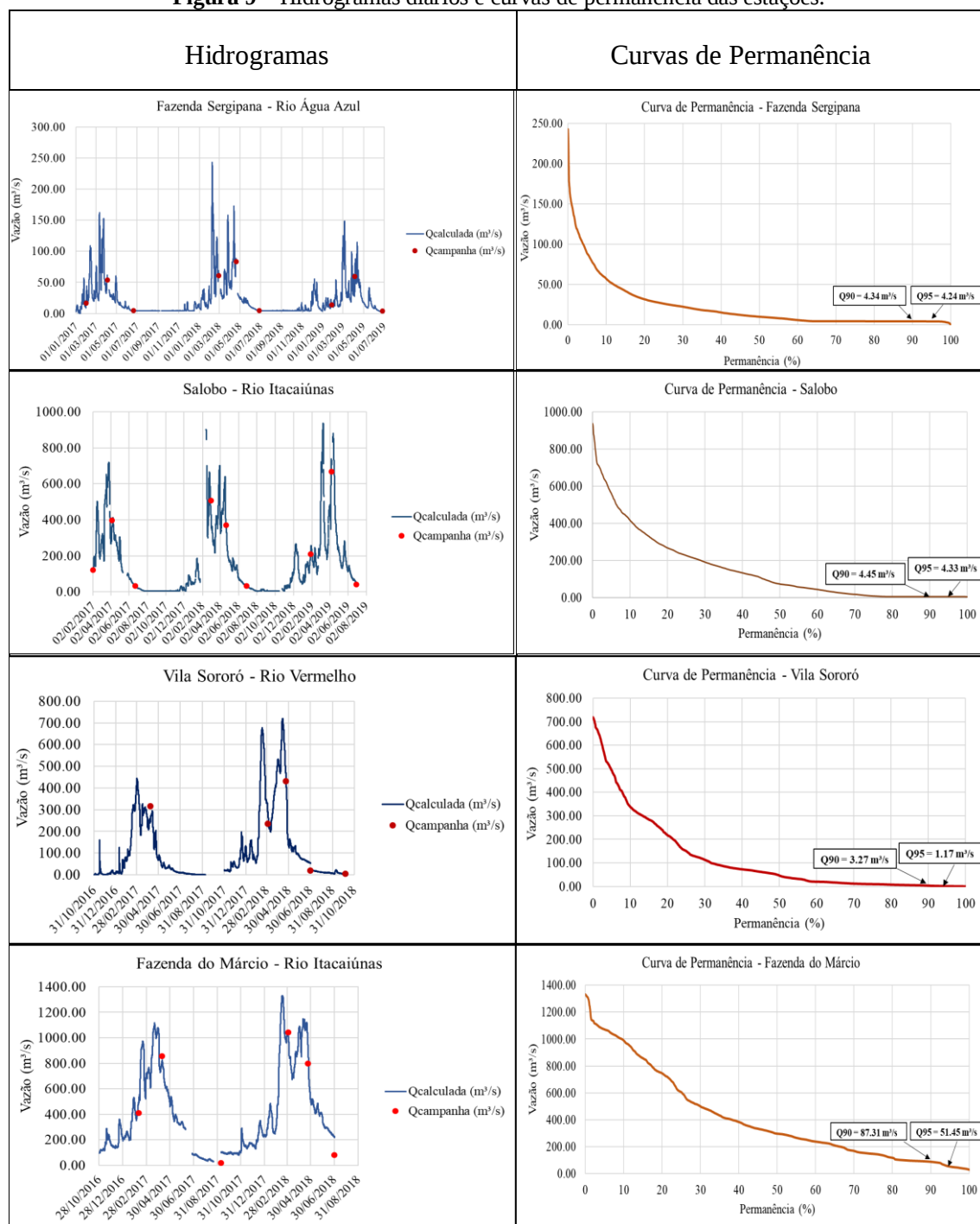
Comparando-se as vazões calculadas com aquelas medidas nas campanhas, é possível observar que os modelos de curva-chave simulam bem o comportamento das vazões observadas nas campanhas sazonais (Figura 9). Nota-se o comportamento dos rios variam de acordo com a sazonalidade da bacia e são visíveis as maiores vazões no período chuvoso e as menores vazões no período menos chuvoso.

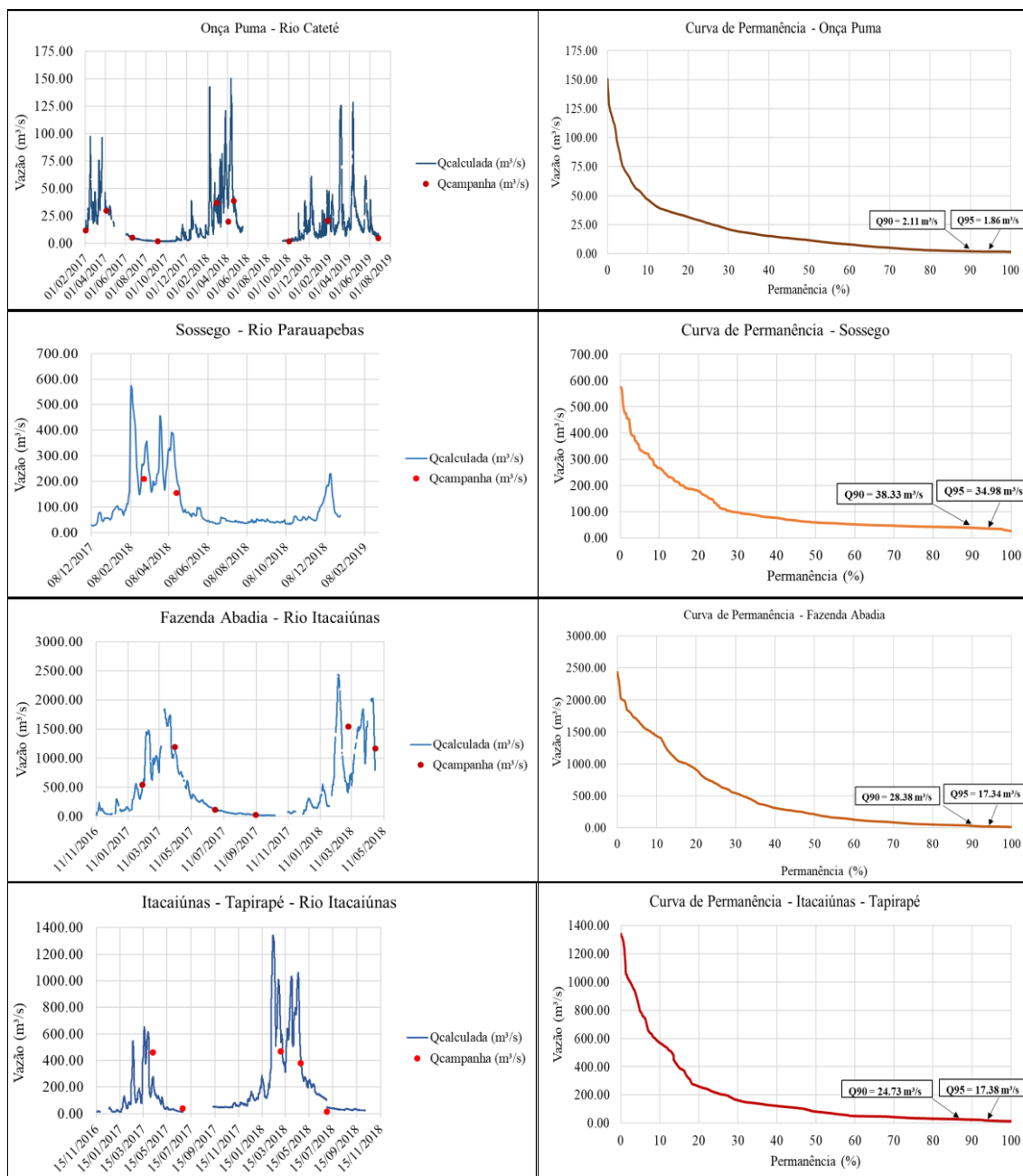
As vazões medidas nas campanhas acompanharam o comportamento geral dos corpos hídricos, entretanto, não alcançaram os picos de vazões máximas. Seria muito difícil e até perigoso conseguir medir vazões tão altas, dessa forma, as vazões medidas

são importantes para a validação desses resultados, que são obtidos pelos sensores automáticos de medição de nível.

As maiores vazões calculadas foram observadas na estação Fazenda Abadia, atingindo cerca de 2500.00 m³/s em março de 2018, enquanto que as menores vazões foram da estação Fazenda Sergipana, com a mínima de 0.10 m³/s no início de janeiro de 2017.

Figura 9 – Hidrogramas diários e curvas de permanência das estações.





Fonte: Próprio Autor, 2019.

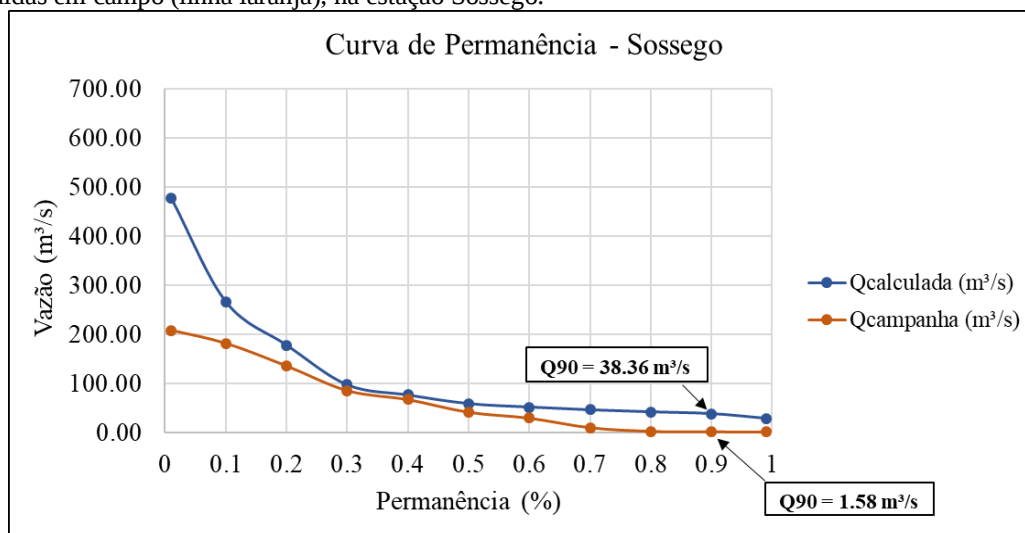
Na estação Sossego foi observado o maior número de erros nos dados de nível, por isso, essa estação possui o período mais curto de vazões calculadas dos hidrogramas. Apesar disso, é possível analisar o comportamento sazonal do corpo hídrico, com o aumento das vazões a partir do mês de dezembro, as vazões máximas se concentram de fevereiro a abril, e as vazões mínimas de maio a novembro.

Observam-se nos gráficos as vazões Q_{90} e Q_{95} de cada corpo hídrico, a estação Fazenda do Márcio no rio Itacaiúnas apresentou os maiores valores ($Q_{90} = 87.31 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95} = 51.45 \text{ m}^3/\text{s}$), enquanto os menores foram da estação Onça Puma no rio Cateté ($Q_{90} = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95} = 1,86 \text{ m}^3/\text{s}$).

Apesar de não ser utilizada apenas as campanhas sazonais para estabelecimento de vazões de referência, na Figura 10, são apresentadas as curvas de permanência das vazões calculadas e vazões medidas em campo, da estação Sossego. Essa comparação é interessante para mostrar o quão podem ser diferentes os resultados das vazões. Isso ocorre pela quantidade de dados; são realizadas campanhas trimestrais no ano, logo, tem-se 04 vazões medidas em um ano em determinado rio. Observa-se uma grande diferença entre as vazões Q90 das curvas: a Q90 das vazões calculadas é igual a 38.36 m³/s, enquanto que a Q90 das vazões de campanha é de 1.58 m³/s.

Esses resultados mostram a importância da elaboração das curvas-chave para o cálculo das vazões do hidrograma e para determinação das vazões de referência dos rios.

Figura 10 – Curvas de permanência das vazões calculadas com a curva-chave (linha azul) e as vazões medidas em campo (linha laranja), na estação Sossego.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

4 CONCLUSÕES

A elaboração das curvas-chave para as 8 estações fluviométricas do ITV-DS, utilizando o coeficiente NS, foi eficiente para obtenção dos parâmetros das equações. Em metade das estações foram traçadas curvas-chave do tipo potência e na outra metade do tipo polinomial de grau 2, e em todas as curvas os valores de NS foram satisfatórios; próximo de 1.

Em todas as estações os desvios médios e máximos ficaram na faixa do valor ideal (satisfatório até 25%), a maioria delas apresentou desvio médio muito bom e bom ($D < 10\%$ e $10\% > D < 15\%$), com exceção apenas da estação Fazenda Sergipana, onde uma única medição ultrapassou o valor máximo recomendado (34,456%).

Ademais, foi possível verificar uma boa distribuição dos pontos nas curvas-chave, um bom alinhamento das medições, com ressalvas a curva da estação Itacaiúnas-Tapirapé, cujo alinhamento foi mais irregular e ocorreu a falta de medições no ramo médio. Uma explicação para este resultado, seria o fato de que as medições de vazão nesta estação não são realizadas sempre na mesma seção.

Para extrapolação das curvas-chave utilizou-se o método logarítmico. Novamente, todas as equações geradas obtiveram boa correlação, os valores de NS ficaram bem próximos de 1, além disto, os erros na cota máxima foram bem baixos, o maior erro foi na estação Itacaiúnas-Tapirapé (0,158) e o menor na estação Onça Puma (-0,001). Através da análise visual dos gráficos, verificou-se que o método se ajustou bem às curvas-chave, com exceção da estação Itacaiúnas-Tapirapé, onde o mesmo não se alinhou muito bem à curva; mais uma vez as diferenças de área da seção de medição podem ter interferido no resultado.

Os modelos de curvas-chave simularam bem os hidrogramas dos rios da BHRI, tendo sido observado que o comportamento dos corpos hídricos varia de acordo com a sazonalidade da bacia: as maiores vazões foram observadas no período chuvoso e as menores vazões no período menos chuvoso. Apesar de ser a situação esperada, um resultado diferente disso indicaria um erro no processo.

As vazões medidas nas campanhas acompanharam o comportamento dos corpos hídricos, entretanto, não alcançaram os picos de vazões máximas, o que já era esperado. As maiores vazões calculadas foram observadas na estação Fazenda Abadia, atingindo aproximadamente 2500.00 m³/s em março de 2018, enquanto que as menores vazões foram da estação Fazenda Sergipana, com a mínima de 0.10 m³/s no início de janeiro de 2017.

Após análise das vazões Q90 e Q95, verificou-se que a estação Fazenda do Márcio no rio Itacaiúnas apresentou os maiores valores ($Q90 = 87.31 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q95 = 51.45 \text{ m}^3/\text{s}$), enquanto que os menores valores foram da estação Onça Puma no rio Cateté ($Q90 = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q95 = 1,86 \text{ m}^3/\text{s}$).

Ao se comparar as curvas de permanência das vazões calculadas e aquelas medidas em campo, na estação Sossego, notou-se que a curva das vazões de campanha não possui uma boa permanência, isso ocorre devido à quantidade de dados. Além disso, observou-se uma grande diferença entre as vazões Q90 das curvas: a Q90 das vazões calculadas é igual a $38.36 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que a Q90 das vazões de campanha é de $1.58 \text{ m}^3/\text{s}$.

As estações fluviométricas ITV-DS estão localizadas em diferentes sub-bacias e com distanciamento geográfico, por isso, deve ser feito um estudo das características de cada leito de rio, para que sejam aplicados outros métodos de elaboração e extrapolação das curvas-chave, e seja escolhido o que melhor se enquadra em cada uma. Com o tempo, as curvas-chave irão mudar, assim como as áreas das seções, e é importante o acompanhamento dessas mudanças, para um melhor entendimento da dinâmica hídrica da bacia.

Esses resultados mostram a importância da elaboração das curvas-chave para gerar os hidrogramas de vazões diárias e curvas de permanência dos rios da BHRI, que podem ser utilizados para determinação das vazões de referência para outorga de uso das águas dos rios. Ressalta-se que esse estudo é a base para muitos outros, que serão extremamente importantes para a empresa Vale e comunidades, como: estimativa da vazão máxima e do hidrograma de projeto, controle e atenuação das cheias em determinada área, previsão de eventos extremos (secas e inundações), dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem urbana, perímetro de irrigação, diques e extravasores de barragens, dentre outros. Adicionalmente, ratifica-se a importância das campanhas de medição de vazão, estas são essências para validação dos dados gerados.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.** v. 22, n.6, p. 711-728, 2014.

ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. **J. Irrig. Drainage Eng.**, v. 119, p. 429-442, 1993.

BALTOKOSKI, V. *et al.* Calibração de Modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p. 253-261, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 357, de 17/03/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Brasília/DF: ELETROBRAS, 2010. 458 p.

SILVA, L. M. C. da; MONTEIRO, R. A. Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos: uma das possíveis abordagens. In: MACHADO, C. J. S. (org.). **Gestão de Águas Doces**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 135-178. (Capítulo 5)

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2014.

CORDEIRO, A.; MEDEIROS, P. A. Estimativa da curva-chave de Blumenau. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 15., Curitiba, 2003. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003.

DIAS, L. C. **Elaboração e extrapolação de curvas-chave na Região Amazônica**. 2016. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

FILHO, D. P.; SANTOS, I.; FILL, H. F. Sistema de ajuste e extrapolação de curva de descarga- STEVENS. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 15., Curitiba, 2003. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003.

FILL, H. D. **Informações Hidrológicas**. In: **MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos**. Nobel: ABRH, 1987. p. 93-210. (Capítulo 2).

HYDROLOGY PROJECT (HP). **How to extrapolate rating curve**. HP: New Delhi, Índia, 1999. 43 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas, 1992**. [S. l.: s. n.], 199?. Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?R=bdmep/bdmep>. Acesso em agosto de 2019.

JACCON, G.; CUDO, K. J. **Curva-chave**: análise e traçado. Brasília/DF: DNAEE, 1989. 273p.

MARTINS, D. M. F. *et al.* Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 1054-1061, 2011.

MORAES, B. C. D.; COSTA, J. M. N. D.; COSTA, A. C. L. D.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.

PONTES, P. R. M.; CAVALCANTE, R. B. L.; SAHOO, P. K.; SILVA JÚNIOR, R. O.; SILVA, M. S.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 235, p. 489-499, 2019.

SAHOO, B. *et al.* Rating Curve Development at Ungauged River Sites using Variable Parameter Muskingum Discharge Routing Method. **Water Resour Manage**, v. 26, n. 11, p. 3783-3800, set. 2014.

SEFIONE, A. L. **Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave**. Orientador: Joel Avruch Goldenfum. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, v. 12, p. 258-265, 2008.

SILVA JÚNIOR, R. O.; SOUZA, E. B. D.; TAVARES, A. L.; MOTA, J. A.; FERREIRA, D. B. S.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; ROCHA, E. J. P. D. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3 Suppl, p. 1985-2002, 2007^a.

SILVA JÚNIOR, R. O.; QUEIROZ, J. C. B.; FERREIRA, D. B. S.; TAVARES, A. L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; GUIMARÃES, J. T. F.; ROCHA, E. J. P. **Estimativa de precipitação e vazões médias para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental, Brasil**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 5, p. 1638-1654, 2017b.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE SOUZA, E. B.; SILVA JÚNIOR, R. O.; NASCIMENTO, W. R.; VERSIANI DE MENDONÇA, B. R.; GUIMARÃES, J. T. F.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **J. Environ. Manag.**, v. 167, p. 175-184, 2016.

TAYLOR, P. **Rating curve and gauging information**. Tasmania: National Research FLAGSHIPS, 2011. 28p.

TUCCI, C. E. M. *et al.* **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. 5ª reimp. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

USGS. **Standard for the Analysis and Processing of Surface-Water Data and Information Using Electronic Methods**. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2002. 106 p.

VALE. **Relatório de Sustentabilidade - 2017**. Rio de Janeiro: VALE, 2018.
Disponível em: vale.com/rs2017.

VIOLA, M. R. *et al.* Modelagem Hidrológica em uma Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Araguaia, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, p. 38-47, 2012.