



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**

**AMBIENTAL**

**- MESTRADO -**

**INFLUÊNCIA DA SELEÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO NA  
CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO MGB-  
IPH**

*Por*

*Paloma Mara de Lima Ferreira*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Junho de 2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**

**AMBIENTAL**

**- Mestrado -**

**INFLUÊNCIA DA SELEÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO NA  
CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO MGB-  
IPH**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Paloma Mara de Lima Ferreira**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz**

**João Pessoa – Paraíba**

**Junho de 2017**

F383i Ferreira, Paloma Mara de Lima.  
Influência da seleção das funções objetivo na calibração do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH / Paloma Mara de Lima Ferreira. - João Pessoa, 2017.  
143 f.: il. -

Orientador: Adriano Rolim da Paz.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Engenharia Civil e Ambiental. 2. Modelagem hidrológica distribuída. 3. Modelo MGB-IPH. 4. Calibração. 5. Otimização multiobjetivo. I. Título.

UFPB/BC

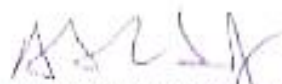
CDU: 624:504(043)

**"INFLUÊNCIA DA SELEÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO NA  
CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO MGB-IPH"**

**PALOMA MARA DE LIMA FERREIRA**

**Dissertação aprovada em 20 de junho de 2017**

**Período Letivo: 2017.1**



**Prof. Dr. ADRIANO ROLIM DA PAZ - UFPB**  
(Orientador)



**Prof. Dr. GUSTAVO BARBOSA LIMA E SILVA - UFPB**  
(Membro Interno)



**Prof. Dr. JUAN MARTIN BRAVO - UFRGS**  
(Membro Externo)

**João Pessoa/PB**  
**2017**

*A todos meus familiares que me fazem sempre acreditar em meus objetivos, em especial aos meus pais Maria Lucia de Lima Ferreira e Acilon Ferreira de Lima por me motivar, pelo amor, paciência, confiança e, principalmente, pela educação que fez de mim o que sou hoje.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Escrever o agradecimento é a última tarefa na redação de um trabalho como este. São tantas as pessoas, ao longo dos últimos anos, que de alguma forma contribuíram para que essas páginas fossem escritas. Quero registrar aqui meus sinceros agradecimentos a todos.

Primeiramente agradeço a DEUS que sempre me guiou e me deu forças para lutar pelos meus objetivos.

Ao meu pai Acilon Ferreira, que sempre me incentivou e me mostrou o quanto é gratificante batalhar por minha formação.

À minha mãe Maria Lúcia, que sempre me guiou e orientou nas escolhas pessoais e profissionais que me conduziram até esse momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz, pela confiança desde o início, e visão científica no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores da pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela contribuição à minha formação profissional.

Ao professor Dr. Adrien Paris pelo apoio e importante colaboração na aplicação de sua metodologia neste estudo.

Ao professor Dr. Luís Gustavo de Lima Sales da UFCG por disponibilizar o ambiente do Laboratório de Geoprocessamento para a realização de calibrações simultâneas.

A Tiago Linconl por todo amor, carinho, companheirismo e que esteve presente em todos os momentos deste trabalho me incentivando e apoiando.

A todos os alunos do curso de Engenharia Civil e Ambiental, em especial ao da área de Recursos Hídricos, que nesses 2 anos de mestrado fizeram valer o significado de amizade, respeito e incentivo.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos, pois não teria como alimentar este sonho hoje realizado.

A todos que contribuíram direto e indiretamente na conclusão deste trabalho, meu muito obrigado.

## RESUMO

Na calibração automática multiobjetivo de modelos hidrológicos, os parâmetros do modelo são ajustados dentro do espaço de busca, de acordo com dois ou mais objetivos, sendo a escolha das funções uma etapa importante. Esse tipo de calibração geralmente leva a um melhor desempenho do modelo, porém ainda não é bem compreendido que critérios devem ser utilizados para a seleção das funções objetivo (FO). Neste sentido, o objetivo principal desse estudo foi avaliar a influência de diferentes FO na calibração automática multiobjetivo do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH e a abordagem de métodos alternativos de calibração aplicados na região semiárida. A aplicação do modelo abrange parte da bacia hidrográfica do rio Piancó com uma área de 4603,39 km<sup>2</sup>. O modelo MGB-IPH foi rodado com passo de tempo diário, com calibração no período de 01/jan/1970 até 31/dez/1990 e validação de 1/jan/1991 até 31/dez/2011. Primeiramente, foi feita uma análise de sensibilidade de 36 FO em dez testes usando series de vazões sintéticas. Posteriormente, foram realizadas 111 calibrações com diferentes combinações de FO. Também foram aplicados dois métodos de calibração alternativos: o método de calibração do fracionamento do hidrograma de entrada e o método de calibração por período do ano (úmido e seco). Os resultados mostram que foi possível identificar em quais frações do hidrograma as FO são mais sensíveis através dos testes de sensibilidade. Com a análise sobre as calibrações multiobjetivo com diferentes FO, observou-se que o modelo MGB-IPH simulou satisfatoriamente o regime das vazões observadas na maioria das calibrações, com relativamente bom ajuste dos hidrogramas para as doze melhores calibrações com NS entre 0,70 a 0,75, EKG entre 0,76 a 0,84, EV entre 0,39 a 0,44, entre outras medidas de desempenho. Os métodos de calibrações automática alternativos demonstraram relativamente bom desempenho quando comparado ao método tradicional de calibração com valores satisfatórios das medidas de desempenho empregadas. Conclui-se que a calibração automática multiobjetivo demonstrou sensibilidade quanto a escolha das FO nos resultados das calibrações. Os melhores conjuntos de FO foram representados pelas calibrações CALIB 92 (EKG - NSDlog - EV) e CALIB 111 (NSD - NSlog - FCPerm).

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos hidrológicos, Semiárido, Calibração, Otimização multiobjetivo.

## ABSTRACT

In the automatic multiobjective calibration of hydrological models, the parameters of the model are adjusted within the search space, according to two or more objectives, and the choice of functions is an important step. This type of calibration usually leads to better model performance, but it is still not well understood what criteria should be used to select objective functions (OF). In this sense, the main objective of this study was to evaluate the influence of different OFs on the automatic multiobjective calibration of the distributed hydrological model MGB-IPH and the approach of alternative methods of calibration applied in the semi-arid region. The application of the model covers part of the hydrographic basin of the Piancó river with an area of 4603.39 km<sup>2</sup>. The MGB-IPH model was run with step time daily, with calibration in the period from Jan/01/1970 to Dec/31/1990 and validation Jan/01/1991 to Dec/31/2011. First, a sensitivity analysis of 36 OF was performed in ten tests using series of synthetic flows. Subsequently, 111 calibrations were performed with different OF combinations. Were also applied two alternative calibration methods: the inlet hydrograph fraction calibration method and by period of year calibration method (wet and dry). The results show that it was possible to identify in which fractions of the hydrograph the OF are more sensitive through the sensitivity tests. With the analysis of multiobjective calibrations with different OF, it was observed that the MGB-IPH model satisfactorily simulated the flow regime observed in most calibrations, with a relatively good adjustment of the hydrographs for the twelve best NS calibrations between 0.70 to 0.75, KGE between 0.76 and 0.84, VE between 0.39 and 0.44, among other measures of performance. The alternative automatic calibration methods demonstrated relatively good performance when compared to the traditional calibration method with satisfactory values of the performance measures used. It was concluded that the automatic multiobjective calibration demonstrated sensitivity regarding the choice of OF in the calibration results. The best sets of OF were represented by the calibrations CALIB 92 (EGK - NSDlog - VE) and CALIB 111 (NSD - NSlog - FCPerm).

**KEYWORDS:** Hydrological models, Semi-arid, Calibration, Multiobjective optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (A) Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem; (B) Divisão esquemática de N blocos de uso/tipo de solo em uma célula do modelo. ....	23
Figura 2 - Hidrograma de vazão na calibração automática período de 1970 a 1990. ....	25
Figura 3 - Gráfico de dispersão das vazões observadas e calculadas na calibração automática: (A) calibração (B) Validação. (Fonte: FELIX, 2015) .....	26
Figura 4 – Calibração multiobjetivo de um modelo teórico com dois parâmetros considerando a minimização de duas funções-objetivo. (a) Espaço dos parâmetros, (b) Espaço das funções-objetivo. (Fonte: BRAVO et al., 2009).....	31
Figura 5 - Simulação versus observação de regimes de vazões diária baixo, médio e alto no período de calibração (esquerda) e validação (direita) nas estações Xiamentai (superior) e Jiutiaoling (inferior). (Fonte: ZHANG et al., 2016) .....	32
Figura 6 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	52
Figura 7 – Precipitação anual da bacia hidrográfica do rio Piancó. (Fonte: autoria própria, 2017).....	53
Figura 8 – Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó. (Fonte: autoria própria, 2017) .....	54
Figura 9 – Fluxograma das etapas metodológicas. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	56
Figura 10 – Dados de vazão observados no posto fluviométrico Piancó – PB e indicação dos períodos de calibração e validação do modelo hidrológico. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	56
Figura 11 - (A) Discretização da bacia do Rio Piancó (B) Rede de drenagem do modelo hidrológico (células de 0,05° x 0,05°). (Fonte: FELIX, 2015) .....	58
Figura 12 – Hidrogramas das vazões observadas e sintéticas para o ano de 1973. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	61
Figura 13 – Definição das faixas de vazão para aplicar o fracionamento do hidrograma. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	68
Figura 14 – Procedimento de composição do hidrograma de saída através funções lineares simples (Fonte: adaptado de PARIS, et al. 2011).....	70
Figura 15 - Curva de permanência das vazões observadas para o período de 1970 a 2011, com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo. ....	71

Figura 16 – Vazão média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó .....	73
Figura 17 – Procedimento de composição do hidrograma de saída através funções lineares simples. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	74
Figura 18 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo I para os 10 testes realizados. ....	78
Figura 19 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo II para os 10 testes realizados. ....	80
Figura 20 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo III para os 10 testes realizados. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	81
Figura 21 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo IV para os 10 testes realizados. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	82
Figura 22 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo V para os 10 testes realizados. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	84
Figura 23 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração: (A) CALIB 22; (B) CALIB 47 e (C) CALIB 92. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	88
Figura 24 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de validação: (A) CALIB 22; (B) CALIB 47 e (C) CALIB 92. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	89
Figura 25 – Comparação entre os valores de eficiência calculados pelo MGB-IPH com 200 indivíduos das 12 melhores calibrações. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	95
Figura 26 – Comparação entre os valores de eficiência calculados pelo MGB-IPH com 200 indivíduos das 12 melhores calibrações. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	96
Figura 27 - Análise de dispersão entre vazões diárias observadas e calculadas no período de calibração (1970-1990) do modelo MGB-IPH. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	98
Figura 28 - Análise de dispersão entre vazões diárias observadas e calculadas no período de validação (1991-2011) do modelo MGB-IPH. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	98
Figura 29 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas, com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes: (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	100
Figura 30 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração: (A) CALIB 89; (B) CALIB 92 e (C) CALIB 93. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	101

Figura 31 – Comparação das curvas de permanência das vazões observadas e calculadas (CALIB 92, CALIB 93 e CALIB 89), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	102
Figura 32 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (CALIB 92, CALIB 102 e CALIB 111) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	103
Figura 33 – Comparação das curvas de permanência das vazões observadas e calculadas (CALIB 92, CALIB 102 e CALIB 111), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	104
Figura 34 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (F1, F2 e F3) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	108
Figura 35 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (F4, F5 e F6) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	109
Figura 36 – Vazões diárias calculadas x observadas para o período de calibração pelo método alternativo. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	110
Figura 37 – Vazões diárias calculadas x observadas para o período de validação pelo método alternativo. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	110
Figura 38 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas (F3, F4 e F6), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo, para o período de (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017).....	111
Figura 39 – Comparação dos hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	113
Figura 40 – Correlações entre vazões observadas e calculadas pelo método tradicional e alternativo nos períodos de (A) calibração (superiores) e (B) validação (inferiores). .....	114
Figura 41 – Curva de permanência das vazões observadas e calculadas pelo método alternativo e tradicional nos períodos de (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017) .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas a nível diário na calibração manual e automática.....	25
Tabela 2 – Algumas das funções objetivo utilizadas na calibração de modelos hidrológicos .....	48
Tabela 3 - Postos pluviométricos utilizados na pesquisa .....	57
Tabela 4 - Vazões calculadas sintéticas.....	60
Tabela 5 - Classificação das FO com base no levantamento bibliográfico .....	63
Tabela 6 - Limites dos parâmetros para calibração automática.....	64
Tabela 7 – Combinações das funções objetivo usadas nas calibrações no modelo MGB-IPH .....	66
Tabela 8 – Combinações de funções objetivos com curva de permanência usadas nas calibrações no modelo MGB-IPH .....	67
Tabela 9 - Coeficientes e valores de Q1 e Q2 para fracionamento da série hidrológica.....	70
Tabela 10 – Valores dos limites Q1 e Q2 e tipo de funções objetivo usados na calibração multiobjectivo de cada fracionamento.....	72
Tabela 11 - Tipo de FO usadas na calibração multiobjectivo de cada período .....	74
Tabela 12 – Divisão das FO por grupos .....	75
Tabela 13 – Seleção das FO para as calibrações automáticas multiobjectivo do modelo MGB-IPH .....	85
Tabela 14 – Medidas de desempenho utilizadas para avaliar o ajuste das vazões pelo modelo MGB-IPH .....	86
Tabela 15 - Avaliação dos 12 melhores ajustes do modelo MGB-IPH no período de calibração (1970-1990).....	92
Tabela 16 - Avaliação dos 12 melhores ajustes do modelo MGB-IPH no período de validação (1991-2011).....	93
Tabela 17 - Limites dos parâmetros após calibração automática de uma população de 200 indivíduos da região de Pareto .....	94
Tabela 18 - Avaliação dos melhores ajustes do modelo MGB-IPH com base na curva de permanência.....	104
Tabela 19 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de calibração .....	105

Tabela 20 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de validação .....	106
Tabela 21 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de calibração .....	112

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba  
ANA – Agência Nacional das Águas  
b – Parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo  
Cb – Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo  
CI – Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células  
CPA1 – Calibração por período do ano 1  
CPA2 – Calibração por período do ano 2  
Cs – Parâmetro para calibração da propagação superficial nas células  
D – Índice de Concordância  
DCP – Declive da curva de permanência  
DVPmax – Diferença Máxima entre as Maiores Vazões de Pico  
EAmx – Erro Máximo Absoluto Diário  
EM – Erro Médio  
EMA – Erro Médio Absoluto  
EMAR – Erro médio absoluto relativo  
EMQ – Erro Médio Quadrático  
EPM – Índice de Persistência do Modelo  
EV – Coeficiente de Eficiência Volumétrica  
EKG – Eficiência Kling-Gupta  
FCP – Fator da curva de permanência  
FO – Funções Objetivos  
HEQM – Distributed water system model  
HF - Reprodução das Vazões Elevadas  
HRU – Unidade de Resposta Hidrológica  
IAF – Índice de Área Foliar  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
Kint – Parâmetro de drenagem subsuperficial  
Kbas – Parâmetro de escoamento subterrâneo  
LOGQ – Logaritmo dos Erros Quadrados  
Matlab – MATrix LABoratory  
MGB – Modelo Hidrológico Distribuído

MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MNT – Modelo Numérico do Terreno  
MOCOM-UA – Multiple Objective Complex Evolution - Universidade do Arizona  
NS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe  
NSlog – NS para o logaritmo das vazões  
NSabs – Forma Modificada de NS  
NSD – NS com a Média do Calendário Diário  
NSDlog – NS com a Média do Calendário Diário calculado a partir de valores logarítmicos  
NSDabs – Forma Modificada de NS com a Média do Calendário Diário  
NSM – Coeficiente de Eficiência de Referência  
R – Coeficiente de correlação  
R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação  
REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático  
REMQav – REMQ modificado para altas vazões  
REMQbv – REMQ modificado para baixas vazões  
ROCE – Erro Percentual do coeficiente de escoamento  
RSR – Razão entre REMQ e desvio padrão das observações  
RV – Forma combinada de NS e EMAR  
SCE-UA – Shuffled Complex Evolution - Universidade do Arizona  
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission.  
SSEQ – Soma dos Erros Quadrados Diários  
SSEmq – Erros Quadrados das Somas Mensais Normalizado pela Área da Bacia  
SWAT – Soil and Water Assessment Tool  
TREMQ – Transformação da Raiz quadrada do erro médio quadrático  
UFPB – Universidade Federal da Paraíba  
UPHs – Unidades de Planejamento Hidrológico  
Wc – Limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente  
WetSpa – Spatially Distributed Hydrologic Model  
Wm – Armazenamento de água no solo  
Y – Forma combinada de NS e  $\Delta V$   
 $\Delta V$  – Erro relativo de volume

## SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS	19
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b>	<b>19</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>20</b>
2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA	20
2.2 ETAPAS DE APLICAÇÃO	21
2.3 MODELO MGB – IPH	22
2.4 AJUSTE DE PARÂMETROS	26
<b>2.4.1 Ajuste manual</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2 Ajuste automático</b>	<b>28</b>
2.5 ALGORITMO MOCOM-UA	33
2.6 FUNÇÕES OBJETIVO	35
<b>2.6.1 Coeficiente de correlação (R) e Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>)</b>	<b>37</b>
<b>2.6.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), NS para o logaritmo das vazões (NSlog) e Forma Modificada de NS (NSabs)</b>	<b>38</b>
<b>2.6.3 NS com a Média do Calendário Diário (NSD), NS com a Média do Calendário Diário calculado a partir de valores logarítmicos (NSDlog) e Forma Modificada de NS com a Média do Calendário Diário (NSDabs)</b>	<b>39</b>
<b>2.6.4 Coeficiente de Eficiência de Referência (NSM) e Índice de Persistência do Modelo (EPM)</b>	<b>40</b>
<b>2.6.5 Reprodução das Vazões Elevadas (HF), Índice de Concordância (D) e Eficiência Kling-Gupta (EKG)</b>	<b>40</b>
<b>2.6.6 Erro Médio (EM), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Quadrático (EMQ) e Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (REMQ)</b>	<b>41</b>
<b>2.6.7 Transformação da Raiz quadrada do erro médio quadrático (TREM<sub>Q</sub>), Razão entre REMQ e desvio padrão das observações (RSR), .....REM<sub>Q</sub> modificado</b>	

para altas vazões (REMQAV) e REMQ modificado para baixas vazões (REMQBV)	43
2.6.8 Erro Máximo Absoluto Diário (E <sub>Amax</sub> ), Diferença Máxima entre as Maiores Vazões de Pico (DVP <sub>max</sub> ) e Logaritmo dos Erros Quadrados (LOGQ)	44
2.6.9 Erros Quadrados das Somas Mensais Normalizado pela Área da Bacia (SSEMQ) e Soma dos Erros Quadrados Diários (SSEQ)	45
2.6.10 Erro relativo de volume ( $\Delta V$ ) e Coeficiente de eficiência volumétrica (EV)	45
2.6.11 Erro médio absoluto relativo (EMAR) e Erro Percentual do coeficiente de escoamento (ROCE)	46
2.6.12 Forma combinada de NS e $\Delta V$ (Y) e Forma combinada de NS e EMAR (RV)	46
2.6.13 Declive da curva de permanência (DCPerm) e Fator da curva de permanência (FCPerm)	47
<b>3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>52</b>
3.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ	52
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>55</b>
4.1 VISÃO GERAL DO ESTUDO	55
4.2 APLICAÇÃO ANTERIOR DO MODELO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ	56
4.3 TESTE DE SENSIBILIDADE DAS FUNÇÕES OBJETIVO	59
4.4 OTIMIZAÇÃO PARA DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO	62
4.4.1 Seleção de Funções Objetivo	62
4.4.2 Adaptação do modelo para diferentes Funções Objetivo	63
4.5 OTIMIZAÇÃO POR FAIXAS DE VAZÃO	67
4.6 OTIMIZAÇÃO POR DIFERENTES PERÍODOS DO ANO	72
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>75</b>
5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS FUNÇÕES OBJETIVO	75
5.2 ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO MULTIOBJETIVO AUTOMÁTICA	85
5.2.1 Aspectos gerais	85
5.2.2 Análise de dispersão dos conjuntos de soluções	94
5.2.3 Comparação entre vazões observadas e calculadas	97
5.2.4 Ajuste com base na curva de permanência	102
5.3 ANÁLISE DO MÉTODO DO FRACIONAMENTO DO HIDROGRAMA	105

5.4 ANÁLISE DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POR PERÍODO DO ANO .....	111
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>117</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	117
6.2 RECOMENDAÇÕES .....	119
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE A: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA CALCULADOS PELO MGB-IPH COM 200 INDIVÍDUOS DAS 111 CALIBRAÇÕES .....</b>	<b>128</b>
<b>APÊNDICE B: DISPERSÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (1970-1990) DO MODELO MGB-IPH .....</b>	<b>139</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos estão cada vez mais sofisticados e são rotineiramente utilizados para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (MULETA, 2012), pois desempenham um papel vital na concepção e operação de projetos de recursos hídricos, controle de inundação, mitigação de prejuízos da seca, etc. Neste aspecto, os modelos hidrológicos distribuídos têm ganhado muito destaque por levar em conta a variabilidade espacial das características físicas da bacia e das forçantes meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade do ar) (SINGH e FREVERT, 2006).

Atualmente existem vários modelos hidrológicos disponíveis, aos quais se atribui a capacidade de representar os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas, como exemplo os modelos SWAT (SHOPE et al., 2014; WAGNER et al., 2015), WetSpa (RWETABULA et al., 2012), MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007; GETIRANA et al., 2011, PAIVA et al., 2013; FELIX e PAZ, 2016), entre outros.

Apesar das representações aceitáveis demonstradas pelos modelos hidrológicos desenvolvidos na última década, ainda existem muitas incertezas referentes aos dados, às limitações da estrutura do modelo para representar o sistema e também na estimativa dos parâmetros (TUCCI, 2005). Na modelagem hidrológica o ajuste dos valores dos parâmetros é alcançado através do processo de calibração, que é realizado modificando os valores dos parâmetros até que o hidrograma calculado reproduza o hidrograma observado com boa precisão (COLLISCHONN, 2001).

Nesse aspecto, a calibração dos parâmetros também representa uma forma de compensação pelas diferentes incertezas existentes. Por isso, deve-se ter cautela nesse processo, visto que falhas do usuário quanto à preparação de dados e configuração do modelo também podem resultar em comportamento final satisfatório do modelo, pois o ajuste dos parâmetros pode compensar tais falhas, e assim agregar incerteza aos resultados.

A calibração ou ajuste dos parâmetros pode ser feito manualmente com processo de tentativa e erro, e/ou de forma automática por meio de métodos de otimização. A calibração automática pode ser de caráter mono-objetivo (otimização de somente uma função objetivo FO) ou multiobjetivo, esse último procura a maximização ou minimização de várias FO (medidas de desempenho ou critérios de eficiência) de forma simultânea, gerando vários conjuntos de parâmetros como resultado do processo. A escolha das funções é uma etapa

importante no processo de calibração. Embora seja indiscutível que a calibração multiobjetivo potencialmente leva a um melhor desempenho do modelo, ainda não é bem compreendido que critérios devem ser utilizados (WOHLING et al., 2013).

Várias estatísticas têm sido desenvolvidas nas últimas décadas para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos e para calibração dos parâmetros. Alguns critérios são frequentemente usados, tais como a raiz do erro médio quadrado (REMQ) e coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS). Apesar da sua popularidade, a NS tem muitas limitações bem documentadas. Uma preocupação é que o uso da média das observações como um modelo de referência conduziria a superestimação do desempenho do modelo hidrológico para variáveis altamente estacionárias da bacia hidrográfica (GUPTA et al., 2009). Isso significa que a interpretação do desempenho do modelo é inconsistente, já que o modelo de referência tem significados diferentes para diferentes bacias hidrográficas, dependendo da sazonalidade da variável da bacia hidrográfica (MULETA, 2012). Por exemplo, valores elevados de NS podem ser obtidos com um modelo pobre se os dados tiverem alta variabilidade, e se as observações exibem menos variabilidade e os valores estão próximos da média das observações, o NS pode se aproximar do infinito negativo mesmo se o modelo for um bom preditor das observações. Isso pode torna a comunicação de desempenho do modelo muito enganosa quando o NS é usado sozinho. Outra limitação é a maior sensibilidade do NS as vazões de pico, uma vez que utiliza os desvios quadráticos (MULETA, 2012). Uma das alternativas propostas para corrigir as deficiências de NS inclui a substituição da média das observações pela média interanual para cada dia do calendário na tentativa de diminuir o primeiro problema citado.

Muitos são os estudos que se propuseram formas alternativas de tratar os procedimentos de calibração, de previsão e de análise das incertezas dos processos hidrológicos (KRAUSE et al. 2005; MORIASI et al. 2007; GUPTA et al. 2009, MULETA 2012; WOHLING et al. 2013), com a finalidade de melhor representar a realidade de diferentes bacias hidrográficas.

Zhang et al. (2016) mencionam que a previsão de eventos extremos (cheias e secas) está cada vez mais sendo alvos de pesquisas, por causa dos potenciais danos desastrosos para a sociedade, economia e meio ambiente, especialmente nas regiões áridas e semiáridas. Segundo tais autores, o desempenho de simulação de modelos hidrológicos ainda estão longe de ser satisfatórias, especialmente para os eventos de baixas vazões. Fato este também

observado por Felix e Paz (2016) no estudo com aplicação do modelo MGB-IPH na bacia semiárida do rio Piancó.

Propõe-se no presente estudo a adaptação no modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007), quanto às FO utilizadas no ajuste automático de parâmetros. Como estudo de caso, toma-se a Bacia Hidrográfica do Rio Piancó (PB), que possui um regime hídrico peculiar com grande predominância de rios intermitentes. São tomadas 36 FO identificadas na literatura e testadas diversas configurações de calibração multiobjetivo com combinações de três FO, visando avaliar a influência de diferentes FO na calibração automática multiobjetivo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de diferentes FO na calibração automática multiobjetivo do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH e a abordagem de métodos alternativos de calibração aplicados na região semiárida.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar conjunto de FO mais adequado para diferentes propósitos da calibração (vazões de pico, vazões de estiagem, vazões médias, representação da sazonalidade, do volume total escoado);
- Identificar conjunto de FO mais adequado para rios intermitentes;
- Avaliar o benefício da abordagem do fracionamento do hidrograma para fins de calibração do modelo hidrológico;
- Avaliar a abordagem de calibração por período do ano para fins de aplicação em regiões semiáridas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está compartmentado em seis partes, de acordo com os elementos que são empregados na metodologia da pesquisa para alcançar os resultados desejados. Na primeira parte foi realizada uma conceituação de modelos hidrológicos distribuídos, dando ênfase às componentes básicas utilizadas na pesquisa. Na segunda parte foram abordadas as etapas de aplicação de modelo hidrológico. Na terceira e quarta parte do referencial aborda detalhamento sobre o modelo hidrológico utilizado neste estudo, as componentes que o constitui e o algoritmo usado na modelagem. Por fim, a quinta e sexta parte esclarece os tipos de calibrações e FO utilizadas na modelagem hidrológica.

### 2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA

Os modelos hidrológicos são representações matemáticas de processos físicos que descrevem o comportamento das bacias hidrográficas. Consiste em um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso da terra e para prever alterações futuras nos ecossistemas (SILVA et al., 2007). Os modelos desenvolvidos procuram responder às questões emergentes de cada época, dando ênfase aos processos hidrológicos mais representativos da realidade de bacias hidrográficas.

Atualmente, o modelo hidrológico é uma alternativa robusta e amplamente aceita, que pode representar processos hidrológicos usando equações de mecanismos físicos em diferentes escalas espaciais e temporais (ZHANG et al., 2016).

Modelos hidrológicos são utilizados para: melhor entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia; dimensionamento e previsão de cenários hidrológicos de planejamento; análise de consistência e preenchimento de falhas nos dados observados; análise dos efeitos resultantes de modificação do uso do solo na bacia, e previsão de variáveis hidrológicas (por exemplo, a vazão) em tempo real (TUCCI, 2005).

Os modelos hidrológicos distribuído são aqueles nos quais as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo (TUCCI, 2005). Procuram representar a variabilidade espacial das características hidrológicas através da subdivisão da bacia hidrográfica em diversas unidades menores (PAZ et al., 2011). Esses modelos distribuídos

necessariamente requerem uma quantidade bastante extensa e detalhada de informação sobre a bacia hidrográfica de modo a realizar uma boa parametrização do modelo.

Atualmente existe uma gama de modelos hidrológicos que são aplicados para simulação e previsão de diversos cenários e sistemas hídricos baseados principalmente em estruturas conceituais ou físicas, discretizados desde níveis de sub-bacias, regiões hidrologicamente homogêneas até células associadas a características topográficas, principalmente.

## 2.2 ETAPAS DE APLICAÇÃO

Para a aplicação de um modelo hidrológico é necessário primeiramente definir o objetivo do estudo, pois a escolha de um determinado tipo de modelo hidrológico deve ser feita com base na aplicação que se deseja, nas características da bacia e do rio e na disponibilidade de dados básicos. Ao escolher o modelo que melhor atenda os objetivos inicia-se a simulação, que se trata do processo de utilização do modelo. Há duas escolhas mais importantes a serem feitas, a primeira são as FO a serem utilizadas, e a segunda são os parâmetros para a calibração e suas escalas, quando se trata de modelos calibráveis.

Segundo Tucci (2005), na simulação existem, em geral, três fases que são classificadas como estimativa ou ajuste (calibração), verificação (validação) e previsão. A estimativa é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados; a verificação é a simulação do modelo com os parâmetros estimados onde se verifica a validade do ajuste realizado; e previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para a quantificação de sua resposta a diferentes entradas.

A validação ou verificação é a fase da simulação em que o modelo calibrado é verificado com outros dados. Por exemplo, no ajuste ou calibração os dados registrados da saída são usados para determinar os parâmetros. Na validação, os dados de saída são utilizados somente para observar se o modelo, com os parâmetros anteriormente ajustados, simula o sistema adequadamente (TUCCI, 2005).

Embora alguns parâmetros possam ser derivados diretamente do conhecimento das características físicas das bacias hidrográficas, outros devem ser ajustados para obter simulações aceitáveis de vazões observadas (HUGUE et al., 2000). Segundo Wagener et al.

(2004), a quantidade de dados parece depender da complexidade do modelo (em termos do número de parâmetros a ser estimados) e da qualidade e características dos dados.

Segundo Tucci (2005), a validação é a fase da simulação em que o modelo calibrado é verificado com outros dados. No ajuste os dados registrados da saída são usados para determinar os parâmetros. Na validação, os dados de saída são utilizados somente para observar se o modelo, com os parâmetros anteriormente ajustados, simula o sistema adequadamente. É importante destacar que a verificação deve ser realizada principalmente para a faixa de valores de saída que o modelo utiliza durante a previsão.

De maneira geral, os modelos hidrológicos são calibrados com dados de um período de tempo e verificados com dados de outro período. Segundo Romanowicz et al. (2013), outra escolha importante a ser feita é a seleção de períodos de tempo para a calibração. É geralmente assumido que quanto maior o período melhor. A qualidade dos resultados obtidos no processo de calibração depende da representatividade dos períodos usados no ajuste e na verificação (TUCCI, 2005).

Com relação à qualidade e representatividade dos dados utilizados na calibração, dois aspectos devem ser verificados: o período de dados deve apresentar suficiente variabilidade no comportamento hidrológico da bacia, para que os diferentes processos sejam corretamente representados pelo modelo hidrológico; e a presença de erros na medição dos dados.

### 2.3 MODELO MGB – IPH

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH foi desenvolvido para simular o processo de transformação da chuva em vazão em grandes bacias hidrográficas (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al. 2007). O modelo é composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; escoamento na rede de drenagem.

A versão original do modelo adota uma subdivisão da bacia hidrográfica em elementos regulares (células quadradas), de cerca de 10 x 10 km, interconectadas entre si por canais de drenagem (Figura 1A) (COLLISCHONN e TUCCI, 2001). Cada célula da grade é dividida em unidades de resposta hidrológica (URH) ou blocos, sem considerar a localização dentro da célula (Figura 1B), mas que permite levar em conta a variabilidade das

características físicas da bacia no interior de cada célula (FELIX e PAZ, 2016). A definição das URHs é função da combinação das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo. Cada URH é caracterizada por uma série de parâmetros, como o armazenamento máximo no solo e o índice de área foliar da vegetação.

A etapa de divisão da área de estudo em unidades menores é denominada discretização da bacia hidrográfica (Figura 1A) considerada uma fase fundamental da aplicação de um modelo hidrológico distribuído.

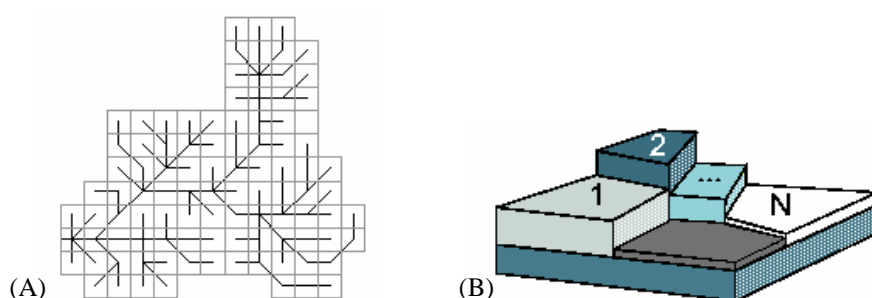


Figura 1 – (A) Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem; (B) Divisão esquemática de N blocos de uso/tipo de solo em uma célula do modelo.

(Fonte: COLLISCHONN, 2001 e COLLISCHONN e TUCCI, 2001)

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. O balanço de armazenamento no solo é realizado de maneira independente para cada URH. Os escoamentos resultantes de todas as URH em uma célula são somados e armazenados em reservatórios distintos conforme sua natureza superficial, subsuperficial e subterrânea. Um reservatório linear simples é utilizado para simular o aporte de cada um desses tipos de escoamento gerado na célula até a rede de drenagem (FELIX e PAZ, 2016).

A propagação pela rede de drenagem é representada através do método Muskingum-Cunge, na forma descrita por Tucci (1998). A evaporação do reservatório de interceptação e a evapotranspiração das diferentes coberturas vegetais são calculadas separadamente, utilizando a formulação de Penman-Monteith conforme descrito em Collischonn (2001).

Dois são os tipos de parâmetros utilizados no modelo: fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos, relacionados à vegetação, ou que não

interferem profundamente nos resultados, tais como, albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal. Entretanto os parâmetros calibráveis são alterados a cada aplicação do modelo, com o intuito de obter o bom ajuste entre o hidrograma observado e o calculado, dentre eles armazenamento de água no solo ( $W_m$ ), parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo ( $b$ ), parâmetro de drenagem subsuperficial ( $K_{int}$ ), parâmetro de escoamento subterrâneo ( $K_{bas}$ ), parâmetro para calibração da propagação superficial nas células ( $C_s$ ) e o parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células ( $C_i$ ).

O algoritmo de otimização multiobjetivo MOCOM-UA (*Multiple Objective Complex Evolution* - Universidade do Arizona) (YAPO et al., 1998) empregado no modelo, considerando três funções-objetivo: erro de volume ( $\Delta V$ ), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões e o mesmo coeficiente para o logaritmo das vazões (NSlog).

O modelo foi aplicado a diversos estudos de bacias da América do Sul (COLLISCHONN et al., 2007; GETIRANA et al., 2011; PAIVA, COLLISCHONN e BUARQUE, 2013; PAIVA et al., 2013), apresentando resultados bastante satisfatórios em suas aplicações. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada em Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007).

Felix (2015) e Felix e Paz (2016) fizeram uma aplicação do modelo MGB-IPH à bacia hidrográfica do Rio Piancó localizada na região semiárida do estado da Paraíba com área total de 4603,39 km<sup>2</sup>. No qual foi analisado o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais dos processos hidrológicos. O modelo foi rodado com passo de tempo diário, em um período de 42 anos (1970 a 2011), sendo definidos dois períodos de 21 anos utilizados para calibração e validação. Foi calibrado de forma manual e automática com algoritmo de otimização multiobjetivo.

O desempenho do modelo foi avaliado por meio de comparação de hidrogramas, análise de dispersão e através de medidas de desempenho entre as vazões observadas e calculadas. As métricas usadas foram: erro de volume ( $\Delta V$ ), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe para o logaritmo das vazões (NSlog), coeficiente de correlação (R), o erro médio absoluto (EMA), raiz do erro médio quadrático (REMQ), NS com a média do calendário Diário (NSD) e o coeficiente de eficiência volumétrica (EV) (Tabela 1).

No geral, os hidrograma de vazão (Figura 2) foram bem representados para passo de tempo a nível diário, apesar do fato que em passo de tempo diário há maior variabilidade da chuva, das vazões, com isso há mais incertezas nos dados. Na Figura 3 pode ser observado a dispersão dos dados vazões observadas e calculadas, não apresentando muita discrepância entre as vazões calculadas e observadas. Sobretudo, o autor menciona que o modelo MGB-IPH foi bem ajustado quanto à reprodução do regime hidrológico do rio Piancó, de acordo com os resultados constatou que o modelo aplicado representou satisfatoriamente o regime de vazão.

Tabela 1 - Estatísticas a nível diário na calibração manual e automática

Tipo de calibração	NS	NSlog	$\Delta V\%$	R	EMAm <sup>3</sup> /s	REMQm <sup>3</sup> /s	VE	BE
Manual	0,7	-0,11	3,42	0,84	10,64	35,15	0,35	0,64
Automático	0,72	-0,34	0,86	0,85	10,01	33,97	0,39	0,66

(Fonte: Felix, 2015)

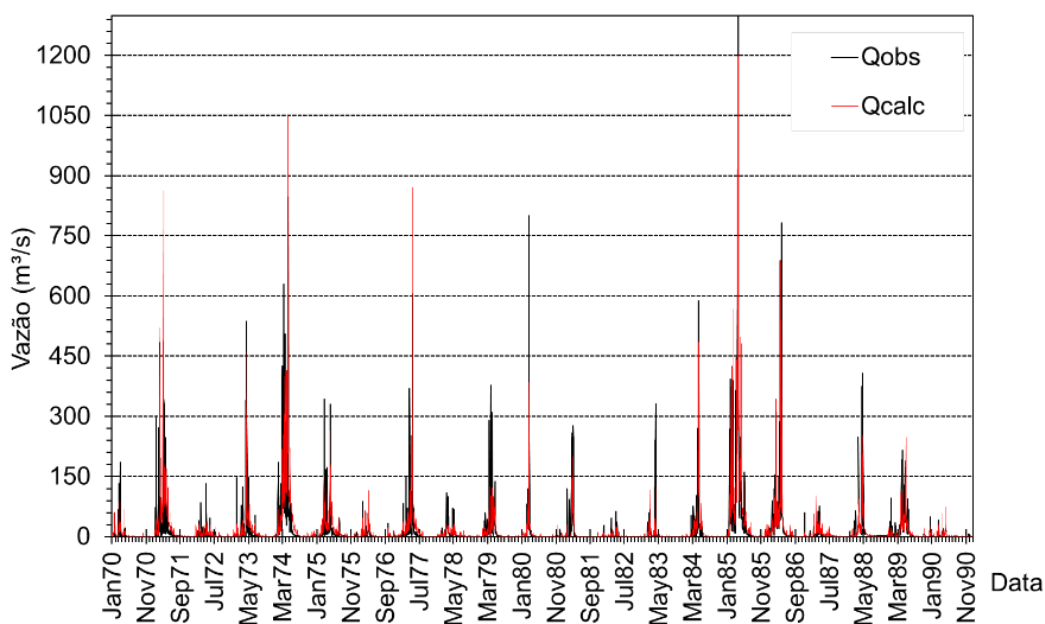


Figura 2 - Hidrograma de vazão na calibração automática período de 1970 a 1990.

(Fonte: FELIX, 2015)

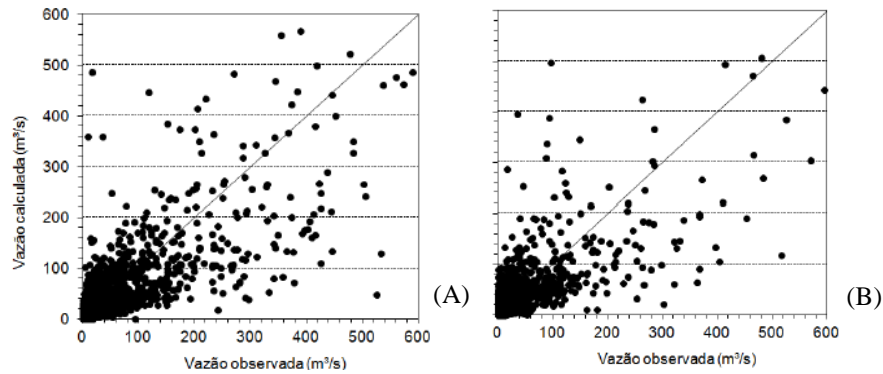


Figura 3 - Gráfico de dispersão das vazões observadas e calculadas na calibração automática: (A) calibração (B) Validação. (Fonte: FELIX, 2015)

De maneira geral, foi concluído no estudo mencionado anteriormente a aplicação do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH mostra potencial para modelagem de bacias de características semiáridas. Porém há necessidade de algumas considerações sobre o aspecto do tipo de rios da região, visto que a intermitências dos rios pode influenciar na boa representação do modelo.

#### 2.4 AJUSTE DE PARÂMETROS

Calibração refere-se ao processo de identificação dos parâmetros de um modelo (dados do modelo não mensuráveis) que produzam dados de saídas com combinações mais próximas do observado das características das bacias hidrográficas (MULETA, 2012). Ou seja, a calibração consiste num processo que ajusta os valores dos parâmetros de tal forma que a resposta do modelo se assemelhe da forma mais consistente ao comportamento do sistema real.

Pode ser feita de maneira manual, pelo método da tentativa e erro, ou automática, com o uso de algoritmos de otimização. No entanto, independentemente do método pretendido, o objetivo final de calibração é de desenvolver um modelo que simula os processos hidrológicos das bacias hidrográficas tão precisas quanto possível (MULETA, 2012).

### 2.4.1 Ajuste manual

A primeira técnica utilizada pelos hidrólogos para a determinação dos parâmetros, pela robustez e simplicidade, é o método da tentativa e erro. Esta é a abordagem tradicional e mais difundida para modelar também chamada de calibração “manual” (ou “expert”).

Corresponde ao ajuste dos valores dos parâmetros para melhorar a resposta do modelo, com base em uma inspeção visual dos hidrogramas observados e simulados (HUGUE et al., 2000). Essa técnica consiste em um processo iterativo, onde o usuário do modelo altera os valores dos parâmetros em cada simulação. Esse processo continua até que o usuário decida que o resultado encontrado é satisfatório na comparação entre os valores calculados e observados (BRAVO et al., 2009).

Segundo Collischonn e Tucci (2003), o ajuste manual é realizado por tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo e análises dos resultados. A cada tentativa o usuário analisa o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência.

Apesar de ser robusto e simples, a calibração manual depende essencialmente da habilidade do usuário. Além de entender o modelo, é preciso possuir uma habilidade para se encontrar uma solução por tentativa, mesmo que, implicitamente, sejam consideradas múltiplas métricas para a avaliação dos erros (ARAÚJO, 2013). Ou seja, requer uma compreensão abrangente do modelo, do sistema real e dos dados, para garantir resultados confiáveis.

Uma das grandes vantagens desse procedimento é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo. Porém, em função do grande número de vezes que os valores dos parâmetros devem ser modificados, essa abordagem pode não ser recomendada em modelos complexos que envolvem um grande número de parâmetros (EFSTRATIADIS e KOUTSYIANNIS, 2010).

Contudo, o critério para a escolha dos valores finais para os parâmetros não é bem definido. Alguns usuários utilizam como forma de avaliação a medida de erros por fórmulas matemáticas, no entanto a subjetividade desse tipo de calibração fica mais evidente com a utilização única da comparação visual dos hidrogramas (BASTIDAS et al., 2002). A falta de um critério mensurável de comparação e a utilização de critérios subjetivos que levam a

conjuntos de parâmetros diferentes por usuários diferentes podem ser apontadas como grandes deficiências da calibração manual.

Desse modo, a calibração manual pode se tornar um processo repetitivo e tedioso especialmente quando o modelo possui um grande número de parâmetros e o usuário é inexperiente (COLLISCHONN e TUCCI, 2001). Isto acontece porque pode ser difícil deduzir a lógica pela qual os parâmetros deveriam ser ajustados para melhorar a representação.

#### **2.4.2 Ajuste automático**

Durante as últimas três décadas, muitos estudos vêm sendo realizados considerando o desenvolvimento e adaptações de métodos automatizados para auxiliar o processo de calibração do modelo. Com o objetivo de tornar mais rápido e eficiente o processo de calibração, foram desenvolvidos algoritmos de otimização que se baseiam na utilização intensiva de computadores para a calibração automática de modelos hidrológicos.

As principais dificuldades destes métodos são (COLLISCHONN e TUCCI, 2003): (a) a função objetivo nem sempre retrata bem o ajuste desejado, apresentando anomalias na vizinhança da solução; (b) a solução pode convergir para parâmetros inconsistentes, já que existem infinitas soluções matematicamente possíveis, mas irreais do ponto de vista físico; (c) o mínimo obtido pode ser local e não global, pois depende muito do ponto de partida; (d) quando o número de parâmetros cresce muito, por exemplo quando se divide a bacia em um grande número de sub-bacias, e a série simulada envolve muitos intervalos de tempo, o processo pode ser lento e o usuário perde a noção do desejado ótimo; (e) quando existem muitas incertezas nos dados observados, as mesmas são transferidas para o ajuste, o que pode provocar resultados absurdos; (f) interdependência entre os parâmetros; (g) descontinuidade da função objetivo devido às características da estrutura do modelo.

O processo de calibração automática de modelos hidrológicos pode ser visto como um problema de otimização, no qual uma ou mais FO devem ser minimizadas ou maximizadas, estando sujeito a restrições impostas ao espaço de busca dos parâmetros do modelo (NASCIMENTO et al., 2009).

Em função da quantidade de FO utilizadas na calibração o processo pode ser chamado de mono-objetivo (uma única função objetivo) ou multiobjetivo (mais de uma função objetivo).

A abordagem automática mono-objetivo clássica, baseada na teoria de otimização, requer a definição de uma medida matemática (uma função objetivo) que controle as diferenças entre o hidrograma observado e calculado. Um algoritmo de otimização é então utilizado para ajustar os parâmetros para os valores que minimizam (ou maximizam) esta função (HOUGE et al., 2000).

De um modo geral, no processo de calibração são encontradas dificuldades relacionadas, principalmente, em se ajustar os parâmetros para representar as diferentes condições do sistema. Essas condições são geradas pelos múltiplos eventos que podem ser observados, bem como pela distribuição de diferentes pontos de medição ao longo da bacia. Reed et al. (2013) mostram que, nesta situação, os métodos de otimização mono-objetivo (de único objetivo) enfrentam dificuldades em encontrar um conjunto de parâmetros confiável para o problema. Uma das formas sugeridas para enfrentar esse tipo de dificuldade é empregar métodos multiobjetivo (KREBS et al., 2013). A utilização de várias FO passou a ser considerada simultaneamente no processo multiobjetivo, para considerar os diferentes eventos avaliados sem, no entanto, perder informações. (FORMIGA et al., 2016).

O uso de calibrações multiobjetivo busca suprir de modo eficiente e efetivo a calibração de modelos hidrológicos mais complexos (PARIS et al., 2011). Na calibração multiobjetivo, considera-se a otimização simultânea de mais de uma medida de desempenho, que resultará em vários conjuntos de parâmetros que irão constituir um conjunto de soluções ótimas (conjunto de Pareto) (ARAÚJO et al., 2013). Deste conjunto de soluções ótimas, espera-se, de forma apropriada, chegar-se a uma resposta desejada para o ajuste do modelo.

A principal característica de um problema de otimização multiobjetivo é que a solução, em geral, não é única. É comum existirem várias soluções tais que, ao se passar de uma solução para outra, a melhora no valor de uma função objetivo é acompanhada pela piora nos valores de pelo menos uma das outras funções. Torna-se necessário, pois, saber identificar dentre tais soluções aquelas que são mais adequadas para resolver o problema modelado, considerando a comparação dos valores das FO nessas soluções (ARAÚJO et al., 2013).

Segundo Bravo et al. (2009), na calibração multiobjetivo se apresentam dois tipos de soluções: 1) as soluções dominadas, com as quais são obtidos valores piores, em todas as FO, se comparadas às outras soluções; e 2) as soluções não dominadas ou ótimas de Pareto, com as quais são obtidos valores das FO que, comparados a todas as restantes soluções, serão melhores em uma ou mais FO e piores em outra ou outras. Deste conjunto de soluções ótimas, espera-se, de forma apropriada, chegar-se a uma resposta desejada para o ajuste dos parâmetros do modelo. O grupo de soluções não-dominadas é o alvo principal da calibração multiobjetivo.

O resultado final de uma calibração multiobjetivo não é apenas um, e sim vários conjuntos de parâmetros, que geram pontos no espaço das FO que estão sobre a curva ou superfície que se denomina Região de Pareto ou Curva de Pareto (COLLISCHONN e TUCCI, 2005). É sempre desejável uma aproximação que permita identificar o maior número de soluções não dominadas.

Bravo et al. (2009) explicam um exemplo simples de calibração multiobjetivo de um modelo teórico que possui dois parâmetros ( $\theta_1, \theta_2$ ), considerando a minimização de duas funções objetivo ( $F_I, F_{II}$ ), conforme mostra a Figura 4. Observa-se que a cada ponto no espaço dos parâmetros existe um correspondente no espaço das FO. O conjunto de parâmetros identificado pelo ponto B (espaço dos parâmetros) define o ótimo de  $F_I$  (ponto b no espaço das funções objetivo). Por sua vez, o conjunto de parâmetros A, diferente de B, define o ótimo de  $F_{II}$  (ponto a).

A curva (espaço das funções-objetivo) cujos extremos são os pontos a e b é a frente de Pareto e identifica todas as soluções não dominadas (por exemplo, c e d). As soluções não dominadas são definidas por conjuntos de parâmetros diferentes a A e B, e são identificados pela reta que liga os pontos A e B no espaço dos parâmetros. Observa-se ainda na Figura 4A que partindo desde o ponto a para o b, a melhora em uma função objetivo será contrabalançada pela deterioração na outra (BRAVO et al., 2009).

A frente de Pareto é composta por infinitos pontos. Dadas as características das funções-objetivos consideradas na calibração automática de modelos hidrológicos são utilizadas técnicas numéricas no processo (TUCCI, 1998). As técnicas numéricas definem uma aproximação da frente de Pareto. Essa aproximação da frente de Pareto trata de identificar o maior número de soluções não dominadas para que exista uma boa representação do mesmo (BRAVO et al., 2009).

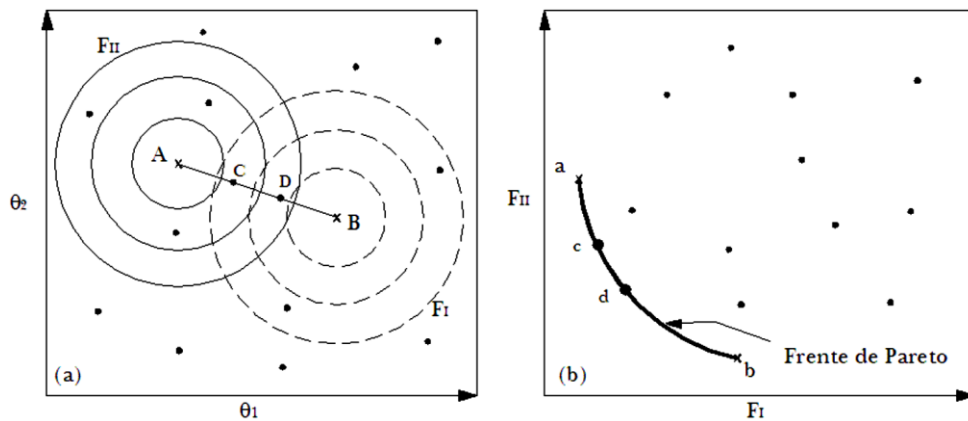


Figura 4 – Calibração multiobjetivo de um modelo teórico com dois parâmetros considerando a minimização de duas funções-objetivo. (a) Espaço dos parâmetros, (b) Espaço das funções-objetivo. (Fonte: BRAVO et al., 2009).

Um estudo interessante foi realizado por Zhang et al. (2016), no qual partiram da premissa de que a calibração tradicional do modelo hidrológico orientada pela magnitude das vazões era geralmente inadequada para captar bem todas as características dos regimes das vazões observadas. Os autores trazem uma abordagem sobre o método de calibração automática, em que foi simulado múltiplas métricas de regime de vazões simultaneamente, acoplando um modelo hidrológico distribuído, HEQM (*Distributed water system model*), com um algoritmo de otimização multiobjetivo igualmente ponderado.

O estudo compreende duas bacias hidrográficas do *Hexi Corridor*, sendo esta a mais representativa região semiárida do noroeste da China. Foram escolhidas 16 métricas como objetivos de otimização, que poderiam representar as principais características dos regimes de vazões. O desempenho do modelo foi comparado com o da calibração mono-objetivo.

Um dos resultados mostram que comparado com a calibração tradicional de um único objetivo, os desempenhos de simulação para os eventos de vazões baixas e alta foram melhoradas pela calibração multimétrica ou multiobjetivo, particularmente para as vazões de pico, mas o desempenho da simulação para o as vazões médias foram ligeiramente pioradas. Na Figura 5 mostra-se o gráfico de dispersão agregada entre séries simuladas e observadas tendeu para a linha 1:1 para os eventos de vazões baixas e altas. Os resultados de diferentes métodos de calibração são indicados por cores de símbolos: pontos vermelhos para a simulação usando calibração de objetivo único, pontos cinza para a simulação usando calibração multiobjetivo. A linha 1: 1 é mostrada como uma linha contínua.

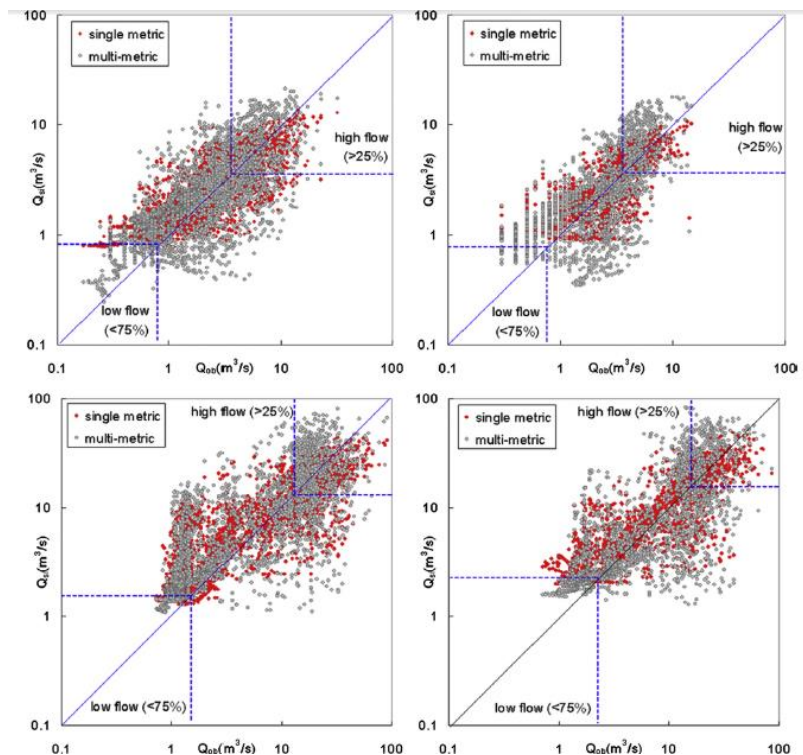


Figura 5 - Simulação versus observação de regimes de vazões diária baixo, médio e alto no período de calibração (esquerda) e validação (direita) nas estações Xiamentai (superior) e Jiutiaoling (inferior). (Fonte: ZHANG et al., 2016)

Concluíram-se que, a calibração multiobjetivo do modelo hidrológico foi mais eficaz para captar todas as características do regime de vazões do que os estudos existentes com base em um único critério. Diante dos resultados, a maioria das características do regime de vazões foram bem capturadas em comparação com a calibração de único objetivo, incluindo a magnitude de vazão baixa e alta, frequência e variação, duração e classificação. Através da calibração multiobjetivo, as precisões de simulação de todas as métricas de avaliação foram significativamente melhoradas e as variações nos eventos de vazão foram bem capturadas.

Em resumo, o acoplamento do modelo hidrológico com o algoritmo de calibração multiobjetivo pode capturar características gerais do regime de vazões para a gestão integrada da bacia hidrográfica.

## 2.5 ALGORITMO MOCOM-UA

Existem diversos algoritmos de otimização para realizar a calibração automática de modelos hidrológicos. Esses algoritmos são usualmente classificados em dois grupos, os de busca local e os chamados de busca global (Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing* e o *Shuffled Complex Evolution - SCE*) (NASCIMENTO et al., 2009).

O algoritmo de Yapo et al. (1998) é denominado MOCOM-UA (*Multiple Objective Complex Evolution* – Universidade do Arizona), este é uma versão desenvolvida a partir do algoritmo SCE-UA, adaptando-o para múltiplos objetivos. Baseado em técnicas de algoritmos genéticos e no algoritmo *simplex*.

Segundo Bravo et al. (2009), os algoritmos evolucionários são técnicas numéricas de otimização e busca inspirados em analogias com a natureza, as quais incluem, geralmente, o processo de evolução de seres vivos e o comportamento social de animais e insetos. Aquelas técnicas baseadas no processo de evolução de seres vivos seguem o princípio de seleção natural e sobrevivência do mais apto, introduzido por Charles Darwin.

Os algoritmos genéticos constituem uma das mais conhecidas classes de algoritmos evolucionários. Os algoritmos genéticos são baseados em uma população de cromossomos, desenvolvendo sua fonte de diversificação através de operadores de cruzamento e mutações aleatórias. No contexto computacional, "evolução" é entendida como um método de busca dentro de um espaço de soluções viáveis. Os operadores de cruzamento são uma forma de recombinar informações contidas nos cromossomos dos pais, produzindo filhos que representam novos pontos no espaço de busca (GOLDBARG et al., 2005).

O algoritmo MOCOM-UA procura otimizar todas as FO ao mesmo tempo, através de um procedimento de classificação das soluções por critérios de dominância e não dominância, descritos em Collischonn e Tucci (2001). Através desta busca simultânea e do procedimento de classificação, o algoritmo MOCOM-UA torna-se mais eficiente do que o uso de um método de otimização monobjetivo, como o proposto por Madsen (2000).

Segundo Collischonn (2001), o algoritmo MOCOM-UA inicia com a definição dos limites mínimos e máximos dos valores que os  $n$  parâmetros a serem calibrados podem tomar, definindo uma região no espaço de  $n$  dimensões. A seguir, são gerados, aleatoriamente,  $ns$  conjuntos de parâmetros ou pontos na região válida. Cada ponto é dado

pelos valores dos  $n$  parâmetros e, para cada um dos pontos, as  $nf$  FO são avaliadas, gerando uma matriz de resultados  $F(ns, nf)$ .

Uma vez obtidos os valores das FO, os conjuntos de parâmetros são avaliados e hierarquizados pelos critérios de dominância e não dominância. A hierarquização é realizada seguindo os passos a seguir (COLLISCHONN, 2001):

1. Toma-se os  $ns$  pontos ou conjuntos e identifica-se aqueles que são dominados e os que são não dominados.
2. Aos pontos que são não dominados atribui-se o índice 1.
3. Os pontos com o índice 1 são retirados e os pontos restantes são novamente analisados.
4. Aos pontos que são não dominados nesta segunda análise, atribui-se o índice 2.
5. Os pontos com o índice 2 também são retirados e os pontos restantes são analisados.
6. Os passos se repetem até que se encontre um grupo de pontos em que não podem ser definidos dominados e não dominados. Estes pontos recebem o índice MAXR, onde MAXR é o número de passos necessários para não existir mais dominância entre os pontos.

A etapa de hierarquização resulta na classificação dos pontos em relação à região de Pareto, para cada ponto tem um índice, que indica, aproximadamente a qualidade relativa das FO associadas. Quanto mais baixo o valor do índice, mais próximo o ponto está da região de Pareto. Por se tratar de um algoritmo genético, o MOCOM-UA realiza evolução dos pontos ocorrendo gerando NRmax simplex, sendo este o número de pontos que recebem o pior índice durante a hierarquização. Cada simplex é constituído por  $n+1$  pontos, sendo um deles retirado do grupo de NRmax pontos com o pior índice, e os outros  $n$  selecionados aleatoriamente dos pontos restantes, de acordo com a probabilidade associada a cada ponto (COLLISCHONN, 2001; COSTA, 2014), dada pela equação 01, e com reposição.

$$p_i = \frac{(R_{max} - r_i + 1)}{\sum_{j=1}^{ns} (R_{max} - r_j + 1)} \quad (01)$$

Onde  $p_i$  é a probabilidade associada a cada ponto e  $r_i$  é o índice atribuído a cada ponto durante a hierarquização e Rmax é o pior índice encontrado no conjunto. Esta equação apenas atribui uma probabilidade para cada ponto em relação à sua participação na evolução.

De forma semelhante ao algoritmo SCE-UA, a evolução dos complexos é efetivada pela metodologia simplex de Nelder e Mead (1965), porém com vários objetivos. Cada complexo evolui uma única vez, gerando NRmax novos pontos que substituem os NRmax piores pontos anteriores. A seguir, os pontos são novamente analisados e hierarquizados, e o processo se repete, até que, na etapa de hierarquização, todos os pontos recebam o mesmo índice, ou seja, não é possível definir pontos melhores ou piores. Nesta situação, normalmente, deverá ter sido encontrada uma boa amostra de pontos sobre a região de Pareto (COLLISCHONN, 2001).

Depois da etapa de calibração, há um conjunto de soluções ótimas que o usuário do modelo pode escolher entre uma das soluções com base em algum critério pessoal (BOYLE et al., 2000). Também pode-se utilizar todas ou várias delas para, obter uma amostra de vazões em cada intervalo de tempo, através de sucessivas aplicações do modelo, e definir uma faixa de incerteza dos resultados com relação aos parâmetros do modelo (GUPTA et al., 1998; COLLISCHONN, 2001).

## 2.6 FUNÇÕES OBJETIVO

Os critérios de eficiência ou funções objetivos (FO) são definidos como medidas matemáticas de quão bem uma simulação do modelo se adapta às observações disponíveis (BEVEN, 2001). Em outras palavras, entende-se por função objetivo a representação matemática dos desvios. Essas funções devem buscar medir as discrepâncias entre o hidrograma calculado pelo modelo e o hidrograma observado para que possa ser minimizada, tendo em vista que o objetivo é aproximar o máximo possível os dois hidrogramas.

Muleta (2012) afirma que as funções objetivo são determinadas seguindo da escolha dos métodos de otimização, o que depende da definição do problema. Além de descrever o quanto a simulação do modelo se ajusta aos dados observados, um ou mais critérios de eficiência também são utilizados como funções objetivo durante a calibração automatizada para ajudar a identificar os conjuntos de parâmetros ótimos.

Em geral, muitos critérios de eficiência ou FO contêm uma soma do termo de erro (diferença entre a variável simulada e a variável observada em cada etapa de tempo) normalizada por uma medida da variabilidade nas observações. Para evitar o cancelamento de erros de sinal oposto, a soma dos erros absolutos ou quadrados é frequentemente utilizada

para muitos critérios de eficiência. Como resultado, uma ênfase é colocada em erros maiores, enquanto erros menores tendem a ser negligenciados (KRAUSE et al., 2005).

Moriasi et al. (2007) argumentam que as medidas sem dimensão (ex.:  $r^2$ , NS, etc.) não devem ser utilizadas exclusivamente. Ou seja, ao relatar os resultados de uma investigação, tanto as formas (funções objetivo) adimensionais como as dimensionais devem ser apresentadas.

É relevante ressaltar que estatísticas dimensionais permitem que o significado hidrológico possa ser quantificado e avaliado (MCCUEN, 2016), e a dependência de escala das formas dimensionais pode evidenciar uma avaliação intimamente ligada, por exemplo, ao porte do rio apresentando significado hidrológico importante ao estudo. Segundo Moriasi et al. (2007), as métricas dimensionais são valiosas porque indicam o erro nas unidades (ou unidades ao quadrado) do componente de interesse, o que ajuda na análise dos resultados.

A literatura apresenta várias sugestões de FO, algumas focadas mais nos picos do hidrograma, outras nas vazões mínimas, outras na forma de ascensão ou recessão do hidrograma etc. Gupta et al. (1998) apresentam um conjunto de nove funções objetivo utilizadas pelo *National Weather Service* para a calibração do modelo chuva-vazão SAC-SMA.

A seleção das funções objetivo mais apropriadas para a calibração de modelos hidrológicos tem sido muito discutida na literatura (GUPTA et al., 1998; KRAUSE et al., 2005; MORIASI et al., 2007). Várias estatísticas foram desenvolvidas nas últimas décadas para avaliar o desempenho do modelo hidrológico e calibrar os parâmetros do modelo hidrológico.

Na região semiárida do estado do Ceará, Nascimento et al. (2009) realizaram um estudo que avalia o algoritmo evolutivo Mopso na calibração multiobjetivo do modelo SMAP em 21 sub bacias hidrográficas. Investigando a influência da seleção das FO na definição do conjunto de parâmetros do modelo, mostraram claramente a importância e sensibilidade da escolha das FO nos resultados da calibração, justificando a utilização de uma abordagem multiobjetivo.

Porém, em mais de uma década de investigação não foi provado que qualquer função objetivo específica é mais adequada para a calibração do que qualquer outra (GUPTA et al., 1998). Yapo et al. (1998) também mencionam que as FO não são comensuráveis, ou seja, não é possível determinar objetivamente qual das soluções é a melhor. Entretanto, pesquisas

continuam sendo desenvolvidas avaliando a eficiência de diferentes funções objetivo, já utilizadas ou com novas proposições. A seguir são descritas algumas FO utilizadas na literatura para modelos hidrológicos, agrupadas por semelhança e resumidas na Tabela 2.

### **2.6.1 Coeficiente de correlação (R) e Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>)**

O coeficiente de correlação (R) é uma medida da intensidade ou do grau de associação entre as variáveis analisadas (Eq.1 na Tabela 2). O método estatístico para cálculo do coeficiente de correlação foi estabelecido por Karl Pearson, em 1896.

O coeficiente de correlação (R) é igual à raiz quadrada do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). O R<sup>2</sup> é sempre positivo, enquanto que r pode admitir valores negativos e positivos, variando de -1 a 1.

O R<sup>2</sup> também pode ser expresso como a relação entre o quadrado da covariância pela multiplicação dos desvios padrões dos valores observados e calculados (Eq.2 na Tabela 2). A variação de R<sup>2</sup> situa-se entre 0 e 1 e tal coeficiente descreve quanto da dispersão observada é explicada pela calculada. Um valor de zero significa que não há correlação em todos os passos, e um valor de 1 significa que a dispersão da calculada é igual à da observação (KRAUSE et al., 2005).

Apesar de serem métricas muito utilizadas na modelagem hidrológica, o fato é que apenas a dispersão é quantificada sendo esta uma das principais desvantagens de R<sup>2</sup>, se for considerado sozinho. Um modelo que sistematicamente super ou subestima todo o tempo ainda vai resultar em bons valores de R<sup>2</sup>, perto de 1, mesmo se todas as previsões estejam erradas. Se R<sup>2</sup> for utilizado para validação de modelos, é aconselhável ter em conta informação adicional que pode lidar com esse problema (KRAUSE et al., 2005).

Ambas as métricas citadas são consideradas algumas das estatísticas mais sensíveis a valores extremos e muito pouco sensíveis a diferenças proporcionais entre séries observadas e calculadas (LEGATES e MCCABE, 1999), devido aos valores quadrados das diferenças, observadas e calculadas.

### **2.6.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), NS para o logaritmo das vazões (NSlog) e Forma Modificada de NS (NSabs)**

A eficiência NS proposta por Nash e Sutcliffe (1970) está definida como um menos a relação das diferenças relativas absolutas, observados e calculados, normalizados pela variação absoluta dos valores observados durante o período de investigação, conforme expõe a Eq.3 na Tabela 2. Varia de 1 (ajuste perfeito) a  $-\infty$ . Uma eficiência menor que zero indica que o valor médio da série temporal teria sido uma melhor previsão do que o modelo (KRAUSE et al., 2005), ou seja, se o quadrado das diferenças entre estimativas do modelo e as observações é tão grande como a variabilidade nos dados observados, então  $NS = 0$ , e se for superior a isso, então  $NS < 0,0$  (LEGADOS e MCCABE, 1999).

A maior desvantagem da eficiência NS é o fato de as diferenças entre os valores observados e simulados serem calculados como valores quadrados. Como resultado valores maiores em uma série temporal são fortemente supervalorizados enquanto os valores mais baixos são negligenciados (LEGADOS e MCCABE, 1999). Para a quantificação das previsões de vazões isso leva a uma superestimação do desempenho do modelo durante as vazões de pico e uma subestimação durante condições de baixas vazões (KRAUSE et al., 2005). Semelhante a  $r^2$ , o Nash-Sutcliffe não é muito sensível durante períodos de baixas vazões.

Para reduzir o problema das diferenças ao quadrado e a sensibilidade resultante para valores extremos, o NS para o logaritmo das vazões (NSlog) é frequentemente calculado com os valores logarítmicos das vazões observadas e calculadas (Eq.4 na Tabela 2). Através da transformação logarítmica os valores das vazões de picos são achatados e as vazões baixas são mantidas mais ou menos ao mesmo nível. Como resultado, a influência dos valores das vazões baixas é aumentada em comparação com os picos de cheia, resultando em um aumento da sensibilidade do NSlog em super ou subestimar (KRAUSE et al., 2005).

A forma modificada de NS (NSabs) foi proposta por Krause et al. (2005) e citada por Muleta (2012). Essa métrica expressa a relação das diferenças relativas absolutas, entre valores observados e calculados, normalizadas pela variabilidade absoluta dos valores observados durante o período de investigação (Eq.5 na Tabela 2). A forma modificada é mais significativamente sensível a super ou subestimação do que as formas quadradas (MULETA, 2012). Em seus estudos Krause et al. (2005) verificaram que NSabs possui

correlações lineares com NS e D (Coeficiente de concordância, item 2.6.5), mas também com NSlog, Muleta (2012) ressalta que o NSabs é um critério de eficiência mais robusto para relatar os resultados de um modelo do que os outros mencionados, e possui sensibilidade tanto para as vazões baixas como para as vazões altas.

### **2.6.3 NS com a Média do Calendário Diário (NSD), NS com a Média do Calendário Diário calculado a partir de valores logarítmicos (NSDlog) e Forma Modificada de NS com a Média do Calendário Diário (NSDabs)**

Uma das principais limitações de NS é a utilização da média de todos os dados observados. Vários estudos, incluindo Schaepli e Gupta (2007), Krause et al. (2005) e Muleta et al. (2012), sugeriram modelos alternativos. Consequentemente, a formulação NS foi modificada para testar o efeito da utilização da média diária do calendário interanual como modelo de referência, o NSD (Eq.6 na Tabela 2). A premissa de usar a média do calendário diário como um modelo de referência seria uma melhor previsão de vazão de referência no local para aquele dia de calendário específico do ano do que a média de observações utilizada no NS. Desse modo, o NSD é similar ao NS, porém mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar a média histórica de vazões em cada dia do calendário. Varia entre  $-\infty$  e 1, com valor ótimo quando igual a 1.

O NSDlog é semelhante ao NSlog utilizando o logaritmo das vazões para minimizar o quadrado das diferenças (Eq.7 na Tabela 2), consequentemente colocando maior ênfase nas vazões com valores mais baixos do hidrograma, com a mesma amplitude de variação do NS e NSD. Segundo Muleta (2012), o NSlog e o NSDlog são altamente sensíveis a baixas vazões, por isso a imprecisão na estimativa de baixas vazões pode deteriorar significativamente tais métricas.

O NSDabs aborda uma forma modificada de NSD, por representar a relação das diferenças relativas absolutas, entre valores observados e calculados, normalizadas pela variabilidade absoluta dos valores observados considerando a média histórica de vazões em cada dia do calendário (Eq.8 na Tabela 2). Muleta (2012) menciona que assim como NSabs, esta forma modificada descreve melhor o desempenho de modelos hidrológicos visto que ela mais uniformemente sensível a ambas baixas e altas vazões, o NSD na sua forma absoluta tende a ser uma estatística mais rigorosa quando comparada ao NS.

#### **2.6.4 Coeficiente de Eficiência de Referência (NSM) e Índice de Persistência do Modelo (EPM)**

O coeficiente de eficiência de referência (NSM – *Normalized Benchmark Efficiency*) proposto por Schaepli e Gupta (2007) e usado por Getirana et al. (2011) e Felix e Paz (2016), é uma métrica utilizada como forma alternativa de avaliação ao coeficiente NS (ver Eq.9 na Tabela 2). É similar ao NS e NSD, porém mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar um modelo de referência, deixando a critério do modelador definir seu modelo de referência (sejam vazões médias diárias, mensais, anuais, etc). Varia de  $-\infty$  a 1, sendo tanto melhor quanto mais próximo de 1. Essa opção traz um refinamento ao que se define como meta da simulação (GETIRANA et al., 2011).

Segundo Bennett et al. (2013) o índice de persistência é semelhante ao NS, mas em vez de utilizar a média como variável preditora, utiliza o valor observado anterior como preditor e é, portanto, adequado em um contexto de previsão. EPM é um teste mais poderoso de desempenho do modelo do que a estatística NS, pois mede a magnitude relativa da variância residual (ruído) para a variância dos erros obtidos através da utilização de um simples modelo de persistência (Eq.10 na Tabela 2). O desempenho em termos de EPM tende a ser melhor para os anos mais chuvosos do que para os anos de seca. O valor ótimo é 1, e os valores devem ser maiores do que 0 para indicar o desempenho minimamente aceitável (GUPTA et al.,1999).

O modelo de persistência simples representa uma situação de “informação mínima”, o qual assume que a melhor estimativa das vazões no próximo passo de tempo é dada pela vazão observada no passo de tempo atual. Claramente, se um modelo chuva-vazão tem um erro de previsão um passo à frente que é maior do que o previsto pelo modelo de persistência simples (ou seja,  $EPM < 0$ ), a sua aptidão para a previsão de vazões deve ser questionada (GUPTA et al.,1999).

#### **2.6.5 Reprodução das Vazões Elevadas (HF), Índice de Concordância (D) e Eficiência Kling-Gupta (EKG)**

A métrica denominada reprodução das vazões elevadas (HF) proposto por Rwetabula et al. (2012) representa uma forma modificada de avaliar a eficiência de um modelo que

verifica a capacidade do modelo em reproduzir as vazões elevadas (Eq.11 na Tabela 2). O HF faz relação com a variabilidade das vazões observadas, sendo sensível a valores extremos devido às diferenças dos quadrados. Variando de  $-\infty$  a 1, com valor ótimo quanto mais próximo de 1.

O índice de concordância (D) foi proposto por Willmot (1981) para superar a sensibilidade de NS e  $r^2$  para as diferenças nas médias e nas variâncias observadas e calculadas (MULETA, 2012). O índice de concordância representa a relação entre o erro quadrado médio e o erro potencial (WILLMOTT, 1984 *apud* MORIASI et al., 2007), ou seja, corresponde a uma medida normalizada do grau de erro de previsão do modelo (Eq.12 na Tabela 2).

A presença do erro quadrático médio no numerador da formulação atribui maior a sensibilidade aos valores altos, negligenciando as condições de vazões mínimas (KRAUSE et al., 2005). E o erro potencial no denominador representa o maior valor que a diferença dos quadrados de cada par pode atingir. O intervalo de D é semelhante ao de  $r^2$  e situa-se entre 0 (nenhuma correlação) e 1 (ajuste perfeito). Tal como acontece com o NS, o índice de concordância (D) representa uma melhoria decisiva sobre o coeficiente de determinação, mas também sofre de hipersensibilidade aos valores de vazões extremas (LEGADOS e MCCABE, 1999).

Proposto por Gupta et al. (2009), a eficiência Kling-Gupta (EKG) trata-se de uma decomposição da eficiência de Nash-Sutcliffe, que facilita a análise da importância relativa dos seus diferentes componentes (correlação, tendência e variabilidade) no contexto de modelagem hidrológica (Eq.15 na Tabela 2). Este índice pode variar entre  $-\infty$  e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais acurácia possui o modelo. Segundo Pechlivanidis et al. (2012), esta métrica vê o problema de calibração a partir de uma perspectiva multiobjetivo, centrando-se sobre a correlação e o erro de variabilidade como critérios separados para ser otimizado.

#### **2.6.6 Erro Médio (EM), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Quadrático (EMQ) e Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (REMQ)**

O Erro Médio (EM) citado por Wolling et al. (2013) representa o erro entre a diferença dos valores observados e calculados, dividido pelo número total de passos de

tempo do período de investigação (Eq.16 na Tabela 2). Variação de  $-\infty$  a  $\infty$  sendo melhor quanto mais próximo de zero. O interessante desse tipo de erro é o fato de que no cálculo há compensação dos erros, dessa forma pode identificar se o modelo é mais tendencioso a superestimar ou subestimar as vazões.

Assim como o EM, o erro médio absoluto (EMA) por sua vez calcula o erro da diferença absoluta entre as vazões observadas e calculadas, dividido pelo número total de passos de tempo do período de investigação (Eq.17 na Tabela 2). O intervalo situa-se entre 0 a  $\infty$ , sendo tão melhor quanto mais próximo de zero. Esta é umas das funções objetivo mais utilizadas na modelagem hidrológica e descreve a diferença entre o modelo observado e calculado nas unidades da variável (LEGADOS e MCCABE, 1999). Possui vantagem sobre o EM por compensar os erros existentes para mais e para menos, dessa forma quantifica o erro total dos conjuntos de dados, porém não caracteriza se o modelo super ou subestima as vazões. Muleta et al. (2012) afirmam que EMA é eficiente quando utilizado como função objetivo para ambas as vazões baixas e elevadas.

Já o erro médio quadrático (EMQ) tenta diminuir as limitações do EM, pois elimina a compensação dos erros (Eq.18 na Tabela 2). Tem intervalo de variação semelhante ao EMA (entre 0 a  $\infty$ ), sendo melhor quanto mais próximo de zero. No entanto, possui desvantagem em relação ao EM e EMA por não reportar um resultado em unidades adequadas da variável, o que pode acarretar em análises equivocadas quanto ao significado hidrológico dos resultados.

Raiz quadrada do erro médio quadrático (REMQ) é uma das estatísticas de índice de erro comumente utilizada (WOLLING et al., 2013; ROMANOWICZ et al., 2013; DARIANE et al., 2016), ver Eq.19 na Tabela 2. O REMQ e o EMA são altamente correlacionados, em geral,  $REMQ \geq EMA$  para a faixa da maioria dos valores discrepantes, com intervalo de variação de 0 (valor ótimo) a  $\infty$  (LEGADOS e MCCABE, 1999). Embora seja geralmente aceito que quanto menor o REMQ melhor será o desempenho do modelo, autores como Singh et al. (2004) sugerem que valores de REMQ e EMA inferiores à metade do desvio padrão dos dados medidos podem ser considerados baixos, o que é adequado para avaliação do modelo.

Segundo Gupta et al. (1999), as funções objetivos que minimizem quadrado dos resíduos são sensíveis para as vazões altas e podem simular com mais precisão a estação

chuvosa. McCuen (2016) afirma que o REMQ é um indicador melhor da variação total geral do que o EMA.

### **2.6.7 Transformação da Raiz quadrada do erro médio quadrático (TREM), Razão entre REMQ e desvio padrão das observações (RSR), REMQ modificado para altas vazões (REMQAV) e REMQ modificado para baixas vazões (REMQBV)**

Transformação da raiz quadrada do erro médio quadrático (TREM) faz uma transformação simples das vazões em que se expande a extremidade inferior da escala das vazões (para um melhor destaque das recessões) e ainda mantém uma importância razoável para as vazões mais elevadas (KOLLAT et al., 2012), Eq.20 na Tabela 2. A transformação (BOX e COX, 1964) é obtida por:

$$\hat{Q} = \frac{(1 + Q)^\lambda - 1}{\lambda} \quad (02)$$

Onde  $\hat{Q}$  é a vazão transformada Box-Cox e  $\lambda=0.3$  (Nota: um valor de  $\lambda=0$  corresponde a uma transformação logarítmica, e  $\lambda=1$  equivale a nenhuma transformação. A transformação  $\lambda=0.3$  foi indicada após avaliar o efeito visual dos hidrogramas fornecido por uma ampla variedade de valores de  $\lambda$ ) (HOUGE et al., 2000; KOLLAT et al., 2012).

A razão entre REMQ e desvio padrão das observações (RSR) foi proposto por Moriasi et al. (2007), com base no argumento de Singh et al. (2004) mencionado anteriormente, em que propõem uma diretriz para qualificar o que é considerado um REMQ baixo baseado no desvio padrão das observações (Eq.21 na Tabela 2). O RSR padroniza REMQ usando o desvio padrão das observações, e combina um índice de erro e as informações adicionais recomendadas por Legados e McCabe (1999).

Segundo Moriasi et al. (2007), o RSR incorpora as vantagens das estatísticas de índice de erro e inclui um fator de escalonamento/normalização. RSR varia desde o valor ideal de 0, o que indica a variação do RMSE zero e, por conseguinte, a simulação do modelo perfeito, a um valor positivo que pode ir até  $\infty$ . Valores de  $RSR \leq 0,5$  são a classificação mais rigorosa e considerada como desempenho “muito bom”, valores entre  $0,5 < RSR \leq 0,6$

são considerados “bom”, considerados “satisfatório” quando valores estão entre  $0,6 < RSR \leq 0,7$ , e maiores que 0,7 são insatisfatórios (MORIASI et al., 2007).

O REMQ modificado para altas vazões, denominado  $REMQ_{AV}$ , proposto por Fenícia et al. (2007) e citado por Romanowicz et al. (2013), foi concebido para aumentar para aumentar sua sensibilidade nos erros nas vazões elevadas (Eq.22 na Tabela 2). O  $REMQ_{AV}$  tem mesmo intervalo de variação de REMQ de 0 a  $\infty$ , sendo também melhor quanto mais próximo de 0.

Também proposto por Fenícia et al. (2007) e citado por Romanowicz et al. (2013), o REMQ modificado para baixas vazões ( $REMQ_{BV}$ ) é uma modificação realizada para dar um peso mais forte nos erros das vazões baixas (Eq.23 na Tabela 2), com mesmo intervalo de variação e interpretação de valores de  $REMQ_{AV}$ .

### **2.6.8 Erro Máximo Absoluto Diário (EAm<sub>ax</sub>), Diferença Máxima entre as Maiores Vazões de Pico (DVP<sub>max</sub>) e Logaritmo dos Erros Quadrados (LOGQ)**

O erro máximo absoluto diário (EAm<sub>ax</sub>) representa a diferença absoluta máxima entre as vazões observadas e calculadas (Eq.24 na Tabela 2). É mais sensível aos valores extremos, e na verdade é uma medida de *worst-case* (JANSSEN e HEUBERGE, 1995), porque mede a maior discrepância entre os máximos. Os valores de EAm<sub>ax</sub> perto de zero indicam uma vazão de pico simulada perto do valor observado. Uma desvantagem dessa métrica é por ser sujeita a erro pontual.

A métrica denominada diferença máxima entre as maiores vazões de pico (DVP<sub>max</sub>) calcula a diferença relativa máxima entre as vazões observadas e calculadas (Eq.25 na Tabela 2). Diferentemente do EAm<sub>ax</sub>, o DVP<sub>max</sub> faz uma relação de atemporalidade, ou seja, não considera os erros entre as vazões observadas e calculadas nos mesmos instantes de tempo durante o período de investigação. Tal métrica é influenciada por erros nas vazões elevadas. DVP<sub>max</sub> e EAm<sub>ax</sub> são altamente correlacionados (WOLLING et al., 2013).

Já o logaritmo dos erros quadrados (LOGQ), segundo Houge et al. (2000), é uma função selecionada para a calibração de parâmetros que influenciam as recessões do hidrograma (zona de vazões mínimas), ver Eq.26 na Tabela 2. Expressa a soma dos erros quadrados diários para o logaritmo das vazões observadas e calculadas, com intervalo de 0 a  $\infty$ , com melhor valor quanto mais próximo de zero.

### **2.6.9 Erros Quadrados das Somas Mensais Normalizado pela Área da Bacia (SSEMQ) e Soma dos Erros Quadrados Diários (SSEQ)**

A soma dos erros quadrados das vazões mensais normalizada pela área da bacia (SSEMQ) e a soma dos erros quadrados das vazões diárias (SSEQ) estão incluídas como indicadores de erros de volume, sendo métricas altamente correlacionadas entre si (WOLLING et al., 2013), ver Eq.27 e Eq.28 na Tabela 2, respectivamente. Ambas variam de 0 a  $\infty$ , com melhor valor quanto mais próximo de zero. Os referidos autores ainda mencionam que SSEQ e SSEMQ são os critérios de calibração mais adequados para estudos de controle de barragens, uma vez que as simulações dos volumes de água durante eventos de inundação podem ser de maior importância do que a vazão de pico em si.

### **2.6.10 Erro relativo de volume ( $\Delta V$ ) e Coeficiente de eficiência volumétrica (EV)**

O erro relativo de volume ( $\Delta V$ ) é expresso como uma fração da descarga média observada (RWETABULA et al., 2012), comumente recomendada por quantificar erros no balanço hídrico. Também indica se o modelo é pobre em representatividade, pois descreve bem se as simulações de modelos superestimam ou subestimam as observações (MULETA, 2012), conforme Eq.29 na Tabela 2.

O valor ideal de  $\Delta V$  é de 0, indicando simulação do modelo exato. Valores de  $\Delta V$  no intervalo de  $\pm 5\%$  indica (muito) bom desempenho, enquanto erros dentro de um intervalo de  $\pm 10\%$  indicam um desempenho satisfatório (RIENTJES et al., 2013). Valor positivo indica uma superestimação, enquanto que um valor negativo representa uma subestimação (ZHANG et al., 2016).

Segundo Gupta et al. (1999),  $\Delta v$  mede a tendência média dos dados simulados para ser maior ou menor do que seus correspondentes observados. Valores de  $\Delta V$  tendem a variar mais, entre os diferentes métodos de calibração automática, e principalmente, mais durante os anos de seca do que durante anos chuvosos.

Criss e Winston (2008) propuseram o coeficiente de eficiência volumétrica (EV) para resolver as limitações de NS e suas modificações. Este expressa o erro absoluto entre as vazões observadas e calculadas, normalizado pela soma das vazões observadas (Eq.30 na Tabela 2). O coeficiente EV varia de 0 a 1 (valor ótimo) e procura avaliar o desvio entre

hidrogramas observado e calculado pela medição da área entre eles, expresso em termos de fração de volume de água escoado. Além de ser fácil de calcular, outro aspecto positivo do EV é tratar cada metro cúbico de água igual a qualquer outro metro cúbico, quer seja entregue durante recessão lenta ou durante as vazões de pico (CRISS e WINSTON, 2008).

### **2.6.11 Erro médio absoluto relativo (EMAR) e Erro Percentual do coeficiente de escoamento (ROCE)**

O Erro médio absoluto relativo (EMAR) representa a relação absoluta da diferença entre as vazões observadas e calculadas, normalizado pela soma das vazões observadas (Eq.31 na Tabela 2). Com intervalo de 0 a  $\infty$ , quanto mais próximo de zero for o valor deste coeficiente melhor o modelo representará a realidade, ou seja, menor a tendência nas estimativas e, além disso, serve também como indicativo se o modelo é pobre em representatividade (MORIASI et al., 2007). Liew et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação:  $EMAR < 10\%$  muito bom;  $10\% < EMAR < 15\%$  bom;  $15\% < EMAR < 25\%$  satisfatório, e  $EMAR > 25\%$  o modelo é inadequado. Uma desvantagem desta métrica é que pode resultar em valores altíssimos quando os valores observados são muito baixos.

O Erro percentual do coeficiente de escoamento (ROCE) considera o balanço hídrico, procurando minimizar o erro médio de coeficiente de escoamento anual (Eq.32 na Tabela 2). Tem intervalo de variação de 0 a  $\infty$ , com melhor valor quanto mais próximo de zero. Tal métrica representa a relação absoluta dos totais anuais das vazões observadas e calculadas menos um. A soma ocorre durante os anos 1 a Y do período de calibração, para o qual um valor médio anual é então calculado (KOLLAT et al., 2012).

### **2.6.12 Forma combinada de NS e $\Delta V$ (Y) e Forma combinada de NS e EMAR (RV)**

A medida de desempenho Y proposta por Akhtar et al. (2009) combina o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e o erro de volume relativo ( $\Delta V$ ), ver Eq.33 na Tabela 2. Rientjes et al. (2013) comentam que um conjunto de parâmetros pode indicar um bom ajuste para o coeficiente de NS, mas pode indicar um ajuste pobre para  $\Delta V$  e vice-versa. NS é selecionado para avaliar a qualidade do ajuste do hidrograma calculado e  $\Delta V$  é selecionado por indicar o erro de balanço hídrico. Para um desempenho do modelo adequado, a eficiência NS deve ser

perto de 1 e o valor  $\Delta V$  deve ser próximo de zero resultando em um valor  $Y$  próximo de 1 (AKHTAR et al., 2009). Quanto mais próximo de 1,  $Y$  indica um excelente desempenho do modelo, enquanto valores de  $Y$  inferiores a 0,6 indicam pobre desempenho do modelo, segundo Rientjes et al. (2013).

O critério RV proposto por Lindstrom et al. (1997) citado por Romanowicz et al. (2013) (Eq.34 na Tabela 2), expressa a diferença relativa entre o NS e o EMAR ponderado por  $w$ . Segundo Lindstrom et al. (1997) RV é um compromisso entre a eficiência tradicional NS e o erro de volume relativo EMAR. O novo critério RV provou ser bastante útil, uma vez que apresentou resultados quase tão altos de NS e praticamente nenhum erro de volume. Lindstrom et al. (1997) afirmam que os melhores resultados foram obtidos com  $w$  perto de 0,1 com aplicação do modelo hidrológico HBV. Essa métrica RV tem variação de  $-\infty$  a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor é o desempenho do modelo (DAKHLAOUI et al., 2012).

### **2.6.13 Declive da curva de permanência (DCPerm) e Fator da curva de permanência (FCPerm)**

Declive da curva de permanência (DCPerm) aborda a solução de resposta de uma bacia hidrográfica através da minimização do erro em simular a declividade da curva de permanência (ou curva de duração) (KOLLAT et al., 2012) em um trecho definido, ou seja, mede a semelhança da declividade das curvas de permanência observada e calculada (Eq.35 na Tabela 2). DCPerm variade 0 a  $\infty$ , sendo tão melhor quanto mais perto de zero.

O Fator da curva de permanência (FCPerm) citada por Tucci (2005), avalia a semelhança entre as curvas de permanência observadas e calculadas a partir do somatório das diferenças entre os pontos que definem tais curvas (Eq.36 na Tabela 2). FCPerm tem intervalo de variação de 0 a  $\infty$ , sendo tão melhor quanto mais perto de 1.

Tabela 2 – Algumas das funções objetivo utilizadas na calibração de modelos hidrológicos

Nº	NOME	SIGLA	FUNÇÕES OBJETIVO	VARIAÇÃO DE VALORES		VALOR ÓTIMO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIA
				Mín.	Máx.				
1	Coeficiente de Correlação	r	$\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)}) (Q_{cal(i)} - \bar{Q}_{cal(i)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - \bar{Q}_{cal(i)})^2}}$	-1	1	1	Adimensional	É uma medida da intensidade ou do grau de associação entre as variáveis analisadas.	Wohling et al. (2013)
2	Coeficiente de Determinação	r <sup>2</sup>	$\left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)}) (Q_{cal(i)} - \bar{Q}_{cal(i)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - \bar{Q}_{cal(i)})^2}} \right)^2$	0	1	1	Adimensional	É definida como o valor quadrado do coeficiente de correlação. Esta medida descreve o quão bem uma linha de regressão se encaixa um conjunto de dados.	Krause et al. (2005) e Romanowicz et al.(2013)
3	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe	NS	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)})^2}$	-∞	1	1	Adimensional	Está definido como um menos a soma das diferenças quadradas entre os valores previstos e observados normalizados pela variação dos valores observados durante o período de investigação.	Nash e Sutcliffe (1970) apud Krause et al. (2005)
4	Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o logaritmo das vazões	NS <sub>log</sub>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{cal(i)} - \log Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{obs(i)} - \log \bar{Q}_{obs(i)})^2}$	-∞	1	1	Adimensional	Expressa o NS em escala logarítmica. Para reduzir o problema das diferenças ao quadrado e a sensibilidade resultante para valores extremos.	Romanowicz et al.(2013) Krause et al. (2005)
5	Forma Modificada de NS	NS <sub>Abs</sub>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)} }{\sum_{i=1}^n  Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs(i)} }$	-∞	1	1	Adimensional	Expressa um menos a relação das diferenças relativas absolutas, observados e calculados, normalizados pela variação absoluta dos valores observados durante o período de investigação.	Krause et al. (2005) Muleta (2012)
6	NS com a média do calendário Diário	NSD	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_D)^2}$	0	1	1	Adimensional	É similar ao NS, porém mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar a média histórica de vazões em cada dia do calendário.	Muleta (2012)
7	NS com a média do calendário Diário calculado a partir de valores logarítmicos	NSD <sub>log</sub>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{cal(i)} + 0.001) - \ln(Q_{obs(i)} + 0.001))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs(i)} + 0.001) - \ln(\bar{Q}_D))^2}$	-∞	1	1	Adimensional	Expressa o NSD em escala logaritmo Natural (ln), considerando a média histórica de vazões em cada dia do calendário.	Muleta (2012)
8	Forma Modificada de NS com a média calendário Diário	NSD <sub>Abs</sub>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)} }{\sum_{i=1}^n  Q_{obs(i)} - \bar{Q}_D }$	-∞	1	1	Adimensional	Expressa um menos a relação das diferenças relativas absolutas, observados e calculados, normalizados pela variação absoluta dos valores observados considerando a média histórica de vazões em cada dia do calendário.	Muleta (2012)

Nº	NOME	SIGLA	FUNÇÕES OBJETIVO	VARIÇÃO DE VALORES		VALOR ÓTIMO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIA
				Min.	Máx.				
9	Coefficiente de eficiência de referência	NSM	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{ref(i)})^2}$	0	1	1	Adimensional	E similar ao NS, porém mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar um modelo de referência (diário, mensal ou anual).	Schaepli e Gupta (2007)
10	Eficiência na persistência do modelo	EPM	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{obs(i-1)})^2}$	0	1	1	Adimensional	Mede a magnitude relativa da variância residual (ruído) para a variância dos erros obtidos através da utilização de um simples modelo de persistência.	Gupta et al. (1999)
11	Reprodução das vazões elevadas	HF	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} + \overline{Q_{obs(i)}})(Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} + \overline{Q_{obs(i)}})(Q_{obs(i)} - \overline{Q_{obs(i)}})^2}$	$-\infty$	1	1	Adimensional	NS modificado para avaliar a capacidade do modelo a reproduzir as vazões elevadas.	Rwetabula et al. (2012)
12	Índice de Concordância	D	$1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2}{\sum_{i=1}^n ( Q_{cal(i)} - \overline{Q_{obs(i)}}  +  Q_{obs(i)} - \overline{Q_{obs(i)}} )^2} \right)$	0	1	1	Adimensional	O índice de concordância representa a relação entre o erro quadrado médio e o erro potencial.	Krause et al. (2005) Muleta (2012)
13	Variabilidade relativa das vazões diárias	$\alpha$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - \overline{Q_{cal(i)}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \overline{Q_{obs(i)}})^2}}$	0	$\infty$	1	Adimensional	Calcula a relação entre o desvio padrão das vazões calculadas, normalizado pelo desvio padrão das vazões observadas durante o período de investigação.	Gupta et al. (2009) Wohling et al. (2013)
14	Viés Normalizado das vazões diárias	$\beta$	$\frac{\overline{Q_{cal(i)}} - \overline{Q_{obs(i)}}}{\sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \overline{Q_{obs(i)}})^2}}$	$-\infty$	1	1	Adimensional	Calcula a relação entre a diferença relativa das médias das vazões, calculadas e observadas, normalizado pelo desvio padrão das vazões observadas durante o período de investigação.	Gupta et al. (2009) Wohling et al. (2013)
15	Eficiência Kling-Gupta	EKG	$1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + \left(\frac{\overline{Q_{cal(i)}}}{\overline{Q_{obs(i)}}} - 1\right)^2}$	$-\infty$	1	1	Adimensional	Trata-se de uma decomposição da NS, que facilita a análise da importância relativa dos seus diferentes componentes (correlação, tendência e variabilidade).	Gupta et al. (2009) Wohling et al. (2013)
16	Erro médio	EM	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})$	$-\infty$	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Representa a soma da diferença relativa diária, observado e calculado, dividido pelo número total de dias do período de investigação.	Wohling et al. (2013)
17	Erro médio absoluto	EMA	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)} $	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Representa o erro absoluto diário, observado e calculado, dividido pelo número total de dias do período de investigação.	Legates e McCabe (1999)
18	Erro médio quadrático	EMQ	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2$	0	$\infty$	0	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>	Expressa o erro médio quadrado, observado e calculado, dividido pelo número total de dias do período de investigação.	Legates e McCabe (1999)
19	Raiz quadrada do erro médio quadrático	REMQ	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2}$	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Representa a raiz quadrada dos erros médio quadrado, observado e calculado, dividido pelo número total de dias da série.	Romanowicz et al. (2013)
20	Transformação da REMQ	TREMQ	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Q}_{obs(i)} - \hat{Q}_{cal(i)})^2}$	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Trata-se de uma transformação nas vazões observadas e calculadas que dar mais ênfase as baixas vazões e diminui os erros de REMQ.	Houge et al. (2000) Kollat et al. (2012)

Nº	NOME	SIGLA	FUNÇÕES OBJETIVO	VARIÇÃO DE VALORES		VALOR ÓTIMO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIA
				Min.	Máx.				
21	Razão entre REMQ e desvio padrão das observações	RSR	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \bar{Q}_{obs})^2}}$	0	$\infty$	0	Adimensional	RSR é calculado como a razão entre o RMSE e desvio padrão dos dados observados.	Moriasi (2007) Muleta (2012)
22	REMQ modificado para altas vazões	REMQ <sub>AV</sub>	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2 * \left(\frac{Q_{obs(i)}}{Q_{obs(max)}}\right)^2}$	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Forma modificada de REMQ para dá um peso mais forte aos erros nos picos do hidrograma.	Fenicia et al. (2007) Romanowicz et al. (2013)
23	REMQ modificado para baixas vazões	REMQ <sub>BV</sub>	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2 * \left(\frac{Q_{obs(max)} - Q_{obs(i)}}{Q_{obs(max)}}\right)^2}$	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Forma modificada de REMQ para aumentar sensibilidade aos erros dentro dos valores de baixas vazões.	Fenicia et al. (2007) Romanowicz et al. (2013)
24	Erro absoluto máximo diário	EAMax	$\max  Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)} $	0	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Expressa a diferença absoluta máxima, observado e calculado.	Wohling et al. (2013)
25	Diferença máxima entre as maiores vazões de pico	DVPmax	$\max(Q_{obs(i)}) - \max(Q_{cal(i)})$	$-\infty$	$\infty$	0	m <sup>3</sup> /s	Expressa a diferença relativa máxima, observado e calculado.	Hall (2001) apud Wohling et al. (2013)
26	Logaritmo dos erros quadrados	LOGQ	$\sum_{i=1}^n (\log Q_{obs(i)} - \log Q_{cal(i)})^2$	0	$\infty$	0	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>	Expressa a soma dos erros logaritmos quadrados diários, observados e calculados.	Houge et al. (2000)
27	Erros quadrados das somas mensais normalizado pela área da bacia	SSE <sub>MQ</sub>	$\frac{\sum_{i=1}^n (mQ_{obs(j)} - mQ_{cal(j)})^2}{A}$	0	$\infty$	0	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Expressa a soma dos erros quadrado mensais, observados e calculados, normalizada pela área (m <sup>2</sup> ) da bacia hidrográfica estudada.	Wohling et al. (2013)
28	Soma dos erros quadrados diários	SSE <sub>Q</sub>	$\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2$	0	$\infty$	0	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>	Expressa os erros quadrado diários, observados e calculados.	Wohling et al. (2013)
29	Erro relativo de volume	$\Delta V$	$\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)}) - \sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)})}$	$-\infty$	$\infty$	0	Adimensional	Mede a tendência média dos valores calculados para ser maior ou menor do que os que foram observados.	Muleta (2012) Rientjesn et al. (2013)
30	Coefficiente de eficiência volumétrica	EV	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)} }{\sum_{i=1}^n Q_{obs(i)}}$	0	1	1	Adimensional	Representa a relação entre o erro absoluto diário, observado e calculado, normalizado pela soma das vazões observadas.	Criss e Winston (2008)
31	Erro médio absoluto relativo	EMAR	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{(Q_{cal(i)} + 0,001) - (Q_{obs(i)} + 0,001)}{(Q_{obs(i)} + 0,001)} \right $	0	$\infty$	0	Adimensional	Representa a relação absoluta entre diferença relativa das vazões calculadas e observadas, normalizado pelas vazões observadas.	Getirana et al. (2011)
32	Porcentagem do coeficiente do erro de escoamento médio anual	ROCE	$\frac{1}{y} \sum_{y=1}^y \left  \frac{Q_{cal(anual)}}{Q_{obs(anual)}} - 1 \right  * 100\%$	0	$\infty$	0	Adimensional	É calculado como a relação absoluta entre o coeficiente de escoamento médio anual calculado e observado. Onde y = número de anos da serie de tempo analisados.	Kollat et al. (2012)

N°	NOME	SIGLA	FUNÇÕES OBJETIVO	VARIÇÃO DE VALORES		VALOR ÓTIMO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIA
				Min.	Máx.				
33	Forma combinada de NS e $\Delta V$	Y	$\frac{NS}{1 +  \Delta V }$	$-\infty$	1	1	Adimensional	Expressa a relação entre coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e o erro relativo de volume	Akhtar et al. (2009) Rientjes et al. (2013) e Romanowicz et al. (2013)
34	Forma combinada de NS e EMAR	RV	$NS - \omega * EMAR$	$-\infty$	1	1	Adimensional	Expressa a diferença relativa entre coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e o erro médio absoluto relativo ponderado (com: $\omega = 0.1$ ).	Lindstrom et al. (1997) Romanowicz et al. (2013)
35	Declive da curva de permanência	DCPerm	$\left  \frac{Q_{cal,50\%} - Q_{cal,10\%}}{Q_{obs,50\%} - Q_{obs,10\%}} - 1 \right  * 100\%$	0	$\infty$	0	Adimensional	Mede o grau de declividade entre as curvas de permanências, calculadas e observadas. Onde Qcal50% é o percentil 50° e Qcal10% é o percentil 10° das vazões calculadas. Da mesma forma, Qobs50% e Qobs10% são os 50° e 10° percentis das vazões observadas.	Kollat et al. (2012)
36	Fator de curva de permanência	FCPerm	$1 - \frac{\sum_{p=p_0}^{np} \{QD_{cal}(p) - QD_{obs}(p)\} * \Delta p}{\sum_{p=p_0}^{np} QD_{obs}(p) * \Delta p}$	0	$\infty$	1	Adimensional	Calcula a relação entre a diferença relativa entre as vazões observadas e calculadas da curva de permanência, normalizada pela soma das vazões observadas na curva de permanência.	Tucci (2005)

Legenda:  $Q_{cal}(i)$  são os valores da série de vazões calculadas pelo modelo,  $Q_{obs}(i)$  são os valores da série de vazões observadas,  $\overline{Q_{obs}(i)}$  e  $\overline{Q_{cal}(i)}$  é a média da série de vazões observadas e calculadas,  $mQ_{obs}(i)$  e  $mQ_{cal}(i)$  é a vazão total mensal da série observada e calculada,  $\overline{Q_D}$  é a média diária da série de vazões observadas,  $Q_{ref}(i)$  é a vazão média do modelo de referencia a ser considerado,  $\hat{Q}_{obs}(i)$  e  $\hat{Q}_{cal}(i)$  são os valores da série de vazões transformadas, calculadas e observadas,  $n$  o número total de elementos na série e  $A$  é a área da bacia hidrográfica estudada.

### 3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ

A região de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Piancó, abrangendo uma área de 9.205 km<sup>2</sup>, corresponde a uma das sete sub-bacias em território paraibano da bacia hidrográfica do Rio Piranhas Açu. No entanto, para este estudo foi delimitado uma sub-bacia a montante do posto fluviométrico Piancó abrangendo uma área de 4603,39 km<sup>2</sup> (Figura 6). De acordo com UFPB (2011), o posto fluviométrico Piancó não é influenciado por reservatórios a montante da bacia hidrográfica.

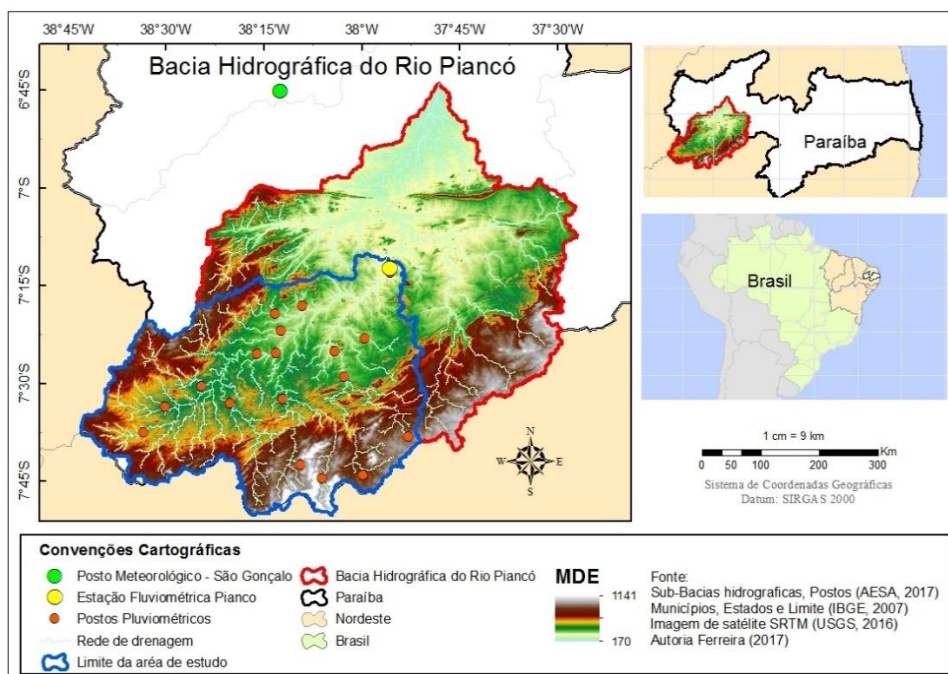


Figura 6 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó (Fonte: Autoria própria, 2017)

A bacia hidrográfica do rio Piancó pertence ao complexo da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó Piranhas Açu, sendo uma das suas principais Unidades de Planejamento Hidrológico (UPHs). Situa-se no extremo sudoeste do Estado da Paraíba, tendo como fronteiras o Ceará, a oeste, Pernambuco, ao sul, o Alto e Médio Piranhas, ao norte e a bacia do Rio Espinharas, a leste. O rio Piancó é o rio principal e seus principais afluentes são os

rios Jenipapo e Gravatá e os riachos de Santana, Minador, Canoas, Vermelho, Maria e Verde (IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S, 2013).

Com clima semiárido, possui todas as características físicas e hidroclimatológicas representativas do semiárido do Nordeste brasileiro. Além disso, possui grande importância em termos de abastecimento de água para o sertão paraibano (ESCARIÃO et al., 2013), banhando 15 municípios. A vegetação predominante é típica da caatinga e o tipo de uso do solo principal é a atividade agrícola. A bacia hidrográfica apresenta quatro tipos de solo mais frequentes: litossolos, argissolos, cambissolos e luvisolos (FELIX e PAZ, 2016).

Apresenta altas temperaturas, em média 28°C promovendo taxas de evapotranspiração bastante elevadas, o potencial de perda de água por evapotranspiração, que chega até 2.500 mm ao ano (SILVA E ALCÂNTARA, 2009), o que pode ocasionar déficit hídrico significativo. O regime hídrico da região tende em apresentar uma forte variabilidade interanual, ocasionando a alternância entre anos de chuvas regulares e anos de acentuada escassez hídrica, levando à ocorrência de secas hídricas, ver Figura 7.

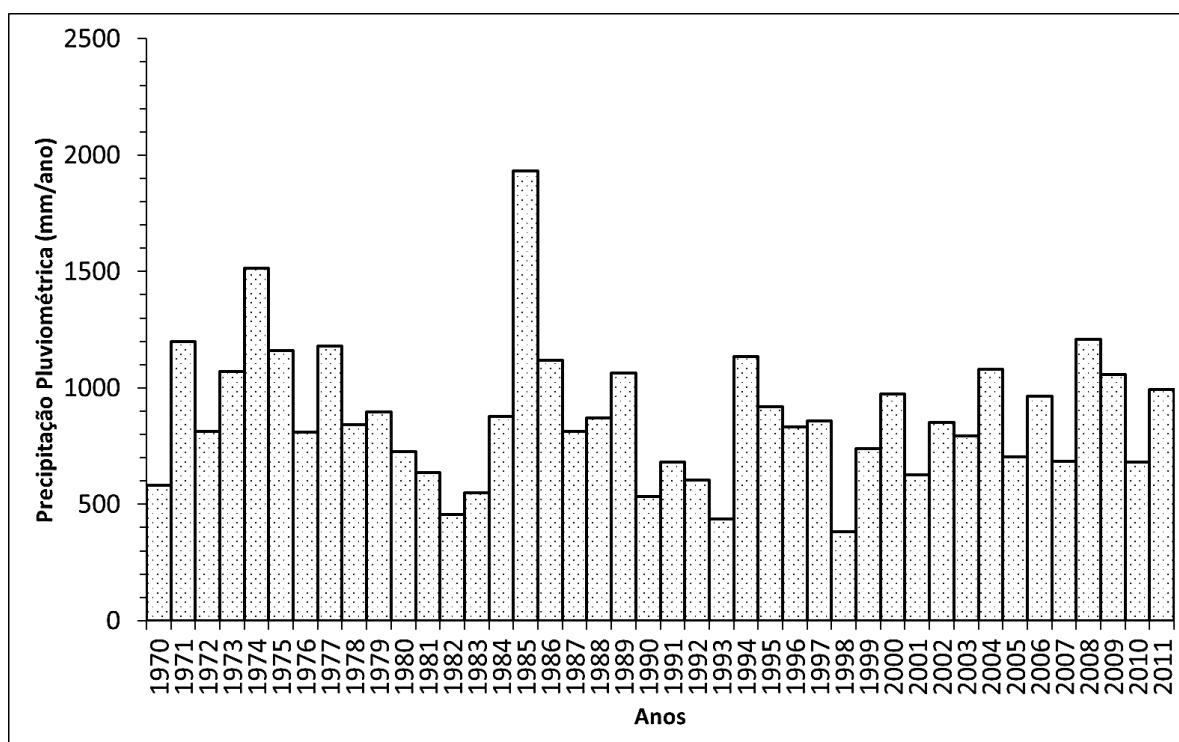


Figura 7 – Precipitação anual da bacia hidrográfica do rio Piancó. (Fonte: autoria própria, 2017)

A Figura 8 mostra a variação temporal da precipitação média mensal observados na bacia hidrográfica do rio Piancó. O período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro a maio, com uma variação de 110 mm a 230 mm mensais. Com chuva anual média em torno de 860 mm (FELIX e PAZ, 2016). Em 42 anos (1970-2011) foi verificado que o ano de 1985 foi ano mais úmido (80,77 mm) e 1993 foi ano mais seco (0,24 mm).

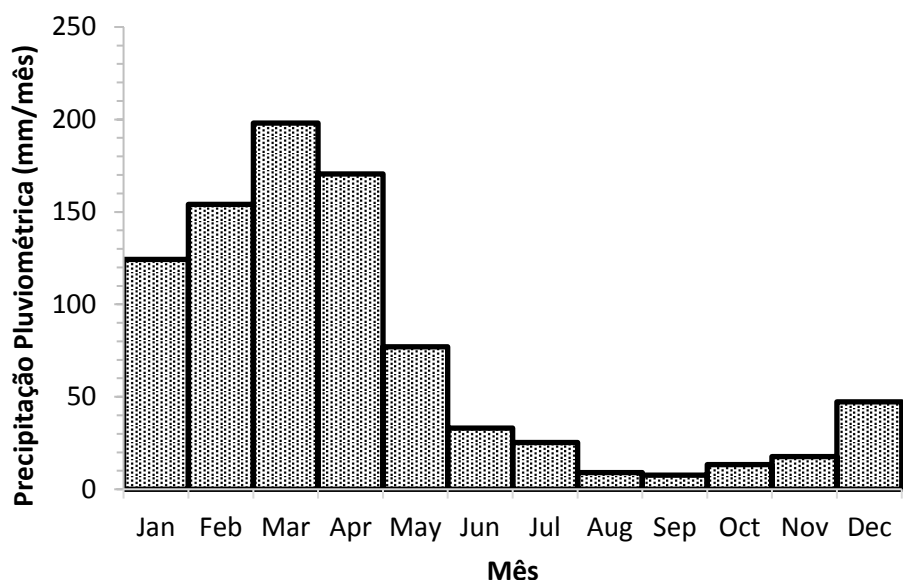


Figura 8 – Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó. (Fonte: autoria própria, 2017)

Uma característica interessante é a intermitência do rio principal no trecho da bacia hidrográfica estudada. FELIX e PAZ (2016) em seus estudos analisaram a série de dados diários observados de vazão e ressaltaram que em 37% do tempo no período de 1970 a 2011 a vazão permaneceu nula. Em anos mais secos, essa intermitência é agravada, tendo apresentado cerca de 70% ou mais dos dias sem vazão nos anos de 1980 a 1982, 1993 e 2001.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 VISÃO GERAL DO ESTUDO

Este estudo compreende um aprofundamento da aplicação do MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Piancó realizada primeiramente por Felix e Paz (2016). A abordagem consiste em uma análise sobre três métodos alternativos de calibração automática multiobjetivo. A primeira análise tem o objetivo de encontrar um (ou mais) conjuntos de FO que minimize os erros nas estimativas entre as vazões calculadas e as vazões observadas, buscando uma melhor estimativa das vazões baixas sem sacrificar as estimativas das vazões altas.

A segunda análise compreende uma abordagem sobre a calibração dividida por faixas de vazões, isto é, a calibração do modelo é realizada separadamente para cada faixa de vazões, sendo estas vazões altas, médias e baixas. A partir da composição final do hidrograma de saída com base nas três calibrações, são obtidas as estimativas das vazões calculadas. Semelhante à abordagem anterior, a terceira análise compreende calibrações por período do ano, sendo estes o período chuvoso e o período de estiagem, com o intuito de verificar se com a aplicação do método alternativo de calibração há melhora nas estimativas das vazões.

As etapas do estudo são melhor discutidas nos tópicos seguintes. No fluxograma apresentado na Figura 9 podemos visualizar como foram divididas as etapas deste estudo.

O modelo MGB-IPH foi rodado com passo de tempo diário. Assim como o estudo de Felix e Paz (2016), foram selecionados 21 anos para o período da calibração do dia 01/jan/1970 até 31/dez/1990, e também um período de 21 anos foi utilizado para validar o modelo, de 1/jan/1991 até 31/dez/2011. O primeiro ano de cada período (1970 e 1991) foi utilizados para o aquecimento do modelo (Figura 10).

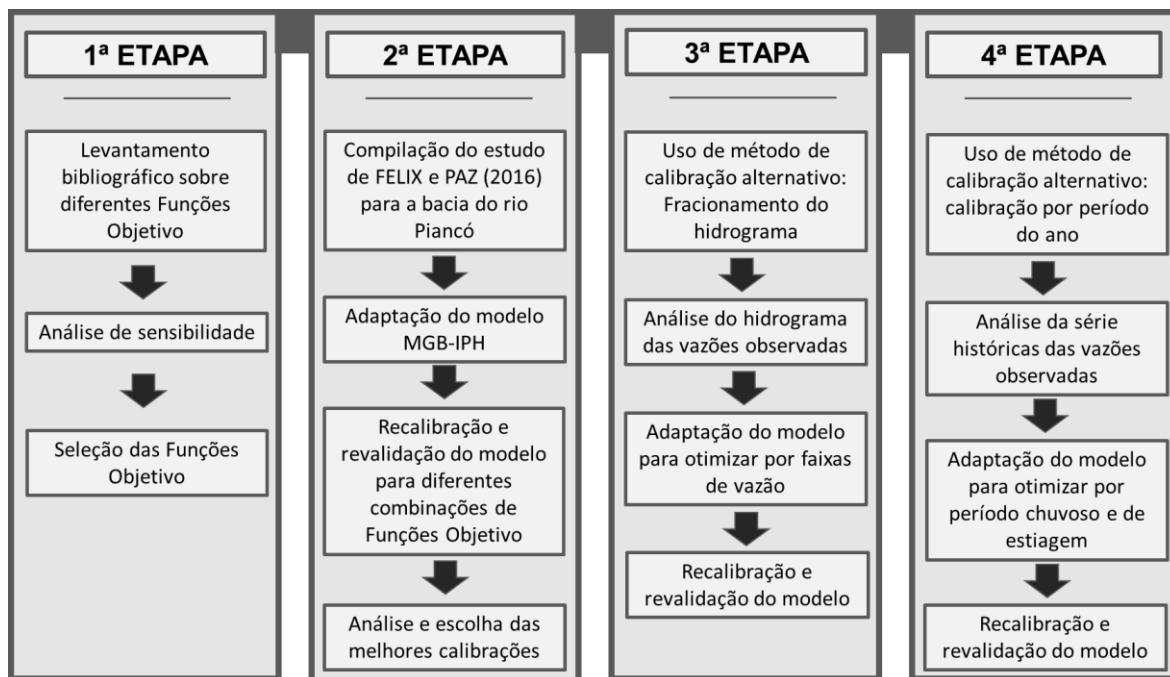


Figura 9 – Fluxograma das etapas metodológicas. (Fonte: Autoria própria, 2017)

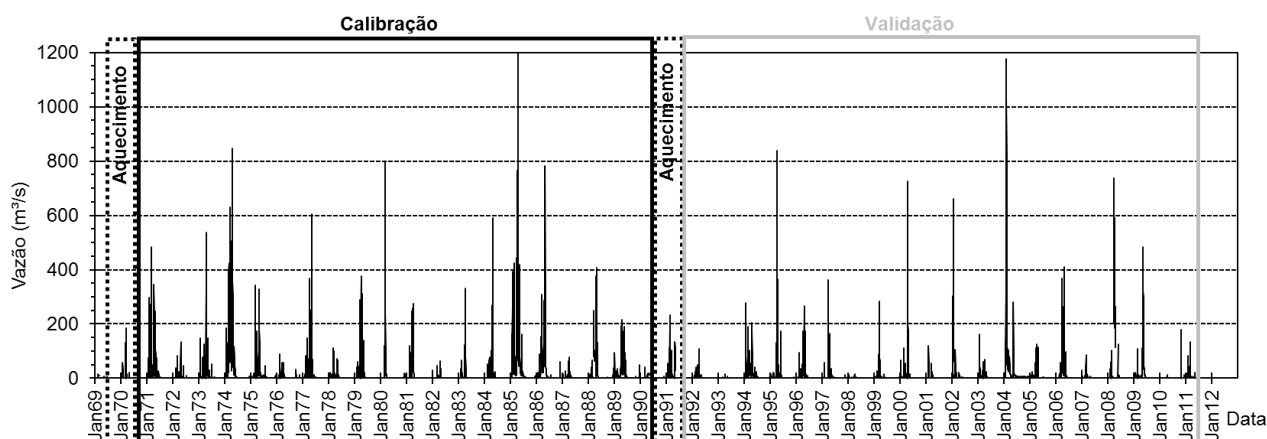


Figura 10 – Dados de vazão observados no posto fluviométrico Piancó – PB e indicação dos períodos de calibração e validação do modelo hidrológico. (Fonte: Autoria própria, 2017)

#### 4.2 APLICAÇÃO ANTERIOR DO MODELO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ

No estudo de Felix e Paz (2016) foi realizada a primeira aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na sua forma tradicional, utilizando a mesma área de estudo citada anteriormente, a bacia hidrográfica do rio Piancó. Todos os dados e informações necessários

para a continuação do estudo foram concedidas pelos autores. Como já foi mencionado os dados de entrada para o modelo MGB-IPH são: precipitação, dados meteorológicos, vazão, dados referentes aos tipos e uso dos solos e vegetação, e dados topográficos.

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos no portal eletrônico HidroWEB da ANA (Agência Nacional das Águas), complementados por dados cedidos pela AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba). Foram utilizadas 14 estações pluviométricas distribuídas irregularmente sobre a bacia (Tabela 3).

Os dados de vazão foram obtidos no site da Agência Nacional das Águas – ANA, no qual foi utilizada a série histórica de vazões (42 anos) do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000). Os dados meteorológicos (temperatura, umidade, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica) foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação São Gonçalo, localizada próximo da área em estudo (cerca de 60 km), ver Figura 6.

Tabela 3 - Postos pluviométricos utilizados na pesquisa

<b>Nome do Posto</b>	<b>Código do Posto</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Piancó	00737006	-07 12 51	-37 55 33
Princesa Isabel	00738013	-07 44 00	-38 01 00
Itaporanga	00738017	-07 18 00	-38 10 00
Coinceição	00738020	-07 33 00	-38 31 00
Manaira	00738015	-07 42 00	-38 10 00
Nova Olinda	00738014	-07 28 00	-38 03 00
Boa Ventura	00738012	-07 24 00	-38 13 00
Ibiara	00738018	-07 29 00	-38 25 00
Juru	00737016	-07 32 00	-37 50 00
Caiçara	00738028	-07 51 00	-38 34 00
Garrotes	00738019	-07 23 00	-38 00 00
Serra Grande	00738010	-7 15 00	-38 19 00
Bom Jesus	00738023	-7 21 00	-38 22 00
Bonito de Santa Fé	00738022	-7 19 00	-38 31 00

(Fonte: FELIX, 2015)

Para a definição das URHs, foram analisados os mapeamentos de cobertura vegetal e tipo de solos disponibilizados pelo portal eletrônico do Ministério do Meio Ambiente (MMA). A topografia e drenagem foram extraídas do processamento do Modelo Numérico do Terreno (MNT) proveniente dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m. Foram definidas sete unidades de respostas hidrológicas URHs, que são: Argissolos/caatinga (19,8%); Litosossolos/caatinga (51,1%);

Cambissolos/caatinga (5,0%); Argissolos/atividade agrícola (8,5%); Luvisolos/atividade agrícola (2,9%); Litossolo/atividade agrícola (12,7%) e Água (0,4%).

Os parâmetros fixos (albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal) foram definidos a partir de aplicações anteriores do referido modelo: Silva (2005); Collischonn (2001) e Ribeiro Neto (2006). Esses mesmos estudos serviram de base para definir os valores iniciais dos demais parâmetros do modelo, que são:  $W_m$  (armazenamento de água no solo);  $B$  (parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo);  $K_{int}$  (parâmetro de drenagem subsuperficial);  $K_{bas}$  (parâmetro de escoamento subterrâneo);  $WC$  (limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente);  $C_b$  (parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo);  $C_s$  (parâmetro para calibração da propagação superficial nas células) e  $CI$  (parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células). Foram calibrados o total de 11 parâmetros, com seis valores diferentes de  $W_m$  para as URH (a URH água não tem seu  $W_m$  calibrado, é zero); um valor único de  $b$  para todas as URH, um valor de  $K_{int}$ , um valor de  $K_{bas}$ , um valor de  $C_s$  e um valor de  $CI$ . O  $W_c$  não é calibrado, apenas adotado, pois tem pouca influência no modelo; e  $C_b$  também não é calibrado, apenas estimado.

Nesta aplicação foi adotada a versão do modelo que discretiza a bacia hidrográfica na forma de uma grade regular (PAZ et al., 2006; PAZ e COLLISCHONN, 2007), com  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ , ou seja, células de aproximadamente  $5 \times 5$  km, no total de 151 células que compreendem a área de estudo (Figura 11).

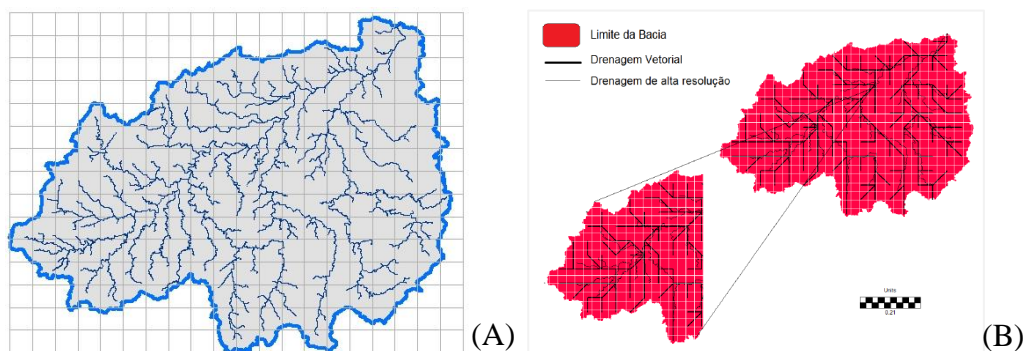


Figura 11 - (A) Discretização da bacia do Rio Piancó (B) Rede de drenagem do modelo hidrológico (células de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ ). (Fonte: FELIX, 2015)

O detalhamento e resultados da calibração são apresentados em Felix (2015) e Felix e Paz (2016), mas em síntese o modelo conseguiu simular a forte sazonalidade da bacia hidrográfica, a distinção do efeito de anos mais úmidos e anos mais secos em relação ao porte das cheias, o instante de tempo de subida e de descida dos hidrogramas, e a intensidade das cheias de pequeno e médio porte, apresentando, entretanto, dificuldades quanto à representação dos picos das maiores cheias e à representação da intermitência do rio.

#### 4.3 TESTE DE SENSIBILIDADE DAS FUNÇÕES OBJETIVO

A análise de sensibilidade foi realizada a partir dos dados de vazão observados e calculados pelo modelo MGB-IPH aplicado na bacia hidrográfica do rio Piancó fornecido através do estudo de Felix (2015) e Felix e Paz (2016).

Foram realizados dez testes nos quais as vazões calculadas de cada teste foram obtidas a partir de combinações entre dados observados, calculados e outras informações. Essas novas vazões calculadas geradas para cada teste foram chamadas de vazões sintéticas. A descrição das vazões sintéticas calculadas pode ser observada na Tabela 4.

Cada teste representa situações hipotéticas que fornecem as vazões calculadas com certa similaridade com as vazões observadas. O principal propósito dessa análise foi mostrar o comportamento de cada uma dessas métricas frente às condições de vazões hipotéticas criadas, com o intuito de confirmar se tais métricas são sensíveis às vazões altas ou baixas e a outros aspectos, dessa forma averiguando a congruência com relação ao que foi explorado no levantamento bibliográfico.

O teste 0 foi aplicado sobre os dados obtidos diretamente do estudo de Felix e Paz (2016), sem modificação alguma. Nos testes 1 e 2 as vazões sintéticas representam situações em que as vazões observadas foram duplicadas e reduzidas à metade, respectivamente. Para os testes 3 e 4, as vazões observadas foram adicionadas e subtraídas ao valor de referência da Q50, isto é, o valor que representa a vazão que é igualada ou superada em 50% do tempo, obtido a partir da curva de permanência das vazões observadas ( $Q_{50} = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Já nos testes 5 e 6 foram criadas situações em que não houvesse erros entre as vazões observadas e as vazões sintéticas no período chuvoso (teste 5) e no período de estiagem (teste 6). Ou seja, no teste 5 as vazões sintéticas do período chuvoso, meses de janeiro a maio, permaneceram iguais aos valores de vazões observadas no mesmo período, e nos demais

meses permaneceram os valores calculados pelo modelo hidrológico. Do mesmo modo foi feito no teste 6 para o período de estiagem, meses de junho a dezembro.

Tabela 4 - Vazões calculadas sintéticas

Testes	Vazões sintéticas	Descrição
0	$S_m$	Vazões calculadas pelo modelo sem modificações (dados originais)
1	$OBS \times 2$	Vazões calculadas são iguais a duas vezes às vazões observadas
2	$OBS/2$	Vazões calculadas são iguais à metade das vazões observadas
3	$OBS + Q50$	Vazões calculadas são iguais às vazões observadas mais a Q50 da curva de permanência das vazões observadas
4	$OBS - Q50$	Vazões calculadas são iguais às vazões observadas menos a Q50 da curva de permanência das vazões observadas
5	$OBS_{chuvoso}$	Vazões calculadas no período chuvoso são iguais às vazões observadas no mesmo período, e as vazões no período de estiagem permanecem as calculadas originalmente pelo modelo
6	$OBS_{estiagem}$	Vazões calculadas no período de estiagem são iguais às vazões observadas no mesmo período, e as vazões no período chuvoso permanecem as calculadas originalmente pelo modelo
7	$\overline{OBS}$	Vazões calculadas são iguais à vazão média observada de longo termo
8	$\overline{OBS}_{mês}$	Vazões calculadas são iguais à vazão média mensal de longo termo
9	$\overline{OBS}_{(mês)ano}$	Vazões calculadas são iguais à vazão média mensal a cada ano
10	$\overline{OBS}_{diária}$	Vazões calculadas são iguais à vazão média diária de cada dia do ano

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Os testes 7, 8, 9 e 10 fizeram referências aos valores médios da série de dados das vazões observadas. As vazões sintéticas no teste 7 foram representadas pela média das vazões observadas (16,326 m<sup>3</sup>/s) referente ao período de calibração de 01/jan/1970 até 31/dez/1990 (Figura 11). No teste 8 foram representadas pela média mensal das vazões observadas durante o mesmo período, ou seja, os meses de janeiro da série de dados foram representados pelo valor médio de todos os meses de janeiro, do mesmo modo ocorreu para os demais meses.

Pode-se observar na Figura 12 os hidrogramas das vazões observadas e sintéticas para o ano de 1973, verificando assim o comportamento entre as estimativas de cada teste.

As médias mensais para cada ano das vazões observadas durante do período mencionado representaram as vazões sintéticas no teste 9, isto é, todos dias dos meses de cada ano foram representados pela média do próprio mês em questão, médias diferentes a cada mês e a cada ano. Já no teste 10 as vazões sintéticas foram representadas pela média

referente a cada dia do ano. Exemplo, a média de todos os dias 01 de janeiro durante todos os anos que compreendem o período citado (42 anos no total).

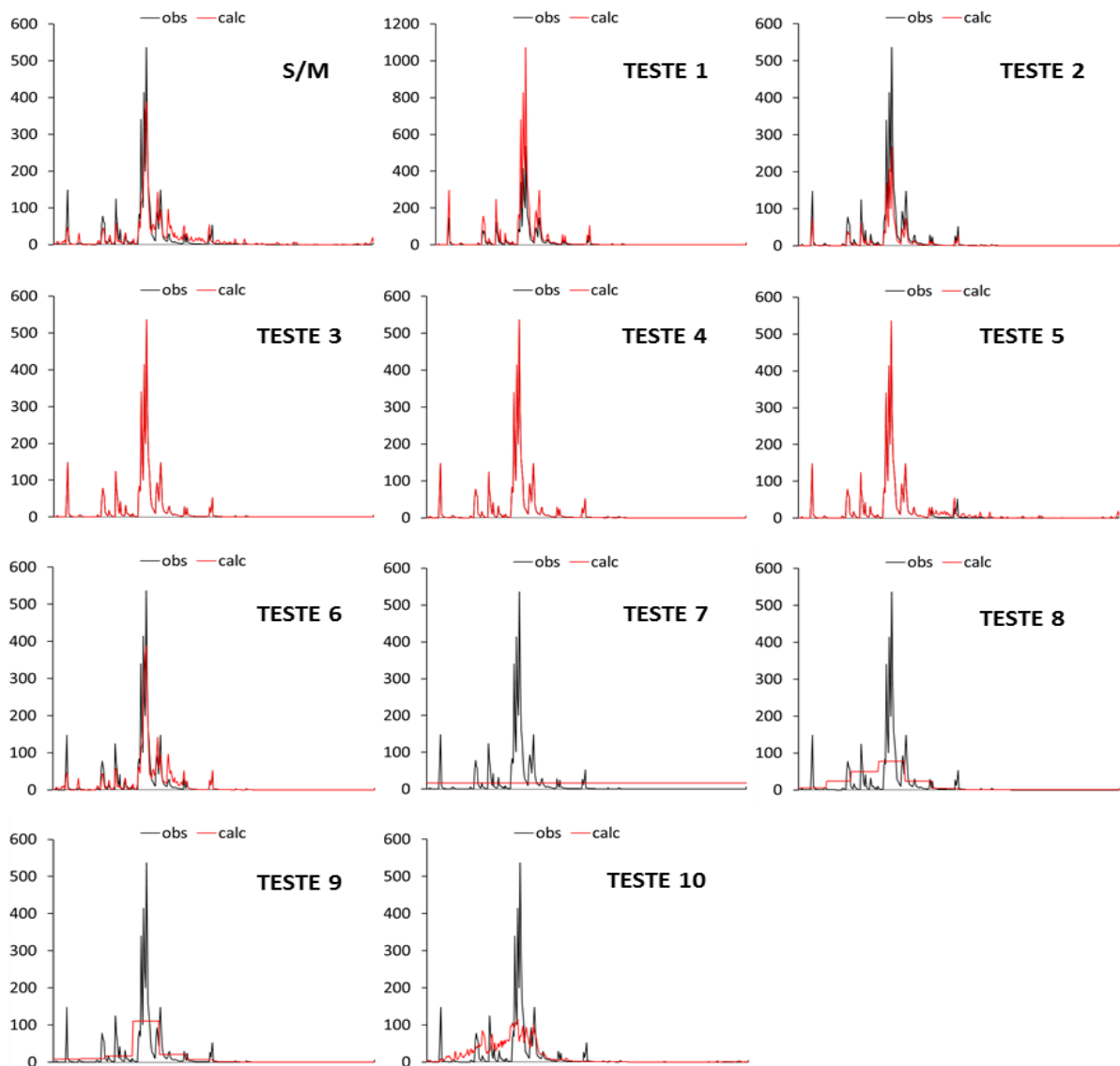


Figura 12 – Hidrogramas das vazões observadas e sintéticas para o ano de 1973. (Fonte: Autoria própria, 2017)

A partir dos dados de vazões observados e das vazões sintéticas, foram calculadas todas as funções objetivo citadas na Tabela 2 para cada um dos testes. Para automatizar o tratamento dos dados foram desenvolvidas planilhas em Linguagem *Visual Basic* que ajudaram no processamento dos dados com maior agilidade.

Para facilitar a análise as FO foram divididas por grupos dando ênfase há características comuns entre elas. Desse modo, um olhar mais de perto nas Eqs. (1) - (36) da Tabela 2 revela que as funções objetivas podem ser agrupadas como:

- Grupo I: aqueles que minimizam os desvios absolutos das vazões observadas e calculadas (ou seja, NSabs, NSDabs, EMA, EMax, EV, EMAR, ROCE e DCP);
- Grupo II: aqueles que minimizam o quadrado dos resíduos (ou seja, r, r<sup>2</sup>, NS, NSD, NSM, EPM, HF, d,  $\alpha$ ,  $\beta$ , EKG e RSR);
- Grupo III: aqueles que utilizam log dos valores observados e simulados (ou seja, NSlog, NSDlog e LOGQ);
- Grupo IV: aquelas que quantificam estatísticas de somatórios de erros (ou seja, EM, EMQ, REMQ, TREMQ, REMQ<sub>AV</sub>, REMQ<sub>BV</sub>, DVP<sub>max</sub>, SSE<sub>MQ</sub> e SSE<sub>Q</sub>);
- Grupo V: aquelas que quantificam erros de volume e representam funções combinadas (ou seja,  $\Delta V$ , FCP, Y e RV).

#### 4.4 OTIMIZAÇÃO PARA DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO

##### 4.4.1 Seleção de Funções Objetivo

O desempenho ou qualidade de um modelo hidrológico é usualmente mensurado pela capacidade em representar o regime de vazões observado. Por isso, os parâmetros passíveis de calibração são ajustados geralmente com base na comparação entre hidrogramas observados e calculados, considerando diferentes FO.

Nesta etapa foi realizado um levantamento bibliográfico relativo ao assunto. Com isso, foram reunidas informações necessárias que serviram de subsídios para o seguimento do estudo a respeito das funções objetivo.

A pesquisa priorizou por funções objetivo mais utilizadas, modificadas, adaptadas, combinadas e com novos conceitos, resumidamente expostas na Tabela 2 apresentada. A partir do levantamento foi possível obter uma melhor compreensão dessas métricas quanto à aplicação em modelos hidrológicos, indagando as vantagens e desvantagens, falhas, críticas e recomendações quanto ao uso.

Na tabela 5 é mostrada a classificação das funções objetivo segundo as informações adquiridas no levantamento bibliográfico.

Tabela 5 - Classificação das FO com base no levantamento bibliográfico

Sensível às vazões altas		Sensível às vazões baixas	Sensível a ambas as vazões altas e baixas	Sensível aos erros de volume	Funções combinadas/modificadas
r	$\beta$	NS <sub>log</sub>	NS <sub>Abs</sub>	SSE <sub>EMQ</sub>	Y
r <sup>2</sup>	EKG	NSD <sub>Abs</sub>	NSD <sub>Abs</sub>	SSE <sub>Q</sub>	RV
NS	EMQ	TREMQ	EMA	$\Delta V$	DCPerm
NSD	REMQ	REMQ <sub>BV</sub>	EM	EV	FCPerm
NSM	RSR	LOGQ		EMAR	
EPM	REMQ <sub>AV</sub>			ROCE	
HF	E <sub>Amax</sub>				
d	DVP <sub>max</sub>				
$\alpha$					

(Fonte: Autoria própria, 2017)

A escolha das funções objetivo possui um forte impacto sobre resultados da calibração e, portanto, sobre o desempenho do modelo. Foi realizada uma análise de sensibilidade das funções objetivo, com o propósito de observar as respostas das 36 métricas (Tabela 2 e Tabela 4) quando utilizadas em situações singulares e se as mesmas corroboram com a classificação obtida pelo levantamento bibliográfico realizado (Tabela 4).

#### 4.4.2 Adaptação do modelo para diferentes Funções Objetivo

Esta etapa consiste inicialmente em selecionar conjuntos de FO para calibrar de forma independente o modelo hidrológico e avaliar a influência de cada conjunto sobre o resultado do ajuste do modelo em região semiárida. Foi utilizada a calibração automática multiobjetivo em todos os ajustes realizados, em que o estabelecimento dos trios de FO para cada rodada foi feito procurando retratar diferentes aspectos do regime hidrológico: picos de vazão, vazões de estiagem e volume escoado.

Por isso, é importante que a seleção das FO individuais considere diferentes aspectos do hidrograma das vazões observadas (DECKERS et al. 2010; WOHLING et al. 2013). Ou seja, cada combinação deve ter uma função objetivo que seja sensível às vazões altas, outra sensível às vazões baixas e outra sensível aos erros de volume. Dessa forma, todas as calibrações realizadas neste estudo utilizaram a combinação de três FO, seguindo essas mesmas condições citadas sempre evitando utilizar FO que estejam correlacionadas.

O código do modelo MGB-IPH foi usado na sua versão original, este por sua vez possui uma interface de programação em linguagem *Fortran*, no qual a adaptação no código

foi realizada apenas sobre as FO. Para realizar a calibração automática em cada calibração foi estabelecido uma amplitude de variação para cada parâmetro calibrável (11 parâmetros calibráveis, ver item 4.2) e, dentro desse intervalo, por ser multiobjetivo ele encontra um conjunto de melhores valores para cada parâmetro e o melhor ajuste possível para modelo. O limite mínimo e máximo de variação indicado para cada parâmetro pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites dos parâmetros para calibração automática

<b>Parâmetro</b>	<b>Limite mínimo</b>	<b>Limite máximo</b>
B (-)	0.067	3.35
KINT(mm.dia-1)	2.6	130
KBAS (mm.dia-1)	0.03	1.5
CS (-)	2.4	120
CI (-)	20	1000
Wm - Argissolos/caatinga (mm)	88	880
Wm - Litosossolos/caatinga (mm)	54	540
Wm - Cambissolos/caatinga (mm)	158.4	1584
Wm - Argissolos/atividade agrícola (mm)	240	2400
Wm - Luvisolos/atividade agrícola (mm)	180	1800
Wm - Litossolo/atividade agrícola (mm)	120	1200

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Foram implementadas 20 FO e 111 combinações dessas funções. Estas FO foram escolhidas a partir das considerações da análise de sensibilidade realizada apresentada nos resultados (observar Tabela 13 no item 5.1). Em seguida, foram implementadas modificações na rotina FOBJE necessários para calcular todas às FO selecionadas, posteriormente iniciou-se o processo de calibração dos parâmetros.

Inicialmente, foram criadas para este estudo 95 combinações de FO. Na Tabela 7 expõe um total de 96 combinações de FO, na qual a primeira calibração (CALIB 00) que é a original do modelo realizada por FELIX e PAZ (2016). Cada trio de FO teve a seguinte ordem, a primeira FO dá mais importância as vazões altas, a segunda FO se importa mais com vazões baixas e a terceira FO tem aspecto mais geral de volume.

A organização da Tabela 7 foi feita de forma para facilitar o entendimento, compreendendo em 12 colunas e 8 linhas. Em cada coluna, a metade (Linhas 1, 2, 3 e 4) das calibrações trabalha com  $\Delta V$  e a outra metade (Linhas 5, 6, 7 e 8) com EV como terceira métrica. Em cada um desses subgrupos de quatro calibrações a distinção dentre elas é apenas quanto à segunda FO, que se refere a valorizar mais as vazões baixas. Já em cada linha da

tabela existem doze calibrações, que se distinguem apenas quanto à primeira FO, mais relacionada às vazões altas.

Posteriormente foram realizadas mais 16 combinações de FO, sendo escolhidos apenas alguns casos para utilizar combinações com FO que calibrasse o modelo olhando para as curvas de permanência das vazões observadas e calculadas, ver Tabela 8.

A calibração multiobjetivo foi realizada com a utilização do algoritmo de otimização MOCOM-UA já implementado no modelo, que se baseia em técnicas de algoritmos genéticos, no qual cada otimização foi realizada utilizando a combinação de três FO com o modelo rodado em passo de tempo diário.

O critério adotado para a escolha do melhor conjunto de parâmetros em cada calibração foi o seguinte: no ranking de Pareto, dentre os conjuntos de soluções classificados como “1”, escolhe-se o que possuir o menor NSlog. Esse critério foi utilizado, pois todas as soluções ali contidas são igualmente satisfatórias. Se houver mais de um conjunto de soluções com o mesmo valor da “melhor” função, o critério de desempate é o valor do  $\Delta V$ , ou seja, o erro de volume. Se o empate persistir adota-se o valor do NS.

Tabela 7 – Combinações das funções objetivo usadas nas calibrações no modelo MGB-IPH

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	<b>CALIB 00</b>	<b>CALIB 33</b>	<b>CALIB 39</b>	<b>CALIB 43</b>	<b>CALIB 45</b>	<b>CALIB 49</b>	<b>CALIB 53</b>	<b>CALIB 59</b>	<b>CALIB 63</b>	<b>CALIB 71</b>	<b>CALIB 79</b>	<b>CALIB 87</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog
	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$
2	<b>CALIB 29</b>	<b>CALIB 01</b>	<b>CALIB 05</b>	<b>CALIB 06</b>	<b>CALIB 26</b>	<b>CALIB 25</b>	<b>CALIB 54</b>	<b>CALIB 11</b>	<b>CALIB 64</b>	<b>CALIB 72</b>	<b>CALIB 80</b>	<b>CALIB 88</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog
	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$
3	<b>CALIB 95</b>	<b>CALIB 34</b>	<b>CALIB 40</b>	<b>CALIB 09</b>	<b>CALIB 46</b>	<b>CALIB 50</b>	<b>CALIB 55</b>	<b>CALIB 60</b>	<b>CALIB 65</b>	<b>CALIB 73</b>	<b>CALIB 81</b>	<b>CALIB 89</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ
	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$
4	<b>CALIB 21</b>	<b>CALIB 35</b>	<b>CALIB 14</b>	<b>CALIB 13</b>	<b>CALIB 28</b>	<b>CALIB 18</b>	<b>CALIB 15</b>	<b>CALIB 22</b>	<b>CALIB 66</b>	<b>CALIB 74</b>	<b>CALIB 82</b>	<b>CALIB 90</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)
	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$	$\Delta V$
5	<b>CALIB 30</b>	<b>CALIB 02</b>	<b>CALIB 41</b>	<b>CALIB 03</b>	<b>CALIB 47</b>	<b>CALIB 24</b>	<b>CALIB 56</b>	<b>CALIB 61</b>	<b>CALIB 67</b>	<b>CALIB 75</b>	<b>CALIB 83</b>	<b>CALIB 91</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog	NSlog
	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV
6	<b>CALIB 31</b>	<b>CALIB 36</b>	<b>CALIB 07</b>	<b>CALIB 44</b>	<b>CALIB 04</b>	<b>CALIB 51</b>	<b>CALIB 57</b>	<b>CALIB 62</b>	<b>CALIB 68</b>	<b>CALIB 76</b>	<b>CALIB 84</b>	<b>CALIB 92</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog	NSDlog
	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV
7	<b>CALIB 32</b>	<b>CALIB 37</b>	<b>CALIB 42</b>	<b>CALIB 19</b>	<b>CALIB 48</b>	<b>CALIB 10</b>	<b>CALIB 58</b>	<b>CALIB 16</b>	<b>CALIB 69</b>	<b>CALIB 77</b>	<b>CALIB 85</b>	<b>CALIB 93</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ	TREMQ
	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV
8	<b>CALIB 20</b>	<b>CALIB 38</b>	<b>CALIB 12</b>	<b>CALIB 17</b>	<b>CALIB 27</b>	<b>CALIB 52</b>	<b>CALIB 08</b>	<b>CALIB 23</b>	<b>CALIB 70</b>	<b>CALIB 78</b>	<b>CALIB 86</b>	<b>CALIB 94</b>
	NS	NSabs	NSDabs	NSM	NSD	HF	D	RSR	REMQ(AV)	EMA	REMQ	EKG
	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)	REMQ(BV)
	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Tabela 8 – Combinações de funções objetivos com curva de permanência usadas nas calibrações no modelo MGB-IPH

CALIB 96	CALIB 97	CALIB 98	CALIB 99	CALIB 100	CALIB 101	CALIB 102	CALIB 103
NSM	NSM	NS	NS	NS	EKG	NSD	NSD
REMQ(BV)	NSDlog	TREMQ	NSlog	NSDlog	NSDlog	TREMQ	NSlog
DCPerm	DCPerm	DCPerm	DCPerm	DCPerm	DCPerm	DCPerm	DCPerm
CALIB 104	CALIB 105	CALIB 106	CALIB 107	CALIB 108	CALIB 109	CALIB 110	CALIB 111
NS	NS	NS	EKG	NSD	NSM	NSM	NSD
TREMQ	NSDlog	NSlog	NSDlog	TREMQ	REMQ(BV)	NSDlog	NSlog
FCPerm	FCPerm	FCPerm	FCPerm	FCPerm	FCPerm	FCPerm	FCPerm

(Fonte: Autoria própria, 2017)

#### 4.5 OTIMIZAÇÃO POR FAIXAS DE VAZÃO

Nesta etapa foi aplicado um método alternativo de calibração desenvolvido por Paris et al. (2011), que baseia-se na ideia de fracionar o hidrograma de entrada (série hidrológica) para calibrar e simular, separadamente, três faixas de vazões, obtendo um conjunto de parâmetros mais adequado para cada caso. O código computacional do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH foi adaptado para permitir a calibração seguindo essa abordagem.

A metodologia proposta por Paris et al. (2011), aplica dois métodos diferentes para obtenção dos limites das faixas de vazões para obter o fracionamento do hidrograma de entrada: pela multiplicação da vazão máxima por coeficientes; pela utilização da curva de permanência.

Em ambos os métodos são especificadas três faixas de vazões onde foi adotada a seguinte nomenclatura: Faixa 1 para as vazões “baixas”, Faixa 2 para as vazões “médias” e Faixa 3 para as vazões “altas”, conforme mostra a Figura 13.

No primeiro método, o valor de referência para o cálculo do limite entre as faixas de vazões altas e de vazões médias ( $Q2$ ) é o valor da vazão máxima observada da série histórica ( $Q_{máx}$ ). Para o cálculo do limite entre as faixas de vazões médias e baixas ( $Q1$ ) a referência é o  $Q2$ . O limite  $Q2$  é obtido pela multiplicação da ( $Q_{máx}$ ) por um coeficiente entre 0 e 1, chamado de  $C2$ . Por sua vez, o limite  $Q1$  é obtido pela multiplicação do  $Q2$  por outro coeficiente, chamado de  $C1$ . A escolha dos valores desses coeficientes fica a critério do usuário ao analisar as características da sua série de vazões.

No segundo método, o usuário define o  $Q1$  e o  $Q2$  de acordo com a curva de permanência das vazões, que representa a porcentagem do tempo em que uma determinada

vazão é igualada ou superada. Nesse procedimento, foram testados os seguintes valores para  $Q1$  e  $Q2$ : (i)  $Q5$  e  $Q25$ ; e (ii)  $Q10$  e  $Q40$ , respectivamente.

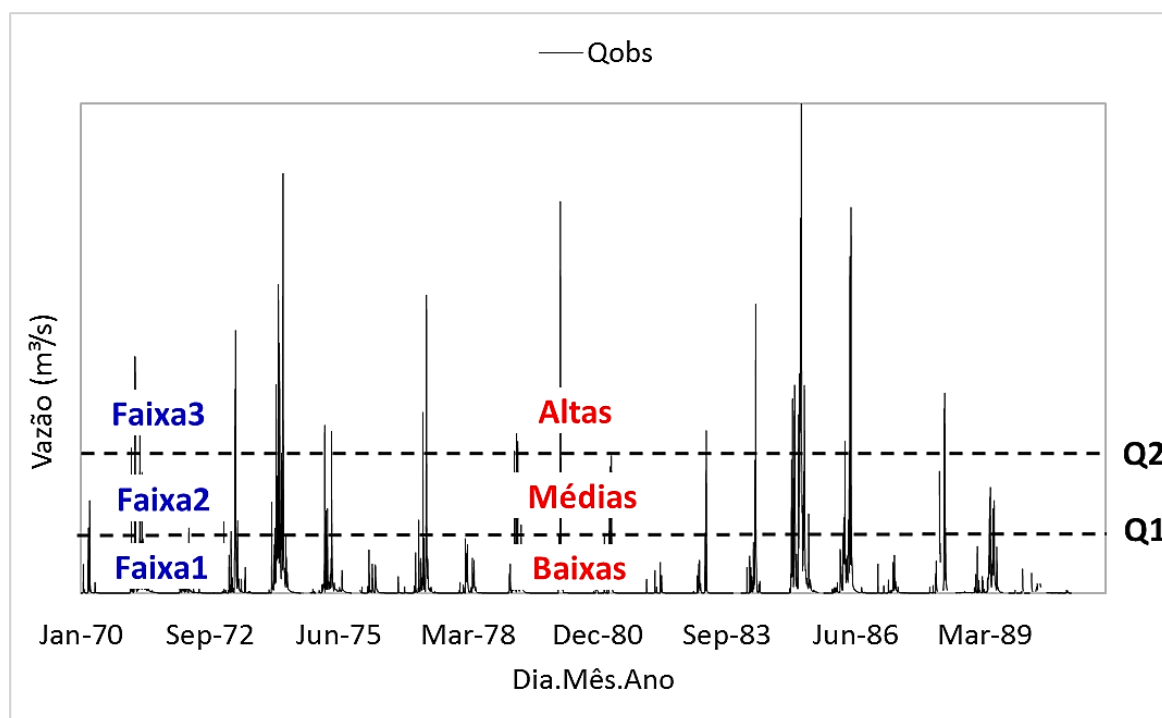


Figura 13 – Definição das faixas de vazão para aplicar o fracionamento do hidrograma.

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Após definidos os limites que divide as faixas de vazões foi realizada uma nova calibração para cada faixa de vazões resultando em três séries de vazões calculadas,  $Qcal1$ ,  $Qcal2$  e  $Qcal3$ . A série  $Qcal1$  é melhor ajustada às vazões baixas, enquanto que a  $Qcal3$  às vazões altas.

O critério adotado para a escolha do melhor conjunto de parâmetros em cada faixa de vazão para este estudo é o seguinte: no ranking de Pareto, dentre os conjuntos de soluções classificados como “1”, escolhe-se o que possuir o menor  $NSlog$ . Esse critério foi utilizado, pois todas as soluções ali contidas são igualmente satisfatórias. Se houver mais de um conjunto de soluções com o mesmo valor da “melhor” função, o critério de desempate é o valor do  $\Delta V$ , ou seja, o erro de volume. Se o empate persistir adota-se o valor do  $NS$ .

Ao fim das calibrações resulta em um hidrograma de saída para cada uma das faixas. Dessa forma, hidrograma final é composto pela combinação linear simples entre os três hidrogramas originais, mas com coeficientes de ponderação variando de 0 a 1. Esse cuidado

especial deve ser tomado devido à transição de uma faixa de vazão para a outra, pois a simples aglomeração das séries pode gerar saltos nos valores das vazões.

Desse modo, as vazões foram definidas como uma combinação linear das vazões calculadas. A composição dos hidrogramas de saída foi gerada pela equação 02.

$$Q_{si} = \alpha_1 Q_{1i} + \alpha_2 Q_{2i} + \alpha_3 Q_{3i} \quad (02)$$

para  $i=1, \dots, n$ , em que  $n$  é o número de intervalos de tempo da série,  $Q_{si}$  é a vazão do hidrograma de saída no instante  $i$ ,  $Q_{1i}$  é a vazão calculada para a faixa 1 no instante  $i$ ,  $Q_{2i}$  é a vazão calculada para a faixa 2 no instante  $i$ ,  $Q_{3i}$  é a vazão calculada para a faixa 3 no instante  $i$  e os valores  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são os pesos atribuídos a cada vazão em cada instante.

A definição dos valores dos pesos dos coeficientes ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ ) variam segundo as curvas indicadas na Figura 14, que seguem senoides visando suavizar as transições e composições de valores, em que foi considerada uma série com  $Q_{m\acute{a}x} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na Figura também pode ser observada a definição das zonas de transição, T1 (zona de transição 1) e T2 (zona de transição 2), definidas em 20% para ambos os lados de Q1 e Q2 (L1, L2, L3 e L4).

Por exemplo, o coeficiente  $\alpha_1$  foi determinado para ponderar a faixa 1 das vazões (vazões baixas), dessa forma o composto depende apenas da calibração nas faixas 1 e 2, sendo maior o peso para a faixa 2 e menor para a faixa 1, ou seja, quando as vazões são superiores ao limite Q1 recebe peso 0 (zero) e quando menores recebe peso 1, se as vazões estiverem dentro da zona de transição (20% para ambos os lados de Q1) o peso é determinado pela aplicação de função linear.

Semelhantemente, ocorreu com o coeficiente  $\alpha_3$  sendo que quando as vazões eram superiores ao limite Q2 recebe peso 1 e quando menores recebe peso 0, visto que este coeficiente é usado para ponderar a faixa 3 das vazões (vazões altas) sendo assim o composto depende apenas da calibração nas faixas 2 (menor peso) e 3 (maior peso), se as vazões estivessem dentro da zona de transição (20% para ambos os lados de Q2) o peso também é determinado pela aplicação de função linear. Já o coeficiente  $\alpha_2$  é determinado pela diferença entre os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\alpha_3$ .

Para a composição do hidrograma de saída foi utilizado um código computacional rodado em ambiente de programação do *software* Matlab (MATrix LABoratory). O código

foi disponibilizado por Paris et al. (2011), sendo realizadas algumas adaptações necessárias para aplicação neste estudo.

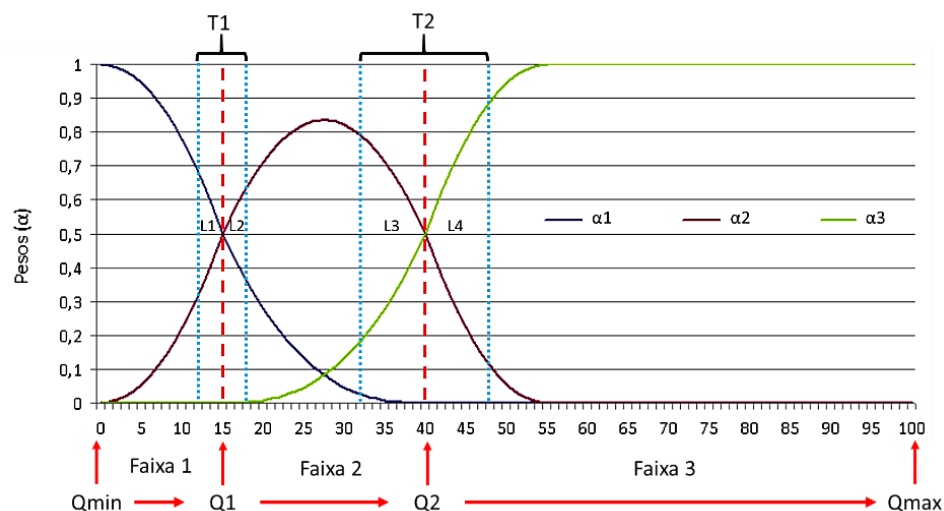


Figura 14 – Procedimento de composição do hidrograma de saída através funções lineares simples (Fonte: adaptado de PARIS, et al. 2011)

A Tabela 9 mostra os valores de  $C1$  e  $C2$  e os limites de vazões que foram utilizados nas calibrações. Esses valores foram escolhidos de acordo com a análise da série histórica de vazões observadas da bacia hidrográfica do rio Piancó, no qual foi observado vazões máximas de  $1527 \text{ m}^3/\text{s}$  e mínima de  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ , com períodos sazonais marcantes. O período chuvoso, de janeiro a maio, apresentou média aproximadamente de  $29,72 \text{ m}^3/\text{s}$  enquanto o período de estiagem, de junho a dezembro, apresentou média de aproximadamente  $0,90 \text{ m}^3/\text{s}$  e vazão máxima de  $161 \text{ m}^3/\text{s}$  neste período.

Tabela 9 - Coeficientes e valores de  $Q1$  e  $Q2$  para fracionamento da série hidrológica

Coeficientes/Vazões	Valores
<b>Qmáx (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	1527
<b>C1</b>	0,078
<b>C2</b>	0,078
<b>Q1 (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	9,24
<b>Q2 (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>	118,80
<b>Perm1 Q1 (%)</b>	4,05
<b>Perm1 Q2 (%)</b>	78,46
<b>Perm2 Q1 (%)</b>	0,80
<b>Perm2 Q2 (%)</b>	28,98

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Através da curva de permanência das vazões observadas foi possível compreender o comportamento dos valores de vazões, onde as vazões baixas são mais ocorrentes enquanto as vazões altas mais próximas ao máximo observado ocorrem com menos frequência, em até 5% do tempo como pode ser visualizado na Figura 15. A curva de permanência representa a porcentagem do tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada, nessas condições para os limites de Perm1 ( $Q1$  e  $Q2$ ) e Perm2 ( $Q1$  e  $Q2$ ) foram escolhidos conforme as vazões correspondentes:  $Q5$  (5%) e  $Q25$  (25%);  $Q10$  (10%) e  $Q40$  (40%), respectivamente.

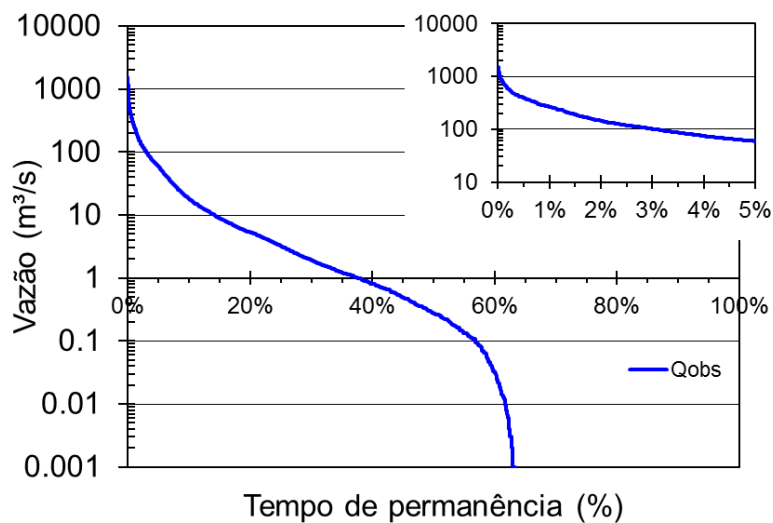


Figura 15 - Curva de permanência das vazões observadas para o período de 1970 a 2011, com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo.

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Foram realizadas um total de seis fracionamentos dos hidrogramas das vazões observadas, conforme mostra a Tabela 10. Os fracionamentos F1, F2 e F3 utilizou as FO A (funções objetivo A) usadas originalmente no modelo, NS, NSlog e  $\Delta V$ . Enquanto os fracionamentos F4, F5 e F6 usaram as FO B (funções objetivo B), EKG, NSDlog e EV, sendo esta a combinação que apresentou os melhores resultados nas calibrações citadas no item 4.3 mostrado anteriormente. A calibração realizada por Felix e Paz (2016) foi chamada de método tradicional para facilitar o entendimento entre as comparações.

Tabela 10 – Valores dos limites Q1 e Q2 e tipo de funções objetivo usados na calibração multiobjectivo de cada fracionamento

	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>FO</b>
<b>Fracionamento 1 (F1)</b>	4,05	78,05	A
<b>Fracionamento 2 (F2)</b>	0,80	28,98	A
<b>Fracionamento 3 (F5)</b>	9,24	118,80	A
<b>Fracionamento 4 (F3)</b>	4,05	78,05	B
<b>Fracionamento 5 (F4)</b>	0,80	28,98	B
<b>Fracionamento 6 (F6)</b>	9,24	118,80	B

(Fonte: Autoria própria, 2017)

#### 4.6 OTIMIZAÇÃO POR DIFERENTES PERÍODOS DO ANO

Uma forma de incrementar o processo de ajuste de um modelo hidrológico reside na adoção de conjuntos de parâmetros distintos conforme o período úmido ou de cheias e o período de estiagem ou seco. A ideia é que em bacias hidrográficas de forte sazonalidade diferentes mecanismos de geração de escoamento teriam contribuições distintas no período de mais ocorrência de chuvas do que no período seco.

Dessa forma foi proposto nesse estudo o método de calibração alternativo com o intuito de alcançar aprimoramento do processo de calibração do modelo MGB-IPH aplicado em regiões semiáridas. A calibração por período do ano compreende dividir o hidrograma das vazões observadas para calibrar em dois momentos, o período úmido ou chuvoso e seco ou estiagem. O modelo deve ser calibrado individualmente para cada um dos períodos, resultando em um conjunto de parâmetros ótimos para cada um.

O código computacional do modelo MGB-IPH foi adaptado para permitir a calibração seguindo essa abordagem. No entanto para a adaptação foi necessário analisar a série histórica de vazões da bacia hidrográfica do rio Piancó. A Figura 16 mostra as médias mensais das vazões observadas no período de 01/jan/1970 a 31/dez/2011. Pode-se observar claramente que o período chuvoso (úmido) compreende os meses de janeiro a maio, enquanto o período de estiagem (seco) fica entre os meses de junho a dezembro. Uma das características marcantes da região semiárida são os longos períodos de estiagem compreendendo a maior parte do ano, sendo estes um dos motivos que provocam a intermitência dos rios na região, um curto período de chuva e um longo período de seca.

O procedimento de calibração foi realizado separadamente para cada uma das duas faixas de vazões definidas, utilizando o algoritmo MOCOM-UA (YAPO et al., 1998) tal

qual já implementado no modelo hidrológico MGB-IPH. O critério adotado para a escolha do melhor conjunto de parâmetros em cada faixa de vazão é o mesmo utilizado no método do fracionamento do hidrograma.

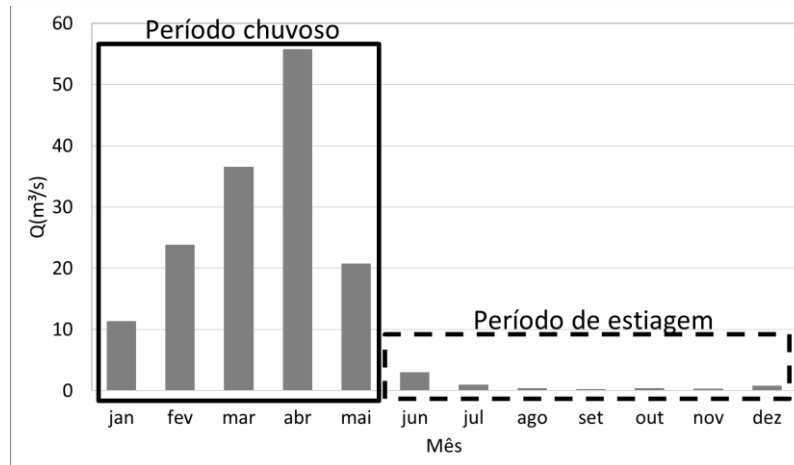


Figura 16 – Vazão média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó  
(Fonte: Autoria própria, 2017)

Para a composição dos hidrogramas de saída foi adotada a mesma metodologia proposta por Paris et al. (2011) com adaptações. As vazões de saída também foram geradas a partir da combinação linear das vazões calculadas só que em função do tempo (dia, mês).

$$Q_{s(d,m)} = \alpha_1 Q_{1(d,m)} + \alpha_2 Q_{2(d,m)} \quad (03)$$

onde  $d=1, \dots, n$ , em que  $n$  é o número de intervalos de dias da série,  $m=1, \dots, n$ , em que  $n$  é o número de intervalos de meses da série,  $Q_{s(d,m)}$  é a vazão do hidrograma de saída no instante  $d$  e  $m$ ,  $Q_{1(d,m)}$  é a vazão calculada para o período chuvoso no instante  $d$  e  $m$ ,  $Q_{2(d,m)}$  é a vazão calculada para o período de estiagem no instante  $d$  e  $m$ , e os valores  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  os pesos atribuídos a cada vazão em cada instante.

Na Figura 17 apresenta um exemplo de como é feita a definição dos valores dos pesos ( $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ ) em que foi considerada uma série com 365 dias do ano. Do dia 01 a 30 do mês de junho foi considerada a zona de transição (T1 e T2) entre as faixas de vazão do período chuvoso e estiagem. Para a escolha do período de transição é necessário ter um conhecimento

detalhado da série hidrológica de precipitação da área de estudo, bem como ter os períodos úmidos e secos bem definidos.

Assim como na abordagem anterior, a composição do hidrograma de saída foi realizada através do código computacional rodado em ambiente de programação do *software* Matlab (MATrix LABoratory), com adaptações necessárias para aplicação deste método de calibração.

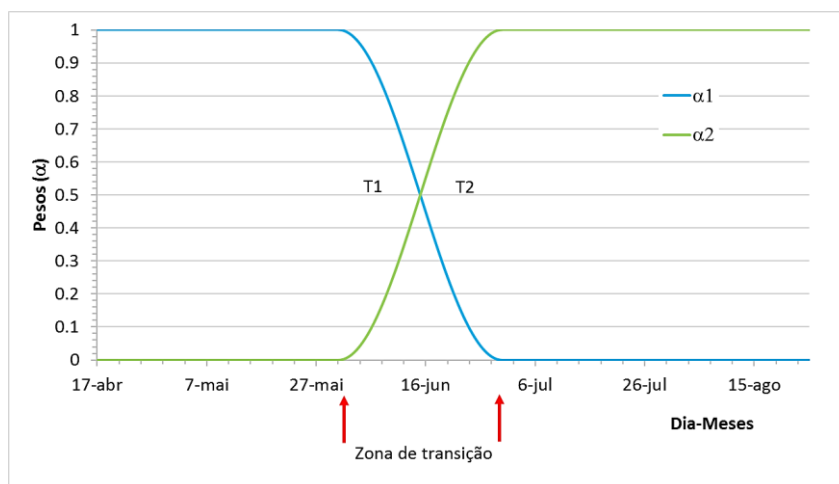


Figura 17 – Procedimento de composição do hidrograma de saída através funções lineares simples. (Fonte: Autoria própria, 2017)

A Tabela 11 mostra a quantidade de calibrações realizadas e o tipo de combinação de FO usada em cada calibração. Assim como foi o método do fracionamento citado anteriormente, a FO A (Funções objetivo A) corresponde às funções NS, NSlog e  $\Delta V$ , enquanto as funções EKG, NSDlog e EV foram designadas como FO B (Funções objetivo B). A calibração realizada por Felix e Paz (2016) com as FO (NS, NSlog e  $\Delta V$ ) originais do modelo foi chamada de método tradicional.

Tabela 11 - Tipo de FO usadas na calibração multiobjectivo de cada período

	Calibrações	FO
<b>Calibração por período do ano 1</b> (CPA 1)	Período úmido 1	A
	Período Seco 1	
<b>Calibração por período do ano 2</b> (CPA 2)	Período úmido 2	B
	Período Seco 2	

(Fonte: Autoria própria, 2017)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS FUNÇÕES OBJETIVO

A análise de sensibilidade das FO foi realizada com a utilização de series sintéticas de vazões geradas a partir da series das vazões observadas para a bacia hidrográfica do rio Piancó. Cada uma das abordagens foi selecionada para enfatizar situações hipotéticas de possíveis erros em aplicações do modelo hidrológico. O período da série de dados considerado para a análise abrange 21 anos de 01 de jan. de 1970 a 31 de dez. de 1990. Os dez testes foram realizados usando 36 funções, em que estas foram divididas em grupos para facilitar o entendimento da análise, resumidamente exposto na Tabela 12 seguinte.

Tabela 12 – Divisão das FO por grupos

<b>Grupo I</b>	<b>Grupo II</b>	<b>Grupo III</b>	<b>Grupo IV</b>	<b>Grupo V</b>
NSabs	r	NSlog	EM	DV
NSDabs	r <sup>2</sup>	NSDlog	EMQ	FCP
EMA	NS	LOGQ	REMQ	Y
Eamax	NSD		TREMQ	RV
EV	NSM		REMQAV	
EMAR	EPM		REMQBV	
ROCE	HF		DVPmax	
DCP	d		SSEMQ	
	a		SSEQ	
	$\beta$			
	EKG			
	RSR			

(Fonte: Autoria própria, 2017)

O resultado dos testes pode ser observado nas Figuras 18 - 22. O teste 0 (zero) apresenta as FO aplicadas aos dados de vazão sem modificações, dados originais obtidos diretamente do estudo de Felix e Paz (2016).

Fazendo uma breve análise na Figura 18 é notável que algumas métricas do Grupo I como NSabs, NSDabs e EV produziram resultados muito semelhantes entre os testes, principalmente, nos testes 3 (OBS + Q50), 4 (OBS - Q50) e 5 (OBSchuvoso), com valores praticamente idênticos. Nos testes 3 e 4 isso acontece porque o erro entre as vazões observadas e sintéticas envolve um número muito pequeno referente a Q50 (0,23 m<sup>3</sup>/s) quanto representava no total dos somatórios dos quadrados. Com relação ao teste 5

(OBSchuvoso), implica em praticamente nenhum erro entre as vazões mais altas e alguns pequenos erros nas vazões mais baixas, justificando a maior sensibilidade dessas métricas as vazões altas. Pois, é possível perceber claramente a existência de correlação entre essas métricas, além de uma considerável tendência a serem melhor estimadas quando os erros entre as vazões observadas e sintéticas são menores nas vazões mais altas, como mostra o teste 5 (OBSchuvoso). É interessante mencionar que apesar das métricas NSabs, NSDabs e EV (Figura 18 A, B e C) terem apresentado ótimos índices nos testes mencionados anteriormente, nos demais não foi observado o mesmo desempenho.

Alguns testes trazem algumas características singulares, como por exemplo o teste 1 (OBS\*2), em que as vazões sintéticas são o dobro das vazões observadas tendo uma perfeita distinção dentre dias de maior ou menor geração de vazão, momento exato de cada pico, mas tem o erro sistemático de errar sempre pelo dobro, ou seja, se fosse um modelo ele estaria gerando o dobro do escoamento em relação ao observado. Em função dessas características, o NSDabs e EV punem drasticamente essa série, e EV fica com valor mínimo de zero já que essas métricas são dominadas pelos erros nas vazões altas, como também devido aos somatórios das vazões resultar em valor igual a 1 o que provocaria valores de EV muito próximos de zero. Mas, em comparação a métrica, assim obtém desempenho igual ao modelo alternativo e por isso é zero.

Por outro lado, percebe-se que nos testes 7 ( $\overline{OBS}$ ), 8 ( $\overline{OBS_{mês}}$ ), 9 ( $\overline{OBS_{(mês)ano}}$ ) e 10 ( $\overline{OBS_{diários}}$ ) as métricas NSabs, NSDabs e EV demonstraram valores inferiores aos demais testes. As duas primeiras métricas medem o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar um modelo de referência, isto é, considera a média das vazões observadas e a média mensal das vazões observadas. Nos testes mencionados estas métricas foram muito penalizadas chegando a produzir valores mínimos de zero. Decorrente do fato que nos testes de 7 ( $\overline{OBS}$ ) a 10 ( $\overline{OBS_{diários}}$ ) as vazões sintéticas são constituídas por meio de valores médios (média total, diária, mensal, etc.) da série de dados das vazões observadas. Por exemplo, no teste 7 ( $\overline{OBS}$ ) as vazões sintéticas são representadas pela média total das vazões observadas. Isso implica supostamente em um modelo que eventualmente erra por assumir valores sempre igual à média das vazões observadas, ou seja, sempre estaria gerando um escoamento médio referente as vazões observadas. Desse modo, não há variabilidade das vazões e também não há uma nenhuma distinção dentre dias de maior ou menor geração de vazão.

Ao observar as Figuras 18-22 percebe-se que a maioria das métricas que utilizam na sua formulação valores médios das vazões observada para normalizar o erro entre as vazões observadas e sintéticas quando submetidos aos testes de 7 ( $\overline{OBS}$ ) a 10 ( $\overline{OBS_{diários}}$ ) tais apresentaram valores relativamente baixos quando comparados aos demais testes, como o caso das métricas NSabs, NSDabs e EV. Embora EV não tenha nenhum valor médio no seu cálculo também apresentou características semelhantes às métricas mencionadas para tais testes.

Muleta (2012) argumenta em seu estudo que EV é um critério muito conservador, pois uma solução que leva ao maior valor de EV é susceptível de produzir valores mais desejáveis de outros critérios de eficiência também. No entanto, EV parece ser um critério rigoroso pois as soluções que podem ser facilmente consideradas satisfatórias utilizando, por exemplo NS, geralmente produzem valores pobres do EV.

As métricas EMA e AEmax também apresentaram maior sensibilidade às vazões altas do que às vazões baixas. Valores mais elevados dessas métricas foram observados nos testes 1 ( $OBS \times 2$ ), 7 ( $\overline{OBS}$ ), 8 ( $\overline{OBS_{mês}}$ ), 9 ( $\overline{OBS_{(mês)ano}}$ ) e 10 ( $\overline{OBS_{diários}}$ ). Na Figura 18F observa-se que o conjunto de dados apresenta maior amplitude para o AEmax, isso decorre devido esta ser uma estatística de erro não pontual, ou seja, calcula o erro entre as vazões observadas e calculadas em diferentes momentos do hidrograma, diferentemente do EMA que é calculado a partir de erros pontuais.

Já às métricas ROCE e DCP apresentaram melhores desempenhos nos testes 3 ( $OBS + Q50$ ), 4 ( $OBS - Q50$ ), 5 ( $OBS_{chuvoso}$ ) e 6 ( $OBS_{sestagem}$ ). Figura 18G e 18H. A métrica EMAR apresentaram valores demasiadamente altos em todos os testes realizados, em decorrência dos baixos valores das vazões no denominador. Em função da intermitência ser uma característica do rio Piarcó (valores das vazões observadas é zero durante cerca de 70% do ano), há duas opções: não contabilizar esse dia, o que faz ignorar o erro do modelo; ou somar um valor bem pequeno artificialmente às vazões, mas que induziu a um resultado bem elevado – quanto menor esse valor. Com isso, as métricas EMAR e RV acabaram sendo sacrificadas ao apresentar valores extremamente altos.

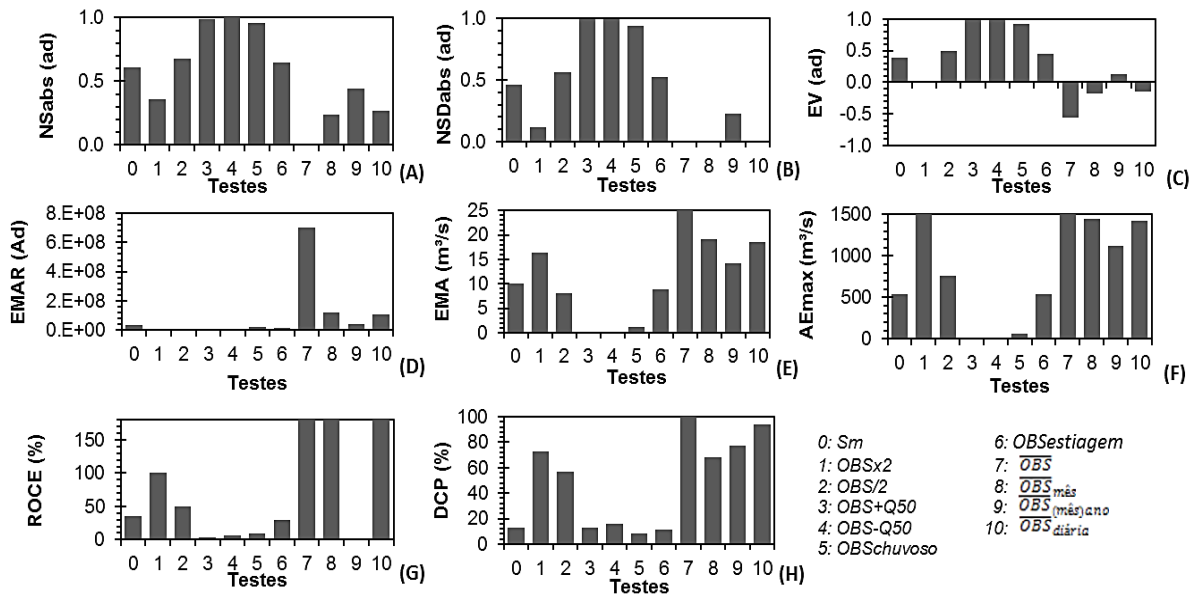


Figura 18 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo I para os 10 testes realizados.

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Algumas métricas do grupo II apresentaram-se altamente correlacionadas, por exemplo,  $r$  com  $r^2$ , NS, NSD, NSM, EKG, HF, D e  $\alpha$  (Figura 19), tendo em vista que apresentaram valores próximos entre si ao longo dos testes, ou seja, para cada teste, os valores ou o comportamento dessas métricas foi semelhante entre si. Geralmente, estas métricas que minimizam o quadrado dos resíduos são sempre sensíveis às vazões altas, podendo simular com mais precisão a estação chuvosa, segundo Muleta (2012).

Assim como mencionado anteriormente algumas métricas não responderam bem aos testes de 7 ( $\overline{OBS}$ ) a 10 ( $\overline{OBS}_{diários}$ ). No Grupo II também observa-se que a maioria das métricas (com exceção de RSR) apresentaram valores menores que 0,5, indicando um ajuste não adequado entre as vazão observadas e sintéticas. As métricas NS, NSD e NSM também fazem comparação de erros entre vazões observadas e sintéticas com as médias (média total, diária e mensal) dos dados de vazão da série hidrológica. Esse é um dos possíveis motivos para estas métricas não apresentaram bons índices nos testes de 7 ( $\overline{OBS}$ ) a 10 ( $\overline{OBS}_{diários}$ ) constituídos por séries sintéticas dadas por vazões médias.

Na sua composição NSM faz referência à média mensal de cada ano. No seu cálculo, os erros entre as vazões observadas e sintéticas são normalizados pelos erros entre as vazões observadas e a média mensal de cada ano das vazões observadas. Ou seja, faz a comparação de qualidade do desempenho do ajuste entre os pontos tendo como referência a média mensal

de cada ano da série de dados hidrológicos. Observa-se na Figura 21F que o teste 9 ( $\overline{OBS}_{(mês)ano}$ ) essa métrica apresenta valor mínimo de zero, isso acontece porque para este teste as vazões sintéticas são iguais as médias mensais a cada ano das vazões observadas.

Também é possível observar que para a maioria das métricas do Grupo II os testes 1 ( $OBSx2$ ) e 7 ( $\overline{OBS}$ ) apresentaram Índices de comportamento mais distintos ao se comparar com os demais testes, isto é, os testes mencionados penalizaram a maioria das métricas, principalmente, com relação ao teste 7 ( $\overline{OBS}$ ) (Figura 19). Já os melhores resultados foram apresentados pelas métricas  $r$ , HF, D,  $\alpha$  e EKG, que apresentaram valores de eficiência mais próximos do valor ótimo desejável na maioria dos testes realizados. Todavia, quase todas as soluções produziram valores elevados  $r$ ,  $R^2$ , HF e D, sendo este um indicativo que essas métricas podem ser menos adequadas para descrever o desempenho de um modelo segundo Muleta (2012) e Wolling et al. (2013).

Além disso, percebe-se ainda que a maior parte das métricas do Grupo II apresentam diferença entre os testes 5 (OBSchuvoso) e 6 (OBSestiagem). Como as métricas desse grupo tendem a ser mais sensíveis as vazões altas a maior parte dos resultados apresentaram-se melhores no teste 5 (OBSchuvoso). Ambos os testes 5 (OBSchuvoso) e 6 (OBSestiagem) foram pensados de forma que pudesse verificar à capacidade da métrica em valorizar de forma diferente erros no período chuvoso (vazões altas) e no período de estiagem (vazões baixas). O teste 5 (OBSchuvoso) exemplifica um modelo que sempre gera escoamento igual ao observado no período chuvoso, errando para o período de estiagem. Na gestão dos recursos hídricos um modelo desse tipo teria grande vantagem em projetos, por exemplo, de controle de enchentes. Já o teste 6 (OBSestiagem) teria vantagem para estudos de disponibilidade hídrica, em que interessam as vazões menores.

As métricas PME,  $\beta$  e RSR conferem os piores valores de eficiência do grupo II, ver Figura 19F, 19J e 19L. Os valores de  $\beta$  apresentaram-se bem inferiores às demais métricas em todos os testes, isto denota que não representa uma métrica adequada para descrever o desempenho do ajuste entre as vazões observadas e calculadas.

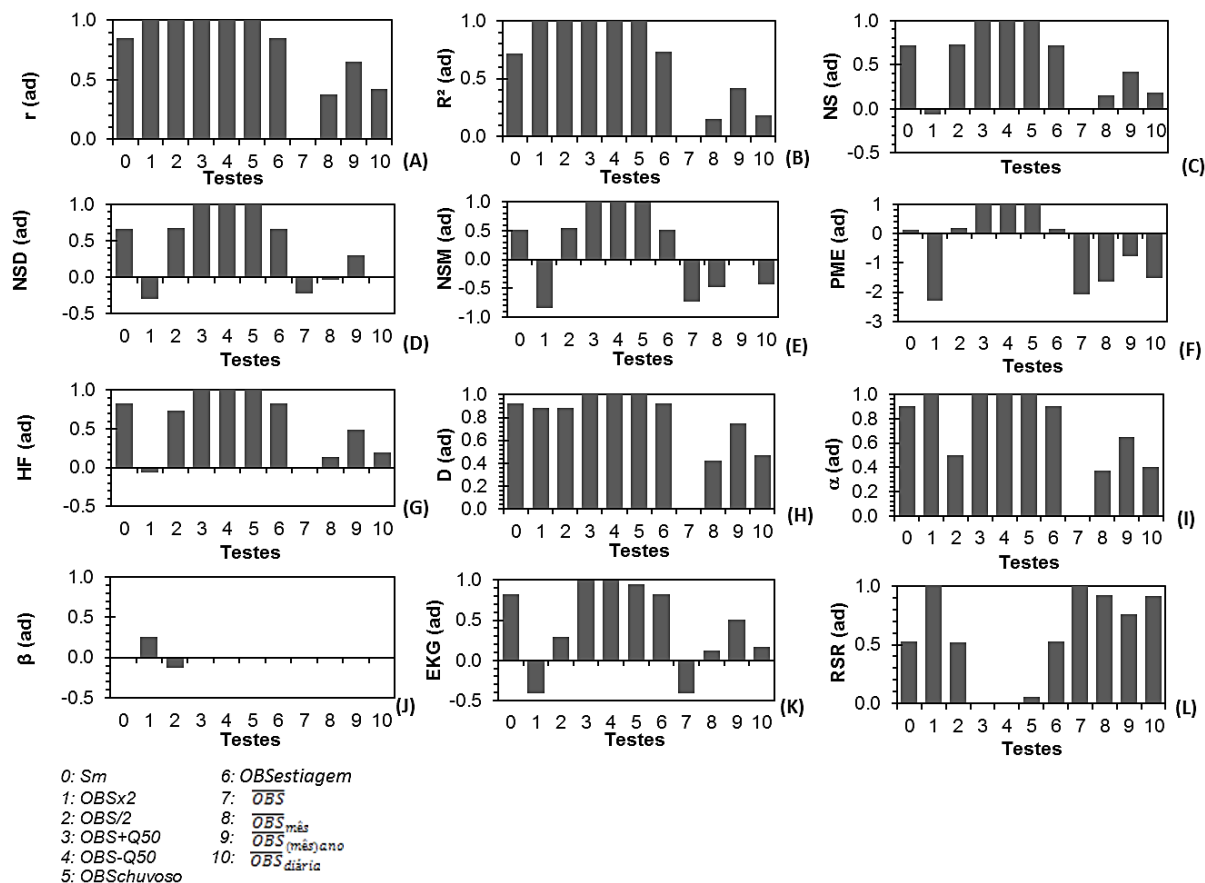


Figura 19 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo II para os 10 testes realizados.  
 (Fonte: Autoria própria, 2017)

A Figura 20 expõe os gráficos das métricas do Grupo III, na qual pode-se observar comportamento semelhante para a maioria dos testes, embora o NSDlog apresentou resultados relativamente melhores do que o NSlog. Também fica evidente na figura que a performance das métricas NSlog e NSDlog é mais sensível às vazões baixas, pois ao comparar o teste 5 ( $OBS_{chuvoso}$ ) e 6 ( $OBS_{estiagem}$ ) as métricas indicam melhores resultados ao teste 6 ( $OBS_{estiagem}$ ), enquanto o teste 5 ( $OBS_{chuvoso}$ ) remete valores de eficiência inferiores.

As funções com logaritmo são mais sensíveis às vazões baixas de forma que quanto menor a vazão, o erro nessa estimativa deteriora ainda mais o valor do índice de performance. Vale salientar que esse é um dos principais problemas na simulação de vazões de bacias hidrográficas que tem como característica rios intermitentes, pois é muito comum

a ocorrência de vazões nulas. A presença dessas vazões sacrifica um pouco o cálculo dessas estatísticas, conseqüentemente, a representação da intermitência do rio é dificultada.

Muleta (2012) também observou valores de NSlog e NSDlog com baixo desempenho em seu estudo na bacia hidrográfica experimental Rio Little, Georgia – EUA, onde atribuiu esse problema ao fato do Rio Little ser um rio intermitente e que ambas as métricas NSlog e NSDlog são altamente sensíveis a baixas vazões. As series de dados que obtenham melhores valores de NSlog e NSDlog, no entanto, parecem resultar em um desempenho inferior quando julgado por outros critérios de eficiência (MULETA, 2012).

A métrica LOGQ apresentou valores de eficiência extremamente elevados em decorrência da mesma situação mencionada anteriormente do EMAR. As vazões nulas presentes no período de estiagem sacrificam muito esta métrica, a presença de zeros na série de dados impossibilita a eficiência da métrica.

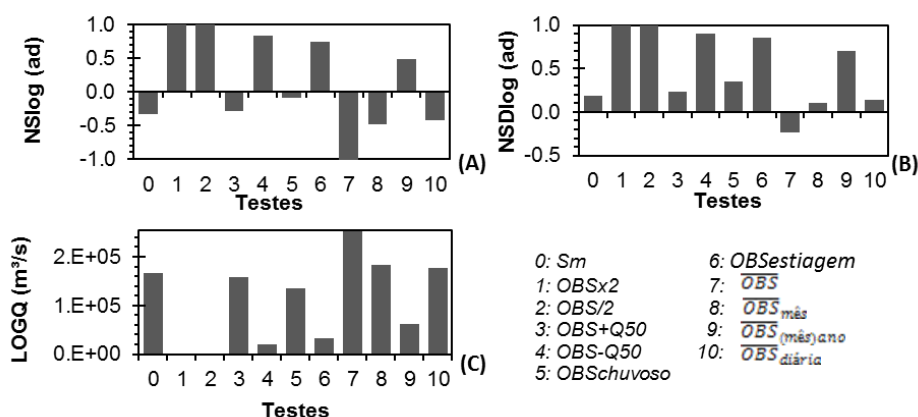


Figura 20 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo III para os 10 testes realizados. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Métricas como EM, EMQ, REMQ, TREMQ, REMQav e REMQbv (Figura 21) por serem estatísticas dimensionadas possuem dependência de escala, podem ser úteis dependendo do objetivo desejado. Esses tipos de métricas são importantes conter em uma análise, pois permitem que o significado hidrológico seja quantificado e avaliado. Por exemplo, um REMQ de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  pode ou não ser hidrológicamente significativo. Ou seja, se as descargas medidas variaram de 50 a  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , então a precisão sugerida pelo baixo REMQ é considerada boa. Inversamente, se as descargas variaram de 1,5 a  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , o erro esperado de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  é demasiadamente grande para ser considerado preciso ao modelo (MCCUEN, 2016).

As métricas do Grupo IV estão expostas na Figura 21. Percebe-se que os testes de 3 (OBS + Q50) a 5 (OBSchuvoso) apresentaram erros menores quando comparados aos demais testes. Nos testes 3 (OBS + Q50) e 4 (OBS - Q50) é adicionado o valor da Q50 (0,23 m<sup>3</sup>/s) às vazões observadas em todos os valores das vazões sintéticas, ou seja, o modelo gera escoamentos iguais ao observado sendo adicionados (teste 3) e subtraído (teste 4) o valor da Q50. O que implica em um pequeno aumento/diminuição no valor das vazões observadas, resultando em erros mínimos entre as vazões observadas e sintéticas como era esperado explicando assim os baixos valores das métricas para estes testes. Outra provável influência adicional seja que ao elevar ao quadrado um número menor que 1 este número se tornará ainda menor, por exemplo, para (0,23)<sup>2</sup> temos 0,053.

TREMQ, REMQav e REMQbv são métricas modificadas para adequar-se há diferentes faixas do hidrograma das vazões observadas (vazões altas e baixas). Na Figura 21 REMQav apresentou maior sensibilidade aos erros nas vazões altas como pode ser visto nos testes 5 (OBSchuvoso) e 6 (OBSestiagem). Os resultados confirmam que TREMQ e REMQbv punem mais os erros nas vazões baixas do que nas vazões altas. Isto favorece a proposta dessas métricas, de valorizar a importância das baixas vazões.

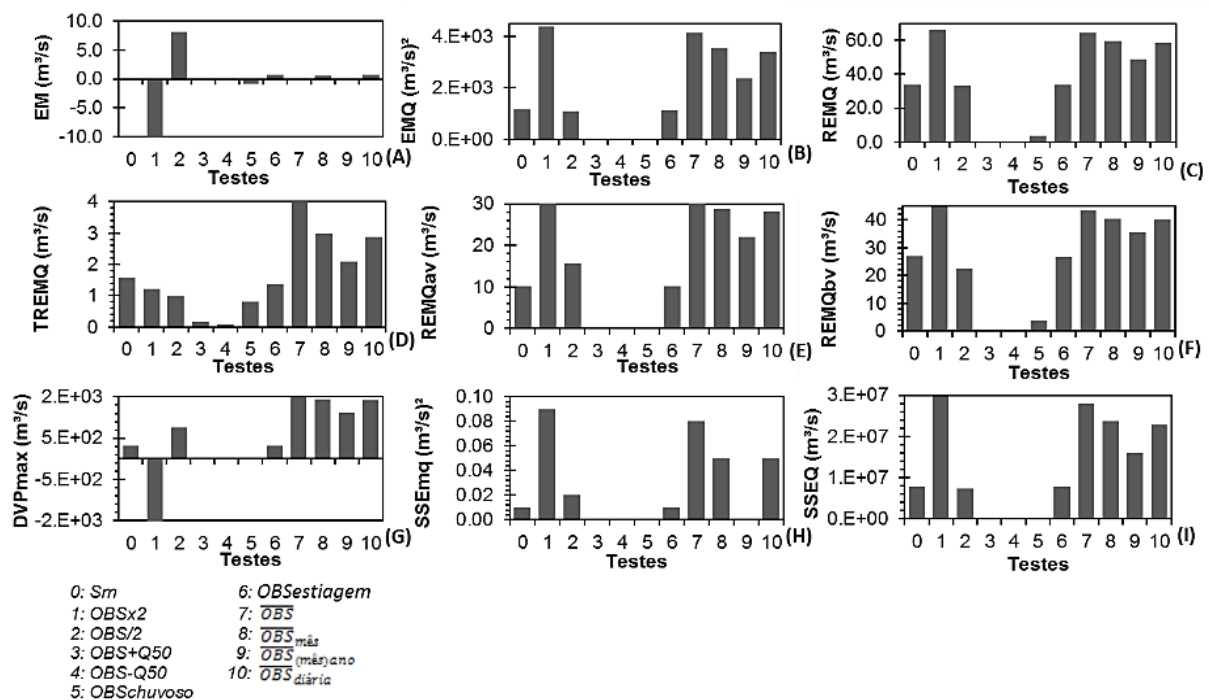


Figura 21 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo IV para os 10 testes realizados. (Fonte: Autoria própria, 2017)

As métricas EM e SSEmq obtiveram os menores valores de eficiência entre as métricas do Grupo IV não distinguiram os desempenhos dentre diferentes series sintéticas dos testes. Principalmente, com relação a métrica SSEmq por sua unidade de medida em  $(m^3/s)^2$  não ter uma significado hidrológico adequado.

O Grupo V representa as funções sensíveis aos erros de volume ( $\Delta V$ ) e as modificadas e/ou combinadas (FCP, Y e RV). Na Figura 22 é apresentado os resultados de eficiências dessas métricas para os 10 testes realizados. Observa-se que  $\Delta V$  apresentou valores bem elevados nos testes 1 (OBSx2) e 2 (OBS/2), enquanto para demais não teve muita variação, obteve-se valores inferiores a 5% indicando boa qualidade do ajuste entre as vazões observadas e sintéticas, segundo a classificação de Rientjes et al. (2013).

Os testes 1 e 2 foram os que apresentaram os maiores erros de volume escoado, a sensibilidade dessa métrica com relação a modelos que geram escoamentos para o dobro ou para a metade das vazões observadas, implica em um acúmulo de erros que acaba sacrificando muito  $\Delta V$  nestas condições.

Para a maioria dos testes,  $\Delta V$  não apresentou grandes problemas como observado nas demais métricas dos Grupos discutidos anteriormente, com erros relativamente baixos (menor que 5%). Nos testes 3 (OBS + Q50) e 4 (OBS - Q50) a influência da Q50 é mínima no computo do volume total escoado. Nos testes 5 (OBSchuvoso) e 6 (OBSestigem) os valores pequenos mostrando qualidade em representar o volume pelas series originais calculadas pelo MGB-IPH, seja no período chuvoso ou estiagem.

A métrica FCP, que quantifica o fator de aproximação entre as curvas de permanências das vazões observadas e sintéticas, observa-se que no teste 1 (OBSx2) não demonstrou a mesma qualidade de ajuste que os demais testes, punindo a métrica drasticamente. Isso ocorre porque na formulação do FCP tem a soma dos desvios entre vazões das curvas de permanência observadas e sintéticas. Ao dobrar  $Q_{obs}$ , o erro foi muito grande e foi penalizado. Por outro lado, no teste 2 (OBS/2), esse erro introduzido não é tão penalizado, pois o rio é intermitente e já tem valores nulos na curva de permanência para uma certa faixa de vazões.

A métrica Y seguiu o mesmo padrão de NS em consequência da sua formula fazer relação entre NS e  $\Delta V$ , essa dependência provocou a semelhança entre o padrão apresentado nas Figuras 19C e 22C. Apesar de Y ser normalizado por  $\Delta V$  não houve grande influência

no padrão observado entre as figuras, ou seja, os resultados de Y quando comparados com NS não apresentaram grandes diferenças.

Com relação à métrica combinada RV, observa-se que em todos os testes, este apresentou valores de eficiência muito distante do valor ótimo desejado para esta métrica. Isto configura-se a consequência das características da série hidrológica da região, pois as vazões nulas (vazão zero) observadas durante a maior parte dos anos (caraterística comum de regiões semiáridas) deteriorou significativamente a eficiência da métrica EMAR. Por esse motivo a presença do EMAR na formulação da métrica RV agregou o mesmo problema discutido anteriormente.

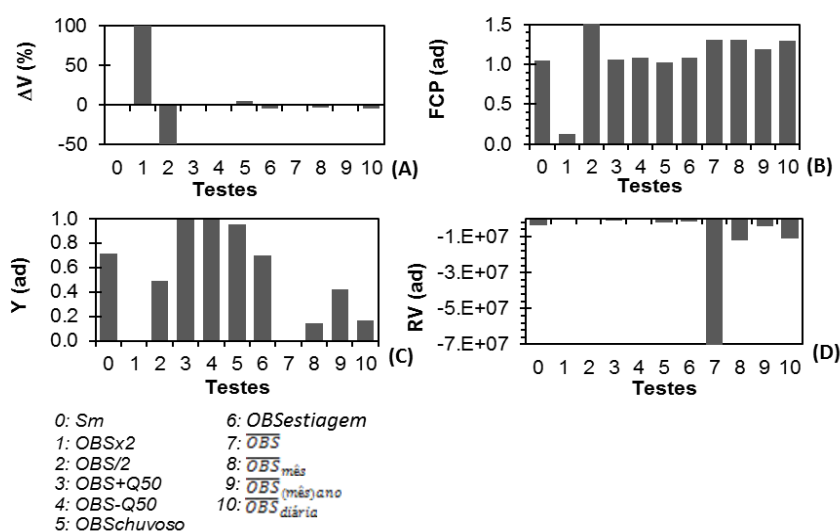


Figura 22 – Análise de sensibilidade das métricas do Grupo V para os 10 testes realizados.

(Fonte: Autoria própria, 2017)

No geral, os testes 7 ( $\overline{OBS}$ ), 8 ( $\overline{OBS_{mês}}$ ), 9 ( $\overline{OBS_{(mês)ano}}$ ) e 10 ( $\overline{OBS_{diários}}$ ) fazem referência às vazões observadas e às vazões sintéticas representadas pelas médias da série de dados das vazões observadas. Percebe-se que os melhores valores para a maioria das métricas se concentraram no teste 9, por esse motivo esta série de dados foi utilizada como modelo de referência para o cálculo da métrica NSM, sendo estas as médias mensais a cada ano especificamente. O mesmo parece ser um modelo alternativo muito eficiente, porém de ser impossível de utiliza-lo em, por exemplo, tempo real.

Além disso, o desempenho da maioria das funções objetivo do Grupo I (aquelas que minimizam os desvios absolutos), isto é, NSabs, NSDabs, EV e EMA, foram mais robustas

quando comparadas aos demais critérios, pois uma mesma solução ideal produziria provavelmente valor NS mais perto de 1,0 do que para NSD.

De modo geral, algumas funções não apresentaram bons resultados, como por exemplo, às métricas  $\beta$ , EMQ, LOGQ e SSEQ. Outras métricas não se adequaram ao propósito principal deste estudo como foi o caso de PEM, Eamax e dVPmax, e outras não foram apresentadas uma compreensão exata do seu significado como o SSEmq.

As FO modificadas RSR, TREMQ, REMQav, REMQbv e Y apresentaram resultados relativamente razoáveis em boa parte dos testes realizados. Essas métricas podem vir a ser algumas alternativas a serem aplicadas ao modelo MGB-IPH. Principalmente, TREMQ e REMQbv que são funções sensíveis as baixas vazões, sem a problemática que envolve as funções que utilizam o logaritmo dos valores das vazões observadas e calculadas.

Diante esse contexto, foram selecionadas algumas métricas de cada grupo para serem testadas na calibração automática multiobjetivo do modelo MGB-IPH, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 – Seleção das FO para as calibrações automáticas multiobjetivo do modelo MGB-IPH

Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V
Nsabs	NS	NSlog	REMQ	$\Delta V$
NSDabs	NSD	NSDlog	REMQav	FCP
EMA	NSM		REMQbv	
EV	HF		TREMQ	
DCP	D			
	EKG			
	RSR			

(Fonte: Autoria própria, 2017)

## 5.2 ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO MULTI OBJETIVO AUTOMÁTICA

### 5.2.1 Aspectos gerais

Nesta seção são apresentados os resultados referentes aos ajustes do modelo MGB-IPH com diferentes FO. Neste estudo foram desenvolvidos 111 ajustes do tipo automático multiobjetivo, no qual cada calibração teve a combinação de três FO diferentes.

Segundo Krause et al. (2005), o processo de avaliação do desempenho de um modelo hidrológico exige que o hidrólogo faça estimativas subjetivas e/ou objetivas da "proximidade" do comportamento simulado do modelo às observações (tipicamente de vazões) feitas dentro da bacia hidrográfica.

A abordagem mais fundamental para avaliar o desempenho do modelo em termos de comportamentos é através da inspeção visual dos hidrogramas calculados e observados. Nesta abordagem, podem ser formuladas avaliações subjetivas do comportamento do modelo que estão geralmente relacionadas com o comportamento sistemático (por exemplo, super ou subestimação) e dinâmico (por exemplo, escoamento superficial, subsuperficial e de base) do modelo. A avaliação objetiva, no entanto, geralmente requer o uso de uma estimativa matemática do erro entre a(s) variável(s) hidrológica(s) simulada(s) e observada(s), ou seja, critérios objetivos ou de eficiência (KRAUSE et al., 2005).

Desse modo, na tentativa de atender ambas abordagens, de subjetividade e a objetividade, para analisar o desempenho do modelo com as adaptações com diferentes funções objetivos nas calibrações realizadas, foi adotado o procedimento de comparação visual de gráficos de boxplot, gráficos de dispersão, gráficos da curva de permanência e de hidrogramas. E também foram utilizadas análises estatísticas com 21 medidas de desempenho para avaliar a adequação entre as vazões observadas e calculadas pelo modelo (Tabela 14). As calibrações que se mantiveram em concordância com estes critérios, ou com a maioria deles, foram consideradas com ajustes melhores.

Tabela 14 – Medidas de desempenho utilizadas para avaliar o ajuste das vazões pelo modelo MGB-IPH

<b>Medida de desempenho</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NS</b>	<b>NSlog</b>	<b>NSabs</b>	<b>NSD</b>	<b>NSDlog</b>	<b>NSDabs</b>	<b>NSM</b>	<b>EKG</b>	<b>HF</b>
Valor Ótimo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unidade	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad
<b>Medida de desempenho</b>	<b>D</b>	<b>EMA</b>	<b>REMQ</b>	<b>REMQav</b>	<b>REMQbv</b>	<b>TREMQ</b>	<b>RSR</b>	<b>ΔV</b>	<b>EV</b>	<b>Y</b>	
Valor Ótimo	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Unidade	ad	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	ad	ad	ad	ad	

(Fonte: Autoria própria, 2017)

A análise dos resultados foi realizada conforme a organização da Tabela 8, no qual esta compreende um total de 12 colunas e 8 linhas, cada coluna variou apenas a FO2 e FO3

resultando em 8 conjuntos de combinação por coluna. Em cada coluna foi selecionada a calibração com melhor ajuste quando comparada com as demais calibrações da mesma coluna. Assim, restaram doze melhores resultados (um para cada coluna), os quais foram por fim reduzidos a três melhores calibrações, através de comparações entre si. A discussão de alguns resultados é apresentada a seguir.

Analisando os hidrogramas das calibrações realizadas observou-se que o modelo MGB-IPH conseguiu reproduzir satisfatoriamente o comportamento geral do hidrograma observado, em termos da sazonalidade das vazões, da distinção de anos mais secos e anos mais úmidos, do instante de tempo de subida e descida dos hidrogramas e da intensidade das cheias de pequeno e médio porte na maioria das calibrações realizadas. Esse comportamento foi semelhante em todas as aplicações do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Piancó tanto no período de calibração (Figura 23) quanto no período de validação (Figura 24).

Os hidrogramas de algumas calibrações são mostrados a seguir, destacando a capacidade do modelo na representação dos três anos hidrológicos mostrados nessas figuras para o período de calibração (1984 a 1986) e para o período de validação (2002 a 2005) para uma melhor visualização dos ajustes nos picos e nas recessões. A Figura 23 mostra o hidrograma da CALIB 22 na qual a combinação das FO foram RSR, REMQbv e  $\Delta V$  (ver Tabela 8) sendo este um dos piores resultados entre as várias calibrações realizadas. Enquanto na Figura 23B e 23C observa-se os dois dos melhores resultados, apesar de mínimas é possível perceber as diferenças entre os hidrogramas. No lado direito superior observa-se um zoom para as vazões mais elevadas do hidrograma e no lado direito inferior têm-se um zoom para as vazões mais baixas.

Na Figura 24 observa-se os hidrogramas do período de validação, onde pode-se observar que com a utilização do modelo MGB-IPH alguns picos máximos foram superestimados (Figura 24B e 24C) e subestimou alguns picos de vazões com 250 m<sup>3</sup>/s. No geral a validação foi considerada adequada para a maior parte das calibrações realizadas, pois segundo Collischonn (2001) quando a qualidade dos resultados não se reduz substancialmente, o modelo é considerado verificado e suficientemente bom para ser aplicado.

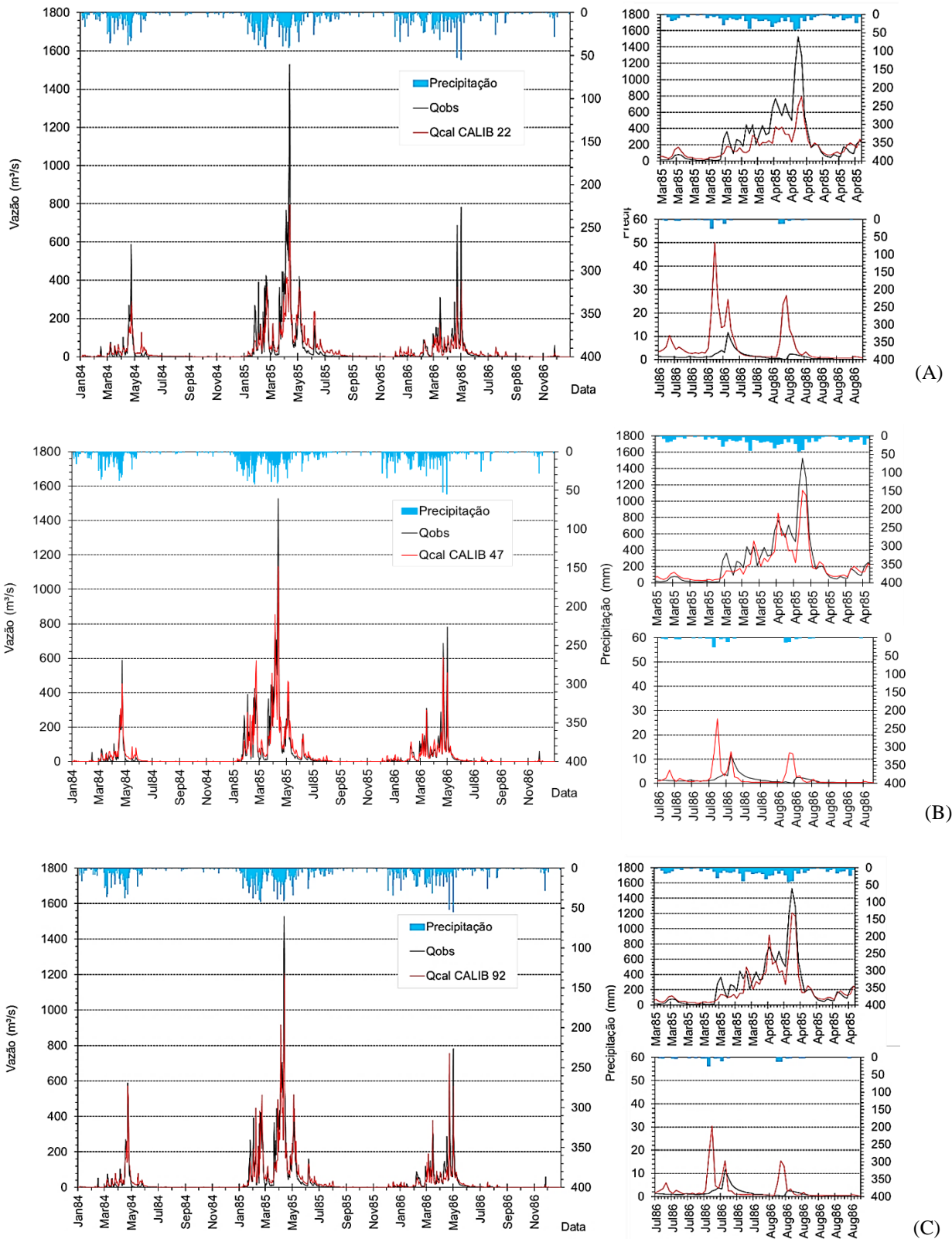


Figura 23 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração: (A) CALIB 22; (B) CALIB 47 e (C) CALIB 92. (Fonte: Autoria própria,

2017)

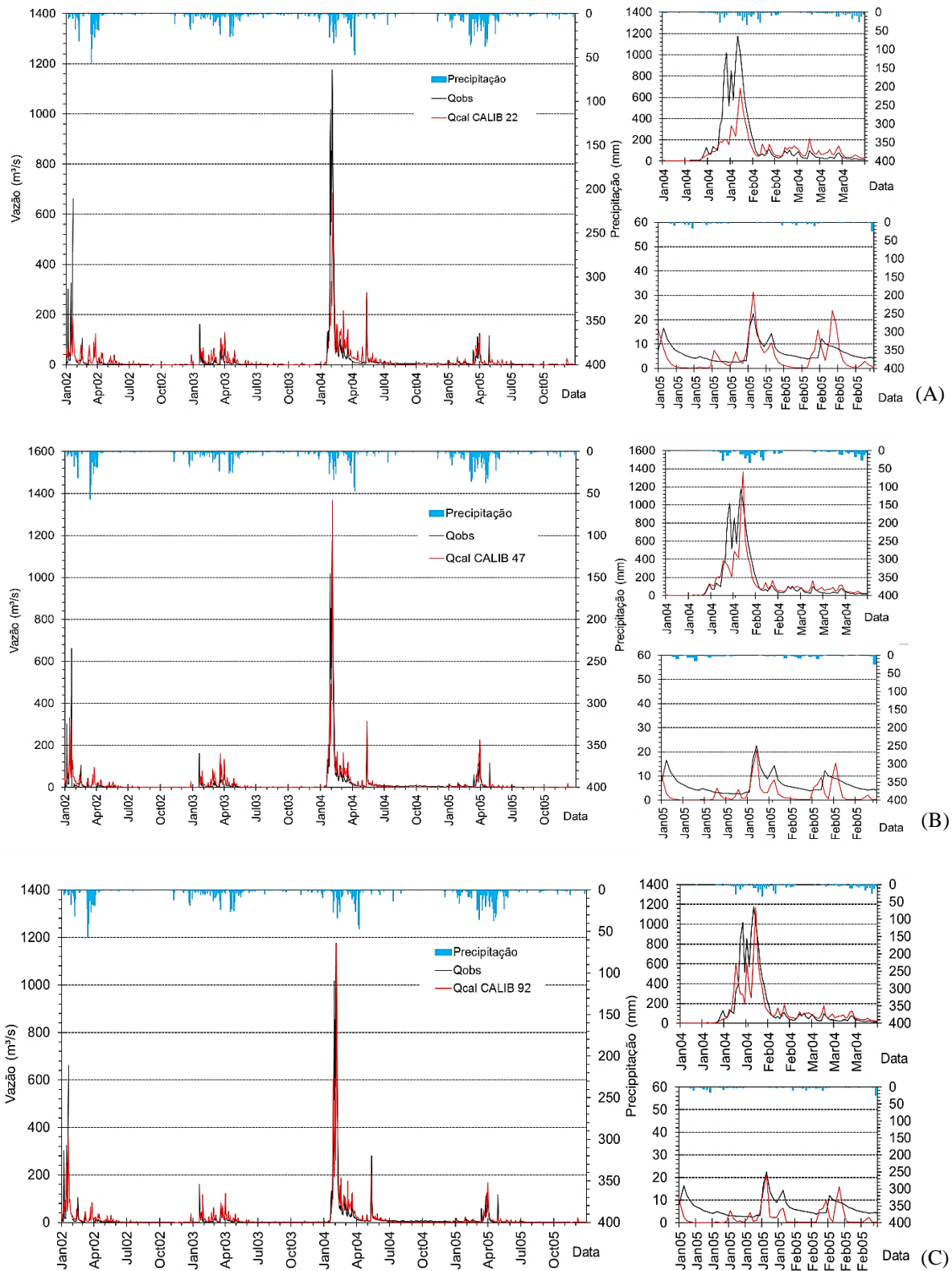


Figura 24 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de validação: (A) CALIB 22; (B) CALIB 47 e (C) CALIB 92. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Na Tabela 15 e 16 estão expressos os resultados das medidas de desempenho aplicadas para avaliar o desempenho do MGB-IPH na simulação do escoamento para a área estudada nos períodos de calibração e validação, respectivamente. A CALIB 00 (NS, NSlog e  $\Delta V$ ) representa os valores das medidas de desempenho que avaliam o ajuste entre os hidrogramas observados e calculados na calibração realizada por Felix e Paz (2016). Além disso, a última coluna apresenta os valores ótimos desejados para cada uma das medidas de desempenho analisadas.

A maioria das medidas de desempenho apresentaram resultados satisfatórios na avaliação do ajuste entre as vazões observadas e calculadas, por exemplo, R e R<sup>2</sup> variaram entre 0,85 a 0,87 e 0,72 a 0,76, respectivamente. Observa-se que o grau de associação entre as variáveis analisadas obteve valores mais próximos do valor ótimo desejado para essas métricas, pois ambas se mantiveram superiores a 0,70, configurando um desempenho satisfatório (Tabela 15). Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de modelagem hidrológica por Nunes et al. (2014a) e Nunes et al. (2014b) com a aplicação dos modelos SMAP e Tank Model na bacia hidrográfica do rio Piancó, com modelo rodado em passo de tempo mensal valores de R de 0,86 e 0,80, respectivamente. É importante mencionar que um modelo calibrado a nível mensal sempre irá fornecer melhores valores das medidas de desempenho do que a nível diário. Já Silva et al. (2015), aplicaram o modelo SWAT para a estimativa da vazão, também rodado em passo de tempo mensal, em duas estações Abreus e Juazeiro localizada na região do Submédio do Vale do rio São Francisco parte da bacia hidrográfica inserida na região semiárida do nordeste brasileiro, obtiveram R<sup>2</sup> de 0,50 e 0,76 para as respectivas estações.

O NS, NSD e NSM possuem fórmulas semelhantes, porém com algumas peculiaridades. NS permaneceu variando entre 0,70 a 0,74 condizendo com um desempenho satisfatório para esta métrica. Contudo NSD e NSM, permaneceram com valores ligeiramente mais inferiores, variando de 0,64 a 0,69 e de 0,49 a 0,56, respectivamente. Assim, como NSabs e NSDabs que variaram de 0,61 a 0,64 e 0,42 a 0,50, respectivamente. Os valores de NS = 0,73 e 0,60 também foram obtidos por Nunes et al. (2014a) e Nunes et al. (2014b), respectivamente, em aplicação de modelo hidrológico na bacia hidrográfica do Rio Piancó, sendo calibrado em passo de tempo mensal.

Em geral, os valores das medidas de desempenho mostram que o ajuste do modelo permanece bom nas calibrações realizadas nesta pesquisa em relação ao resultado original

de Felix e Paz (2016). Entretanto, os valores de eficiência de NSlog e NSDlog apresentaram-se relativamente baixos, indicando que as representações das vazões baixas calculadas pelo modelo hidrológico não demonstraram um bom ajuste às vazões observadas.

Com relação a REMQbv e a TREMQ, estes não possuem a mesma problemática que envolve NSlog e NSDlog por considerarem os valores logaritmos das vazões. Entretanto, REMQbv apresentaram valores pouco satisfatório, pois variaram entre 24,63 a 28,58 m<sup>3</sup>/s. Os valores de TREMQ variaram entre 1,46 a 1,68, também um pouco distante valor ótimo desejado para esta métrica (que é zero). É considerável destacar que a intermitência do rio Piancó continua dificultando a representação das baixas vazões em todas as calibrações realizadas na análise das medidas de desempenho.

Além disso EMA e REMQav apresentaram resultados semelhantes aos valores de Felix e Paz (2016) (CALIB 00). Os valores de EMA e REMQav permaneceram variando de 9,21 a 10,77 m<sup>3</sup>/s e 9,21 a 13,94 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Já REMQ manteve-se variando com valores mais elevados, acima de 30 m<sup>3</sup>/s. RSR faz uma comparação sobre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados, quanto mais próxima de zero melhor a métrica. Observa-se que os valores de RSR para as 12 melhores calibrações variaram de 0,50 a 0,54. No mesmo estudo de Silva et al. (2015) citado anteriormente, aplicado em parte da bacia hidrográfica do rio São Francisco foi encontrado EMA de -0,02 e 16,4 m<sup>3</sup>/s, na estimativa das vazões nas estações Abreus e Juazeiro, respectivamente. Zhang et al. (2016) em seu estudo na região semiárida do noroeste da China, no qual foi aplicado modelo hidrológico distribuído HEQM em duas estações Xiamentai e Jiutiaoling, obtiveram valores de REMQ de 1,73 e 6,60 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, em passo de tempo diário. Foi observado que os padrões de convergência foram ligeiramente diferentes entre estas duas estações. Comparando com os valores obtidos neste estudo e em Felix e Paz (2016), observa-se que os valores de REMQ foram bem mais elevados para a bacia hidrográfica do rio Piancó.

Os volumes totais calculados pelo modelo na maioria das calibrações foram, em geral, relativamente próximos aos volumes observados em que a maioria dos erros encontram-se dentro do intervalo de 10% indicando um desempenho satisfatório do modelo (RIENTJES et al., 2013). Contudo, analisando a medida de desempenho EV que também é uma métrica que mede o desempenho olhando para os erros de volume escoados, têm-se que em sua maioria apresentaram valores variando entre 0,39 a 0,44 com relação às 12 melhores calibrações.

HF, D e EKG apresentaram assim como R os melhores valores de eficiência, isto é, os valores mais próximos de 1 (valor ótimo desejado para estas medidas de desempenho). A métrica HF variou de 0,79 a 0,86, já D manteve-se entre 0,92 a 0,93 e EKG entre 0,76 a 0,84. Além disso, Y (métrica com forma combinada de NS e  $\Delta V$ ) manteve-se variando entre 0,60 a 0,73.

Tabela 15 - Avaliação dos 12 melhores ajustes do modelo MGB-IPH no período de calibração (1970-1990)

	UNIDADE	CALIB 00	CALIB 30	CALIB 37	CALIB 42	CALIB 44	CALIB 47	CALIB 51	CALIB 57	CALIB 62	CALIB 69	CALIB 76	CALIB 84	CALIB 92	Valor Ótimo
<i>R</i>	ad	0,85	0,86	0,86	0,86	0,86	<b>0,87</b>	0,85	0,86	0,86	0,86	<b>0,87</b>	0,86	0,85	<i>1</i>
<i>R</i> <sup>2</sup>	ad	0,72	0,74	0,74	0,74	0,74	<b>0,76</b>	0,72	0,74	0,74	0,74	<b>0,76</b>	0,74	0,72	<i>1</i>
<i>NS</i>	ad	0,72	<b>0,74</b>	<b>0,74</b>	<b>0,74</b>	<b>0,74</b>	0,75	0,7	0,73	0,73	0,71	0,72	<b>0,74</b>	0,72	<i>1</i>
<i>NSlog</i>	ad	-0,34	<b>-0,34</b>	-0,35	-0,36	-0,35	<b>-0,34</b>	<b>-0,34</b>	-0,35	<b>-0,34</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,34</b>	-0,35	<b>-0,34</b>	<i>1</i>
<i>NSabs</i>	ad	0,61	0,62	<b>0,64</b>	0,63	0,63	0,62	0,58	0,62	0,62	0,61	0,62	0,63	0,62	<i>1</i>
<i>NSD</i>	ad	0,66	<b>0,69</b>	0,68	0,68	0,68	<b>0,69</b>	0,64	0,67	0,68	0,65	0,66	0,68	0,66	<i>1</i>
<i>NSDlog</i>	ad	0,19	<b>0,2</b>	0,19	0,19	0,19	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	0,19	0,19	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	0,19	<b>0,2</b>	<i>1</i>
<i>NSDabs</i>	ad	0,46	0,48	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	0,49	0,49	0,42	0,48	0,48	0,47	0,48	0,49	0,47	<i>1</i>
<i>NSM</i>	ad	0,51	0,55	0,54	0,55	0,55	<b>0,56</b>	0,49	0,53	0,54	0,5	0,52	0,55	0,52	<i>1</i>
<i>EMA</i>	m <sup>3</sup> /s	10,01	9,6	<b>9,21</b>	9,3	9,44	9,52	10,77	9,63	9,73	9,94	9,66	9,41	9,77	<i>0</i>
<i>REMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	33,96	<b>32,54</b>	32,96	32,74	32,75	32,41	34,88	33,26	33,15	34,49	33,94	32,84	33,93	<i>0</i>
<i>REMQav</i>	m <sup>3</sup> /s	10,19	10,06	13,94	12,44	10,63	10,19	9,27	10,6	9,97	<b>9,21</b>	9,3	11,21	9,75	<i>0</i>
<i>REMQbv</i>	m <sup>3</sup> /s	27,01	26,36	<b>24,63</b>	25,08	25,94	26,19	28,58	26,63	26,7	28,02	28,11	25,8	27,29	<i>0</i>
<i>TREMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	1,58	1,53	<b>1,46</b>	1,48	1,5	1,52	1,68	1,52	1,54	1,56	1,54	1,5	1,55	<i>0</i>
<i>RSR</i>	ad	0,53	0,51	0,51	0,51	0,51	<b>0,5</b>	0,54	0,52	0,52	0,54	0,53	0,51	0,53	<i>0</i>
<i><math>\Delta V</math></i>	ad	0,86	11,52	<b>0,96</b>	<b>0,82</b>	<b>5,48</b>	11,58	17,49	14,33	<b>9,95</b>	10,97	19,12	<b>5,37</b>	<b>5,75</b>	<i>0</i>
<i>EV</i>	ad	0,39	0,41	<b>0,44</b>	0,43	0,42	0,42	0,34	0,41	0,4	0,39	0,41	0,42	0,4	<i>1</i>
<i>EKG</i>	ad	0,82	0,81	0,78	0,8	0,83	0,81	0,77	0,8	0,83	0,82	0,76	0,83	<b>0,84</b>	<i>1</i>
<i>HF</i>	ad	0,92	<b>0,86</b>	0,79	0,81	0,84	<b>0,86</b>	0,85	0,84	0,85	0,85	<b>0,86</b>	0,83	0,85	<i>1</i>
<i>D</i>	ad	0,83	<b>0,93</b>	0,92	0,92	0,92	<b>0,93</b>	0,92	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	0,92	<b>0,93</b>	0,92	0,92	<i>1</i>
<i>Y</i>	ad	0,71	0,67	<b>0,73</b>	<b>0,73</b>	0,7	0,67	0,6	0,64	0,67	0,64	0,6	0,7	0,68	<i>1</i>

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Analisando a Tabela 16 com os valores de eficiência das medidas de desempenho do período de validação do modelo MGB-IPH observa-se a maior parte destas mantiveram-se relativamente no mesmo patamar dos valores de eficiência observados no período de calibração mencionado anteriormente. Algumas medidas de desempenho da validação

apresentaram valores de eficiência até melhores do que os observados no período de calibração, como foi o caso de NSlog, NSDlog, NSM, EMA e REMQ.

Tabela 16 - Avaliação dos 12 melhores ajustes do modelo MGB-IPH no período de validação (1991-2011)

	UNIDADE	VALID 00	VALID 30	VALID 37	VALID 42	VALID 44	VALID 47	VALID 51	VALID 57	VALID 62	VALID 69	VALID 76	VALID 84	VALID 92	Valor Ótimo
<i>R</i>	ad	0,81	0,84	<b>0,88</b>	0,87	0,84	0,84	0,85	0,87	0,84	0,87	<b>0,88</b>	0,82	0,84	<i>1</i>
<i>R</i> <sup>2</sup>	ad	0,66	0,71	<b>0,77</b>	0,76	0,71	0,71	0,72	0,76	0,71	0,76	<b>0,77</b>	0,67	0,71	<i>1</i>
<i>NS</i>	ad	0,65	0,7	<b>0,78</b>	0,75	0,7	0,7	0,7	0,75	0,66	0,68	<b>0,78</b>	0,66	0,7	<i>1</i>
<i>NSlog</i>	ad	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	<b>-0,17</b>	-0,18	-0,18	-0,18	<i>1</i>
<i>NSabs</i>	ad	0,53	0,52	<b>0,58</b>	0,57	0,54	0,52	0,49	0,55	0,52	0,5	0,57	0,51	0,52	<i>1</i>
<i>NSD</i>	ad	0,62	0,72	<b>0,79</b>	0,77	0,72	0,72	0,73	0,77	0,69	0,7	<b>0,79</b>	0,68	0,72	<i>1</i>
<i>NSDlog</i>	ad	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	<b>0,22</b>	0,21	0,21	0,21	<i>1</i>
<i>NSDabs</i>	ad	0,60	0,59	<b>0,65</b>	0,64	0,61	0,59	0,57	0,61	0,59	0,57	0,64	0,59	0,59	<i>1</i>
<i>NSM</i>	ad	0,77	0,8	<b>0,85</b>	0,83	0,8	0,8	0,8	0,83	0,77	0,78	<b>0,85</b>	0,77	0,8	<i>1</i>
<i>EMA</i>	m <sup>3</sup> /s	6,81	6,95	<b>5,98</b>	6,11	6,59	6,93	7,31	6,5	6,96	7,2	6,12	6,99	6,95	<i>0</i>
<i>REMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	29,12	27,13	23,46	24,72	27,2	27,19	27,02	25	28,72	28,1	<b>23,45</b>	29,08	27,13	<i>0</i>
<i>REMQav</i>	m <sup>3</sup> /s	16,04	10,22	8,04	9,16	10,58	10,28	8,91	8,02	10,71	9,94	<b>7,57</b>	11,3	10,22	<i>0</i>
<i>REMQbv</i>	m <sup>3</sup> /s	18,81	20,69	<b>18,08</b>	18,49	20,08	20,72	21,31	19,79	21,66	22,09	18,53	21,63	20,69	<i>0</i>
<i>TREMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	1,47	1,5	<b>1,35</b>	1,37	1,43	1,49	1,58	1,44	1,5	1,52	1,38	1,49	1,5	<i>0</i>
<i>RSR</i>	ad	0,59	0,55	<b>0,47</b>	0,5	0,55	0,55	0,54	0,5	0,58	0,57	<b>0,47</b>	0,59	0,55	<i>0</i>
<i>ΔV</i>	ad	9,49	27,98	10,49	<b>10,43</b>	17,46	28,43	28,5	18,67	23,35	37,21	13,81	18,54	27,98	<i>0</i>
<i>EV</i>	ad	0,26	0,25	<b>0,35</b>	0,34	0,29	0,25	0,21	0,3	0,25	0,22	0,34	0,25	0,25	<i>1</i>
<i>EKG</i>	ad	0,71	0,67	0,8	0,79	0,75	0,67	0,68	0,77	0,71	0,59	<b>0,81</b>	0,72	0,67	<i>1</i>
<i>HF</i>	ad	0,88	0,79	0,86	0,82	0,78	0,79	0,82	0,85	0,77	0,8	<b>0,87</b>	0,75	0,79	<i>1</i>
<i>D</i>	ad	0,71	0,91	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,91	0,92	<b>0,94</b>	0,9	0,91	<i>1</i>
<i>Y</i>	ad	0,60	0,55	<b>0,7</b>	0,68	0,6	0,54	0,55	0,63	0,54	0,49	0,68	0,55	0,55	<i>1</i>

(Fonte: Autoria própria, 2017)

No geral, a maioria das medidas de desempenho usadas para averiguar a qualidade do ajuste do modelo MGB-IPH neste estudo (Tabela 15 e 16) estão no mesmo patamar das obtidas para a maioria das aplicações de modelos hidrológicos para bacias de rios perenes. Por exemplo, o valor de NS e EV obtidos apresentaram-se aproximadamente na mesma faixa aos obtidos por Getirana, Rotunno Filho e Mansur (2011), Meller, Bravo e Collischonn (2012) e Muleta (2012).

## 5.2.2 Análise de dispersão dos conjuntos de soluções

Outra questão que pode ser abordada de uma forma interessante com a calibração multiobjetivo é a análise da validade do modelo. Esta análise pode ser feita com base na variação dos valores dos parâmetros para satisfazer às diferentes FO. Segundo Collischonn e Tucci (2003), o modelo ideal permitiria otimizar todas as funções objetivo com valores muito semelhantes dos parâmetros. Quando, por outro lado, a amplitude dos valores encontrados para os parâmetros na região de Pareto for muito grande, então o modelo revela sua incapacidade de representar o fenômeno desejado de uma forma abrangente, e sua validade pode ser colocada em dúvida.

No caso do modelo MGB-IPH, nas doze melhores calibrações realizadas a faixa de variação dos parâmetros foi relativamente estreita. A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros encontrados na CALIB 92 com três funções objetivo (EKG, NDlog e EV) e população de 200 pontos. Comparando com a Tabela 6, observa-se que os parâmetros B, KINT e KBAS estão próximos ao limite inferior definido na faixa de busca do valor ótimo para esses parâmetros. Isso pode indicar a necessidade de ampliar os limites de busca para estes parâmetros, muito embora a existência de tais limites é justamente devido à preocupação de que não ficassem valores muito distantes do esperado em função do significado físico de cada parâmetro.

Tabela 17 - Limites dos parâmetros após calibração automática de uma população de 200 indivíduos da região de Pareto

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
B (-)	0.067	0.067
KINT(mm.dia-1)	2.60	2.60
KBAS (mm.dia-1)	0.03	0.03
CS (-)	8.4	9.0
CI (-)	352.6	357.2
Wm - Argissolos/caatinga (mm)	155	165
Wm - Litosossolos/caatinga (mm)	476	786
Wm - Cambissolos/caatinga (mm)	1252	1264
Wm - Argissolos/atividade agrícola (mm)	2030	2048
Wm - Luvisolos/atividade agrícola (mm)	354	388
Wm - Litossolo/atividade agrícola (mm)	591	602

(Fonte: Autoria própria, 2017)

A Figura 25 expõe os valores das FO extraídos do conjunto de soluções não dominadas com 200 indivíduos da região de Pareto-ótimo das 12 melhores calibrações

realizadas do modelo MGB-IPH. Através do gráfico de boxplot pode-se observar os melhores e piores conjunto de dados para as diferentes calibrações. Dentre as 12 melhores calibrações observa-se a combinação de 16 métricas, onde 4 estão expostas na Figura 25 e as demais na Figura 26.

Nos gráficos tipo boxplot a altura do retângulo fornece informações sobre a dispersão dos valores de eficiência de cada FO. Analisando a Figura 25 e 26 observa-se que a população dos 200 indivíduos para a maioria das FO manteve-se com pouca dispersão de dados. Também é possível perceber a relação de simetria dos dados, desse modo observa-se as medianas localizadas ao centro do retângulo e próxima a média indicam que o conjunto de dados são simétricos, o que ocorreu para todas as 16 FO apresentadas nas Figuras 25 e 26.

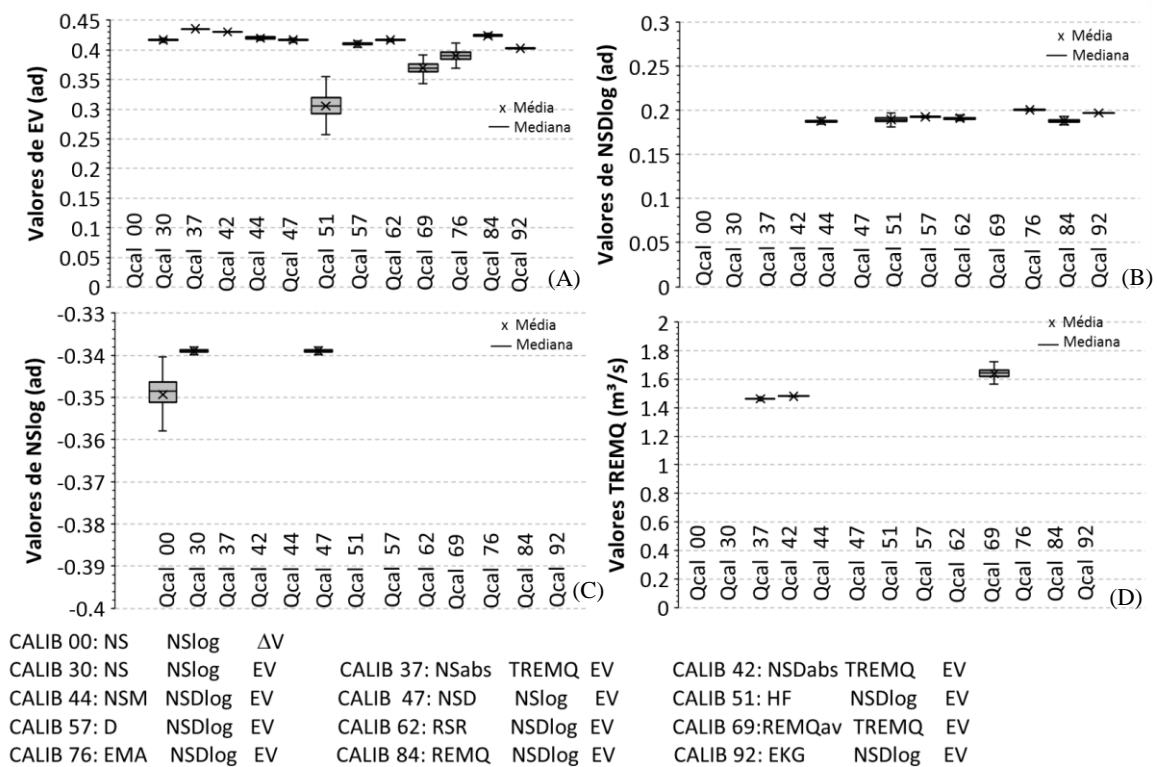


Figura 25 – Comparação entre os valores de eficiência calculados pelo MGB-IPH com 200 indivíduos das 12 melhores calibrações. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Observa-se na Figura 25A que os piores conjuntos estão representados pelas calibrações CALIB 51, CALIB 69 e CALIB 76. As demais calibrações permaneceram na



### 5.2.3 Comparação entre vazões observadas e calculadas

Felix e Paz (2016) analisaram a dispersão entre vazões calculadas e observadas da bacia hidrográfica do rio Piancó com a calibração original do modelo MGB-IPH, e concluíram não ser clara a existência de erro sistemático ou tendência do modelo em superestimar ou subestimar as vazões observadas.

Neste estudo isto também foi observado para a maioria das calibrações realizadas, seja em qualquer patamar de vazões, tanto no período de calibração (Figura 27) quanto de validação (Figura 28). Embora percebe-se que vazões até 200 m<sup>3</sup>/s foram melhores representadas pelo MGB-IPH para o rio Piancó na maioria das calibrações realizadas, pois houve maior concentração de pontos em volta da linha 1:1.

As Figuras 27 e 28 mostram a dispersão das vazões observadas e calculadas para as 12 melhores calibrações do modelo MGB-IPH, contudo cada gráfico expõe apenas vazões até 600 m<sup>3</sup>/s para melhor observar a dispersão entre os pontos, visto que a maior concentração dos dados se encontra nesta faixa de vazões.

Neste tipo de análise de dispersão de pontos não se observam muitas diferenças no comportamento entre as várias calibrações, além disso estão intimamente relacionadas aos valores de R e R<sup>2</sup>, já apresentados anteriormente. Percebe-se alguma melhoria na relação Q<sub>obs</sub> – Q<sub>calc</sub> (vazão observadas menos vazão calculada) para algumas calibrações em relação as demais. Por exemplo, ao observar a Figura 28 no período de validação a VALID 37 e a VALID 42 parecem ser menos dispersas do que as demais validações apresentadas, o que também é confirmado pelas métricas R e R<sup>2</sup> no qual apresentaram dentre os maiores valores de eficiência para estas validações, embora pouca diferença em relação aos demais.

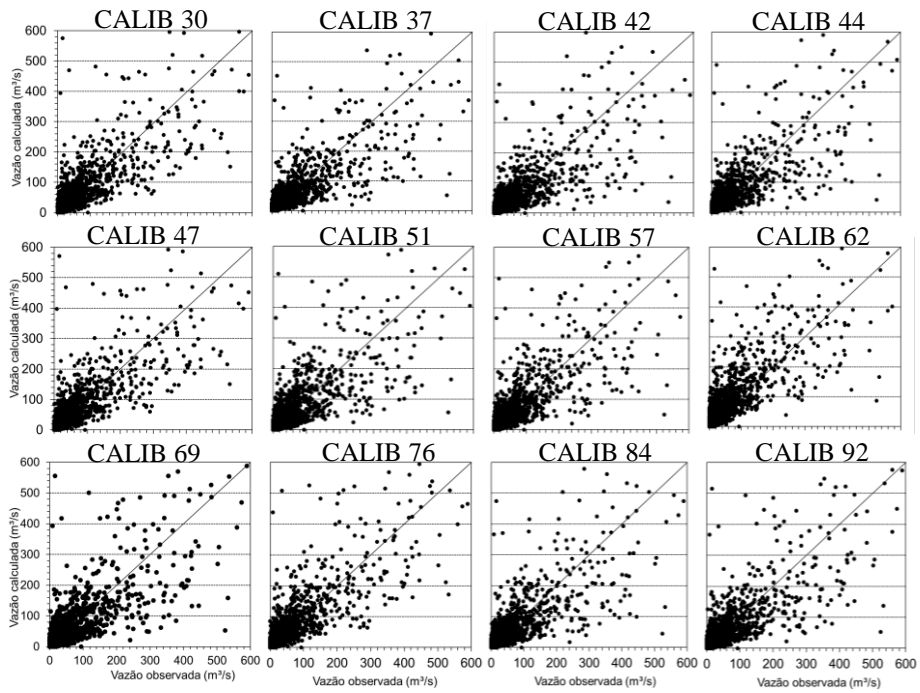


Figura 27 - Análise de dispersão entre vazões diárias observadas e calculadas no período de calibração (1970-1990) do modelo MGB-IPH. (Fonte: Autoria própria, 2017)

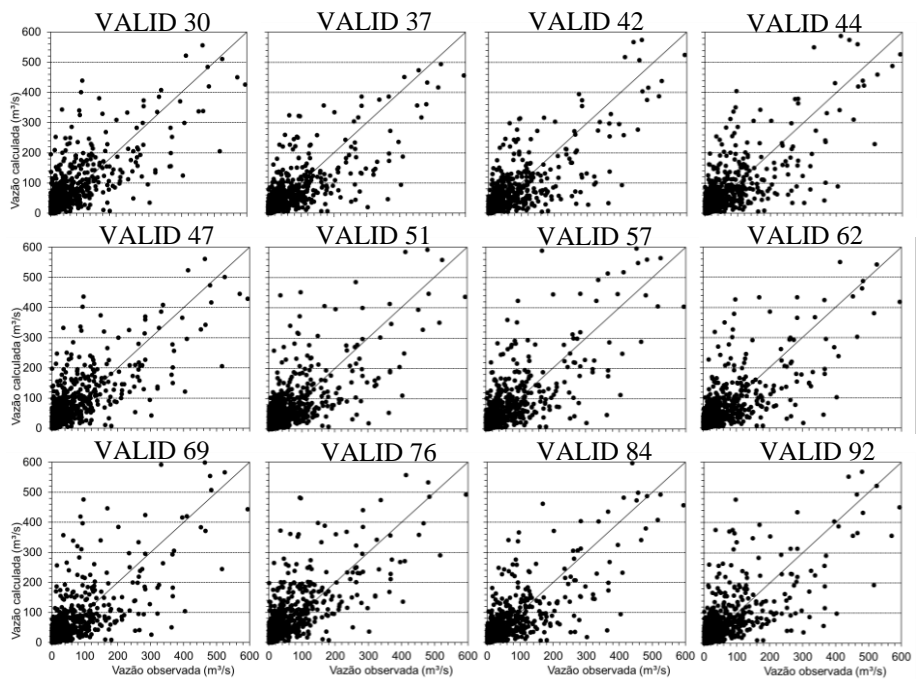


Figura 28 - Análise de dispersão entre vazões diárias observadas e calculadas no período de validação (1991-2011) do modelo MGB-IPH. (Fonte: Autoria própria, 2017)

A comparação entre as curvas de permanência ressalta a incapacidade do modelo em simular a intermitência do rio Piancó (Figura 29). Nos períodos de estiagem em que o rio seca completamente, o modelo MGB-IPH simulou vazões muito pequenas (abaixo de  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A Figura 29 mostra as curvas de permanências para o ajuste das três melhores calibrações analisadas (CALIB 47, 76 e 92). Apesar da curva de permanência não demonstrar muita diferença entre estas calibrações, de acordo com as demais análises realizadas a CALIB 92 apresentou o ajuste considerado mais adequado.

Observa-se que a partir da permanência 5% até 60%, o modelo apresentou maiores valores do que os observados, mas seguindo uma curva paralela à observada. Para as maiores vazões de cheias, com permanência inferior a 5%, houve maior correspondência entre as curvas de permanência dos valores observados e calculados pelo modelo.

Além disso, as incertezas dos hidrogramas podem ser propagadas para aplicações como a estimativa de vazões de referência, tais como a Q90, ou para a estimativa da curva de permanência, como mostra a Figura 29. A estimativa da vazão de referência Q90 para os três ajustes mostrados, por exemplo, vai de  $0,124$  a  $0,126 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo que a Q90 observada é de  $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dentre as FO que apresentaram maior sensibilidade às vazões baixas, observou-se que a TREMQ relativamente melhora o ajuste dos hidrogramas observados e calculados com relação as vazões baixas, embora sacrificaram consideravelmente o ajuste as vazões altas. Com relação ao REMQbv, não apresentou nenhuma melhora nos ajustes dos hidrogramas, pelo contrário, as calibrações que envolveram essa função objetivo apresentaram os piores ajustes entre hidrogramas observados e calculados, a exemplo da CALIB 22 citada anteriormente (Figuras 23A e 24A).

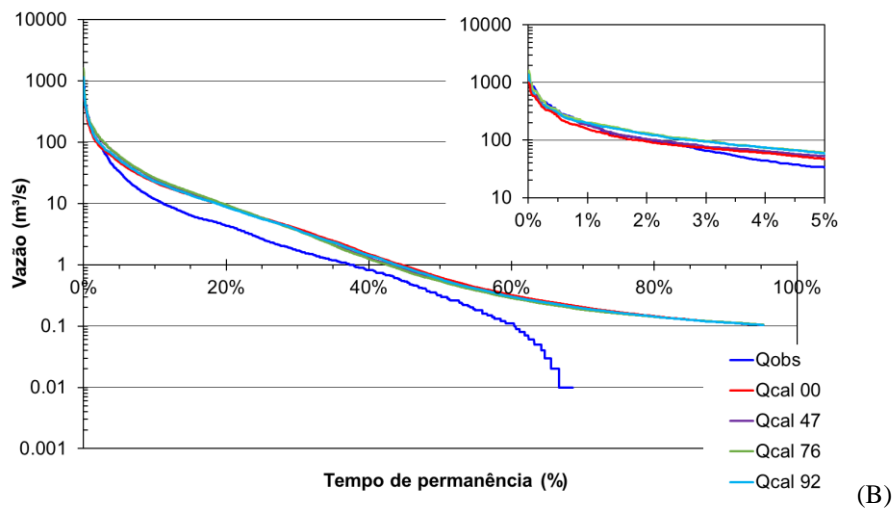
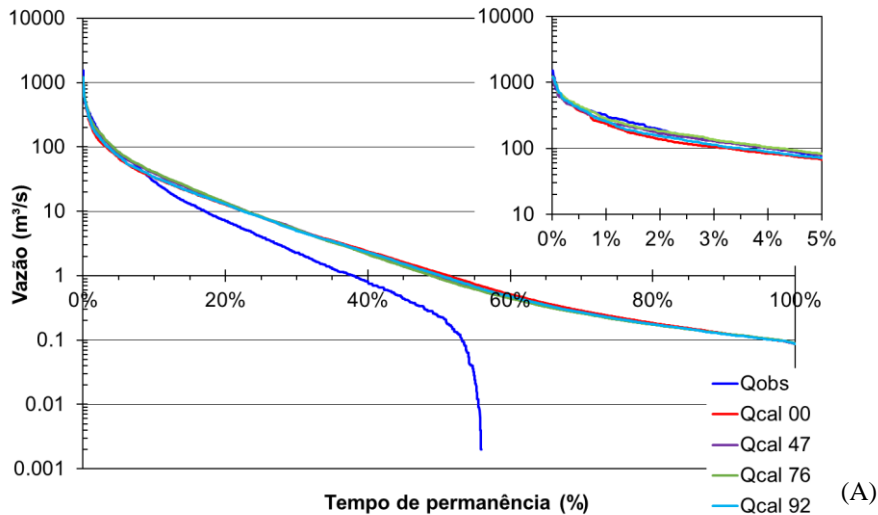


Figura 29 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas, com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes: (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Na Figura 30 e 31 tem-se uma comparação entre a CALIB 92 (EKG, NSDlog e EV), CALIB 93 (EKG, TREMQ e EV) e CALIB 89 (EKG, TREMQ e  $\Delta V$ ). Percebe-se que as calibrações que utilizam o TREMQ visualmente mostram bom ajuste das vazões mais baixas dos hidrogramas, no entanto nestes casos sacrificou um pouco o ajuste das vazões mais altas conforme dito anteriormente. A combinação com EV também representou o ajuste melhor quando combinado com  $\Delta V$ .

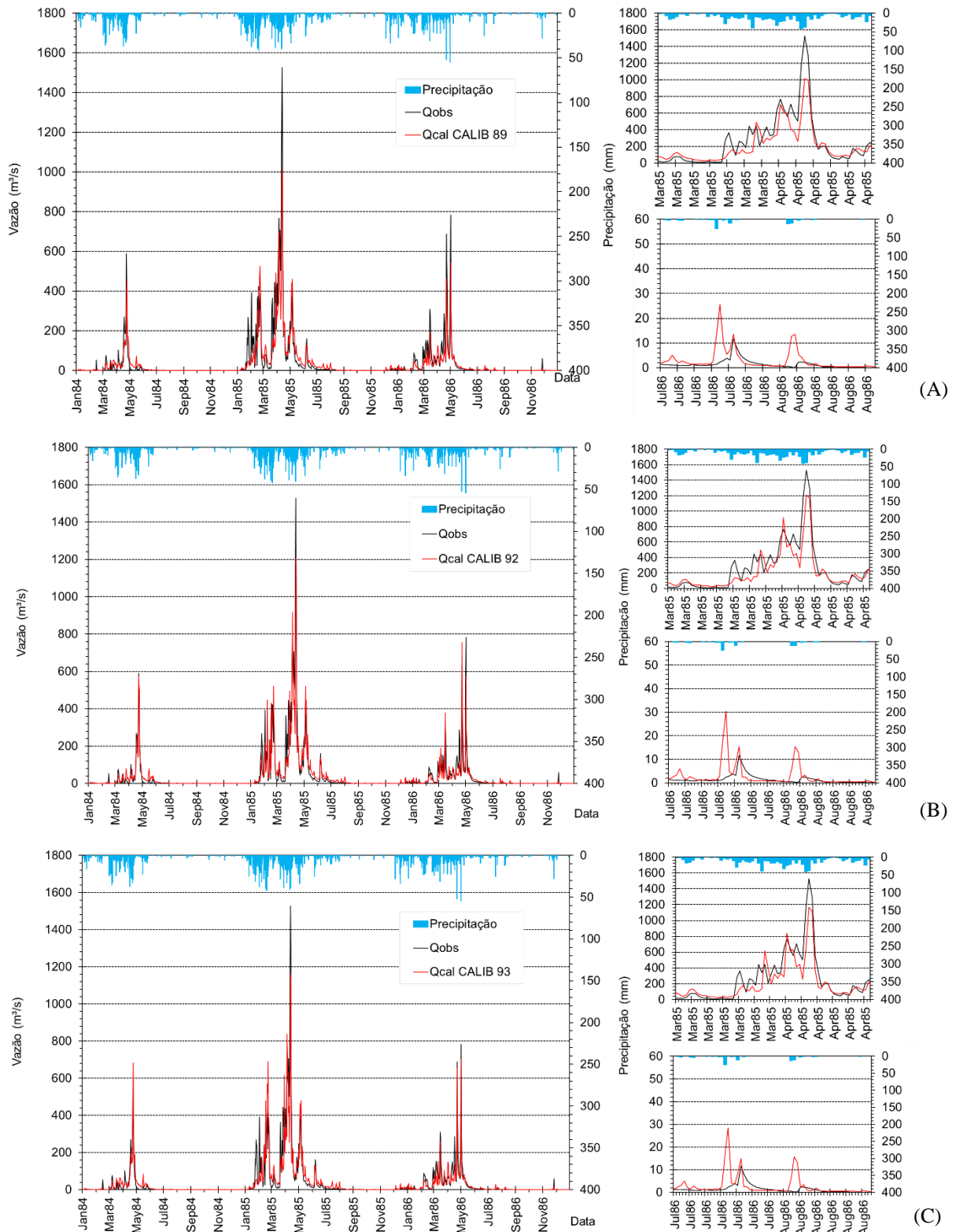


Figura 30 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração: (A) CALIB 89; (B) CALIB 92 e (C) CALIB 93. (Fonte: Autoria própria,

2017)

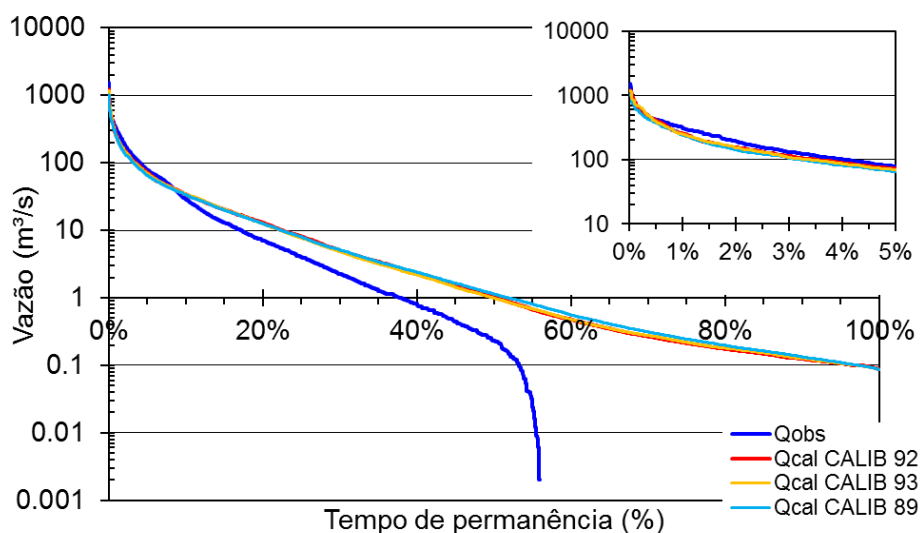


Figura 31 – Comparação das curvas de permanência das vazões observadas e calculadas (CALIB 92, CALIB 93 e CALIB 89), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes. (Fonte: Autoria própria, 2017)

#### 5.2.4 Ajuste com base na curva de permanência

A calibração dos parâmetros do modelo MGB-IPH com base na curva de permanência partiu da premissa de uma calibração multiobjetivo realizada com uma FO que tenha um olhar mais direcionado sobre a curva de permanência. Isto é, buscando uma maior aproximação entre as curvas de permanência das vazões observadas e calculadas.

O procedimento de análise foi o mesmo aplicados nas calibrações citadas anteriormente. A Figura 32 expõe a comparação entre as calibrações CALIB 92 (EKG, NSDlog e EV), CALIB 102 (NSD, TREMQ e DCPerm) e CALIB 111 (NSD, NSlog e FCPerm), em que se obteve os melhores ajustes dos hidrogramas observados e calculados diante das análises realizadas.

Percebe-se que as calibrações CALIB 92 e CALIB 111 foram melhor ajustadas às vazões observadas, apesar de super e subestimar alguns picos de vazões (Figura 32). A CALIB 102 apresentou maior proximidade às vazões baixas, porém subestimou a maior parte dos picos de vazões mais altas e médias.

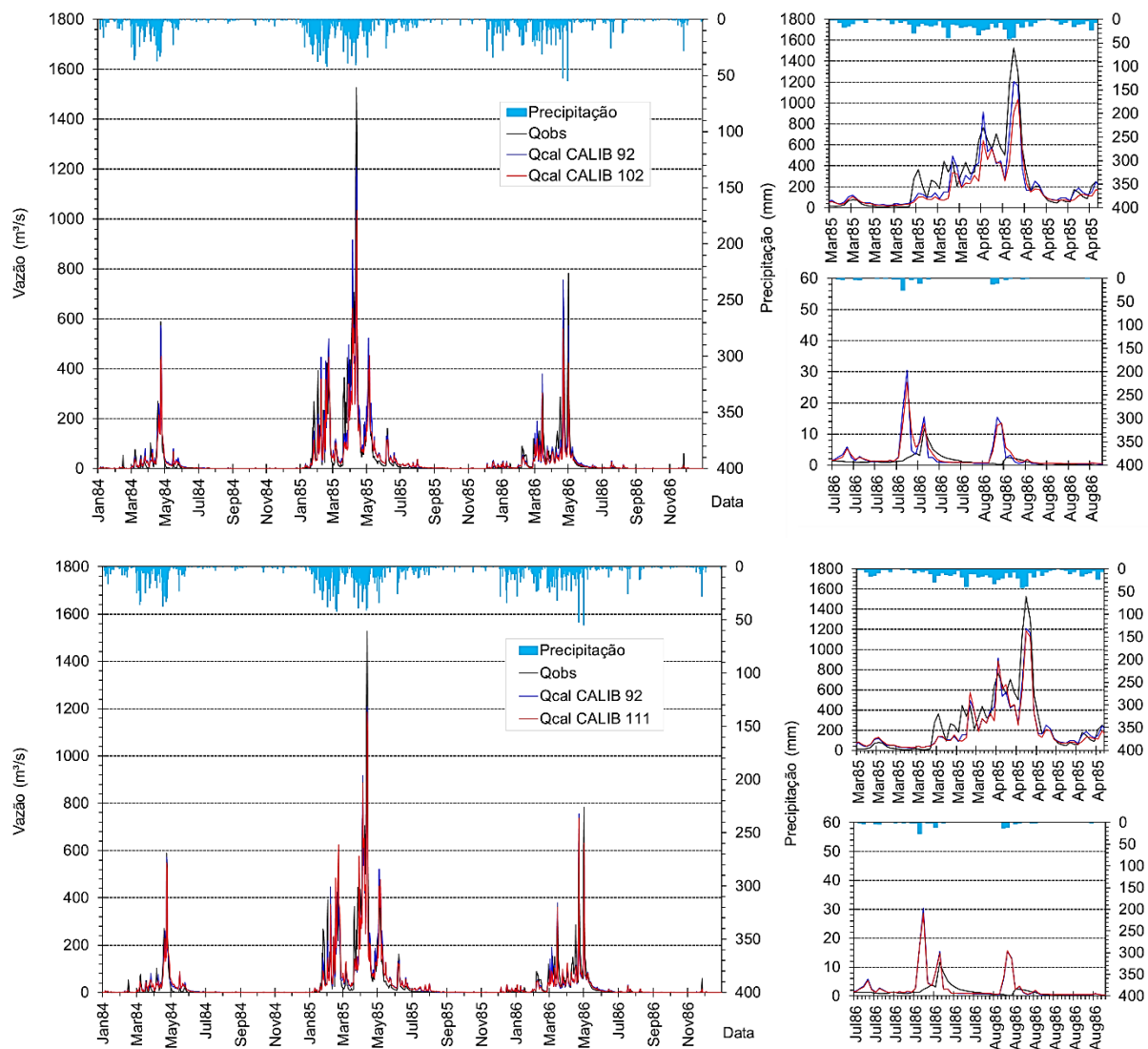


Figura 32 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (CALIB 92, CALIB 102 e CALIB 111) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017)

De acordo com Moriasi et al. (2007), os resultados da calibração podem ser classificados como bons se os valores de NS ficarem entre 0,65 e 0,75. Assim, como os valores para esse indicador foram sempre superiores a 0,7 (Tabela 18), pode-se afirmar que, para a calibração, o comportamento do modelo foi satisfatório, uma vez que as vazões de pico e volume escoado apresentaram erros inferiores a 10%, indicando um bom ajuste do modelo, devido aos valores estarem dentro da faixa de erro das medições de vazões. Os valores da função FCP<sub>perm</sub> apresentaram ótimo ajuste embora a distância entre a DC<sub>perm</sub> das vazões observadas e calculadas não apresentou bom ajuste. Os melhores valores das

medidas de desempenho foram da CALIB 111 quando comparado a CALIB 102, conforme mostra na Tabela 18.

Tabela 18 - Avaliação dos melhores ajustes do modelo MGB-IPH com base na curva de permanência

	DCPerm	FCPerm	NS	NSlog	NSD	NSDlog	NSM	KGE	EMA	TREMQ	$\Delta V$	EV
<b>Unidades</b>	Ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	ad	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	ad	ad
<b>CALIB 92</b>	-	-	0,72	-0,34	0,66	0,20	0,52	0,84	9,77	1,55	5,75	0,40
<b>CALIB 102</b>	2,83	1,09	0,72	-0,36	0,66	0,19	0,52	0,69	9,28	1,48	-11,16	0,43
<b>CALIB 111</b>	17,08	0,98	0,72	-0,34	0,66	0,19	0,51	0,83	9,74	1,55	1,64	0,4
<b>Valor ótimo</b>	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1

(Fonte: Autoria própria, 2017)

As mesmas constatações verificadas na análise visual dos hidrogramas são confirmadas ao analisar as curvas de permanências na Figura 33. Percebe-se que as CALIB 111 e 92 apresentaram uma curva de permanência ligeiramente melhor ajustada à observada do que a CALIB 102, no entanto a simulação de intermitência do rio Piancó ainda não teve uma boa representação em nenhuma das calibrações realizadas.

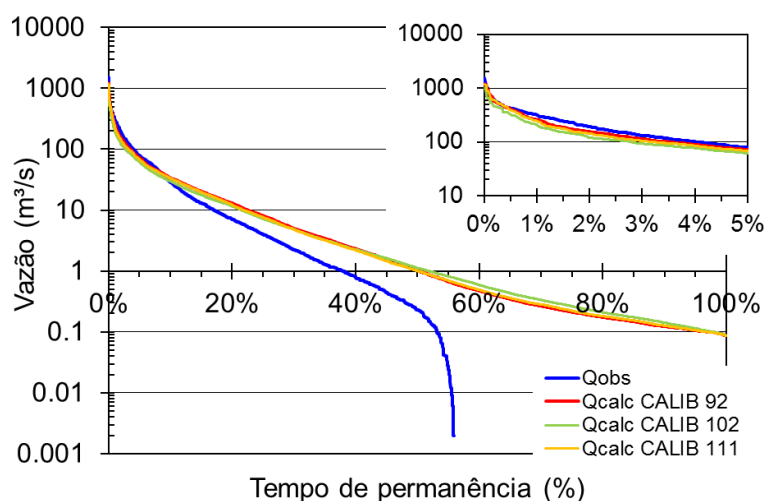


Figura 33 – Comparação das curvas de permanência das vazões observadas e calculadas (CALIB 92, CALIB 102 e CALIB 111), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo para os melhores ajustes. (Fonte: Autoria própria, 2017)

### 5.3 ANÁLISE DO MÉTODO DO FRACIONAMENTO DO HIDROGRAMA

De modo geral, as simulações realizadas através do método alternativo fracionamento do hidrograma das vazões observadas, apresentado neste estudo, obtiveram resultados mais coerentes com os dados observados, quando comparados com os resultados da aplicação do método tradicional. Isso fica mais evidente ao observar as Tabelas 19 e 20, que sintetizam o resultado obtido na simulação de melhor desempenho no período de calibração e validação, respectivamente. A Figura 33 ilustra os hidrogramas na bacia hidrográfica do rio Piancó no período entre janeiro de 1970 e dezembro de 1990.

Tabela 19 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de calibração

	Unidades	Método	Método alternativo					
		Tradicional	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>R</b>	Ad	0,85	0,89	0,87	0,90	0,87	0,88	<b>0,90</b>
<b>r<sup>2</sup></b>	Ad	0,72	0,79	0,77	<b>0,81</b>	0,76	0,77	0,80
<b>NS</b>	Ad	0,72	0,79	0,76	<b>0,81</b>	0,76	0,77	0,80
<b>NSlog</b>	Ad	-0,34	-0,36	-0,36	-0,35	-0,35	<b>-0,33</b>	-0,34
<b>NSabs</b>	Ad	0,61	<b>0,68</b>	0,67	0,69	0,65	0,67	0,67
<b>NSD</b>	Ad	0,66	0,74	0,71	<b>0,77</b>	0,71	0,72	0,76
<b>NSDlog</b>	Ad	0,19	0,18	0,18	0,19	0,19	<b>0,20</b>	0,19
<b>NSDabs</b>	Ad	0,46	0,56	0,55	<b>0,57</b>	0,52	0,55	0,55
<b>MSN</b>	Ad	0,51	0,63	0,59	<b>0,67</b>	0,58	0,60	0,65
<b>EMA</b>	m <sup>3</sup> /s	10,01	8,12	8,37	<b>7,96</b>	8,93	8,45	8,44
<b>REMQ</b>	m <sup>3</sup> /s	33,96	29,48	31,24	<b>28,07</b>	31,48	30,81	28,72
<b>REMQav</b>	m <sup>3</sup> /s	10,19	14,81	14,81	14,30	<b>11,68</b>	13,29	12,48
<b>REMQbv</b>	m <sup>3</sup> /s	27,01	20,67	22,15	<b>19,80</b>	23,91	22,69	21,47
<b>TREMQ</b>	m <sup>3</sup> /s	1,58	1,33	<b>1,31</b>	1,36	1,43	1,34	1,42
<b>RSR</b>	Ad	0,53	0,46	0,49	<b>0,44</b>	0,49	0,48	0,45
<b>ΔV</b>	Ad	0,86	6,13	8,55	9,51	<b>-2,87</b>	9,61	13,35
<b>EV</b>	Ad	0,39	0,50	0,49	<b>0,51</b>	0,45	0,48	0,48
<b>EKG</b>	Ad	0,82	0,82	0,77	<b>0,83</b>	0,81	0,80	0,82
<b>D</b>	Ad	0,92	<b>0,94</b>	0,92	<b>0,94</b>	0,93	0,93	<b>0,94</b>
<b>HF</b>	Ad	0,83	0,79	0,78	0,81	0,82	0,81	<b>0,84</b>
<b>Y</b>	Ad	0,71	0,74	0,70	<b>0,74</b>	0,74	0,70	0,71

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Tabela 20 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de validação

		Método Tradiciona		Método alternativo					
		I		F1	F2	F3	F4	F5	F6
	Unidades								
<i>r</i>	Ad	0,81	0,90	0,75	<b>0,92</b>	0,89	0,89	<b>0,92</b>	
<i>r</i> <sup>2</sup>	Ad	0,66	0,80	0,57	<b>0,84</b>	0,79	0,80	<b>0,84</b>	
<i>NS</i>	Ad	0,65	0,80	0,57	<b>0,84</b>	0,79	0,80	<b>0,84</b>	
<i>NSlog</i>	Ad	-0,18	-0,19	-0,22	<b>-0,19</b>	-0,19	-0,18	<b>-0,19</b>	
<i>NSabs</i>	Ad	0,53	<b>0,66</b>	0,45	0,65	0,62	0,61	0,63	
<i>NSD</i>	Ad	0,68	0,82	0,61	<b>0,86</b>	0,81	0,82	0,85	
<i>NSDlog</i>	Ad	0,22	0,21	<b>0,20</b>	0,22	0,21	0,22	0,22	
<i>NSDabs</i>	Ad	0,60	<b>0,71</b>	0,53	<b>0,71</b>	0,68	0,67	0,68	
<i>MSN</i>	Ad	0,77	0,87	0,71	<b>0,89</b>	0,86	0,86	<b>0,89</b>	
<i>EMA</i>	m <sup>3</sup> /s	6,81	<b>4,95</b>	7,89	4,99	5,42	5,58	5,38	
<i>REMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	29,12	21,73	32,16	<b>19,45</b>	22,32	22,04	19,72	
<i>REMQav</i>	m <sup>3</sup> /s	16,02	12,08	16,98	10,61	10,50	<b>9,24</b>	9,48	
<i>REMQbv</i>	m <sup>3</sup> /s	18,84	14,13	20,52	<b>12,75</b>	15,26	16,60	13,77	
<i>TREMQ</i>	m <sup>3</sup> /s	1,47	<b>1,18</b>	1,66	1,22	1,26	1,33	1,31	
<i>RSR</i>	Ad	0,59	0,44	0,66	<b>0,40</b>	0,46	0,45	<b>0,40</b>	
<i>ΔV</i>	Ad	9,49	10,72	8,75	14,63	<b>0,14</b>	18,41	22,02	
<i>EV</i>	Ad	0,26	<b>0,47</b>	0,15	0,46	0,42	0,40	0,42	
<i>EKG</i>	Ad	0,71	<b>0,81</b>	0,63	<b>0,81</b>	<b>0,81</b>	0,78	0,77	
<i>D</i>	Ad	0,88	0,94	0,84	<b>0,96</b>	0,94	0,94	<b>0,96</b>	
<i>HF</i>	Ad	0,71	0,83	0,64	0,87	0,85	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	
<i>Y</i>	Ad	0,60	0,73	0,52	0,73	<b>0,79</b>	0,67	0,69	

(Fonte: Autoria própria, 2017)

O método alternativo obteve vantagem sobre a metodologia tradicional na maioria dos quesitos avaliados. Observa-se nas Tabelas 19 e 20 que nas 21 medidas de desempenho o método alternativo de calibração aplicado aos 6 fracionamentos realizados apresentou resultados melhores quando comparados ao método tradicional de calibração, destacando os fracionamentos F3 e F6 que apresentaram as melhores estatísticas. Paris et al. (2011) em seu estudo na bacia hidrográfica de rio Toropi – RS também constataram que as medidas de desempenho REMQ e  $\Delta V$  apresentaram uma melhora de 8,4% e 0,32%, respectivamente, enquanto o NS revelou melhora de 0,092 quando comparados com o método tradicional. Apesar de não ser uma bacia hidrográfica semiárida é evidente a boa performance da aplicação do método alternativo na região.

As Figuras 34 e 35 ilustram os hidrogramas obtidos pelo método alternativo de simulação (linha tracejada) no período de calibração. Nota-se, em geral, que a maioria das vazões simuladas pelo método alternativo relativamente está mais próxima das observadas (linha preta) do que as vazões calculadas pelo tradicional (linha vermelha).

No entanto, com a comparação visual dos hidrogramas percebe-se a dificuldade do modelo na representação das maiores cheias. Estas foram mais sacrificadas pelo método alternativo, havendo subestimação na maioria dos anos (exemplo: cheias de 1880, 1984, 1985 e 1986), mas também superestimação em alguns anos (1971, 1976 e 1977). Isso pode ter acontecido devido a prioridade dada a FO2 (que apresenta maior sensibilidade aos erros nas vazões mais baixas do hidrograma) na definição do conjunto de parâmetros, como por exemplo o NSlog.

Embora também percebe-se uma melhora nas estimativas das vazões médias a baixas na maioria dos fracionamentos realizados, principalmente, aqueles em que foi usada a combinação de FO B (EKG, NSDlog e EV) e limites  $Q1 = 9,24$  e  $Q2 = 118,80$ .

Sobretudo, os melhores hidrogramas foram representados pelos fracionamentos F3, F4 e F6, dentre estes os F4 e F6 destacaram-se por estimar com mais proximidade as vazões de pico e F3 as vazões das recessões (vazões baixas).

As Figuras 36 e 37 apresentam a dispersão entre as vazões calculadas e observadas dos fracionamentos no período de calibração e validação, respectivamente. Percebe-se que em ambos períodos as vazões menores que  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  foram melhor representadas pelo MGB-IPH para o rio Piencó em todos os fracionamentos, porém é notável menor dispersão entre os dados nos fracionamentos F3 e F6.

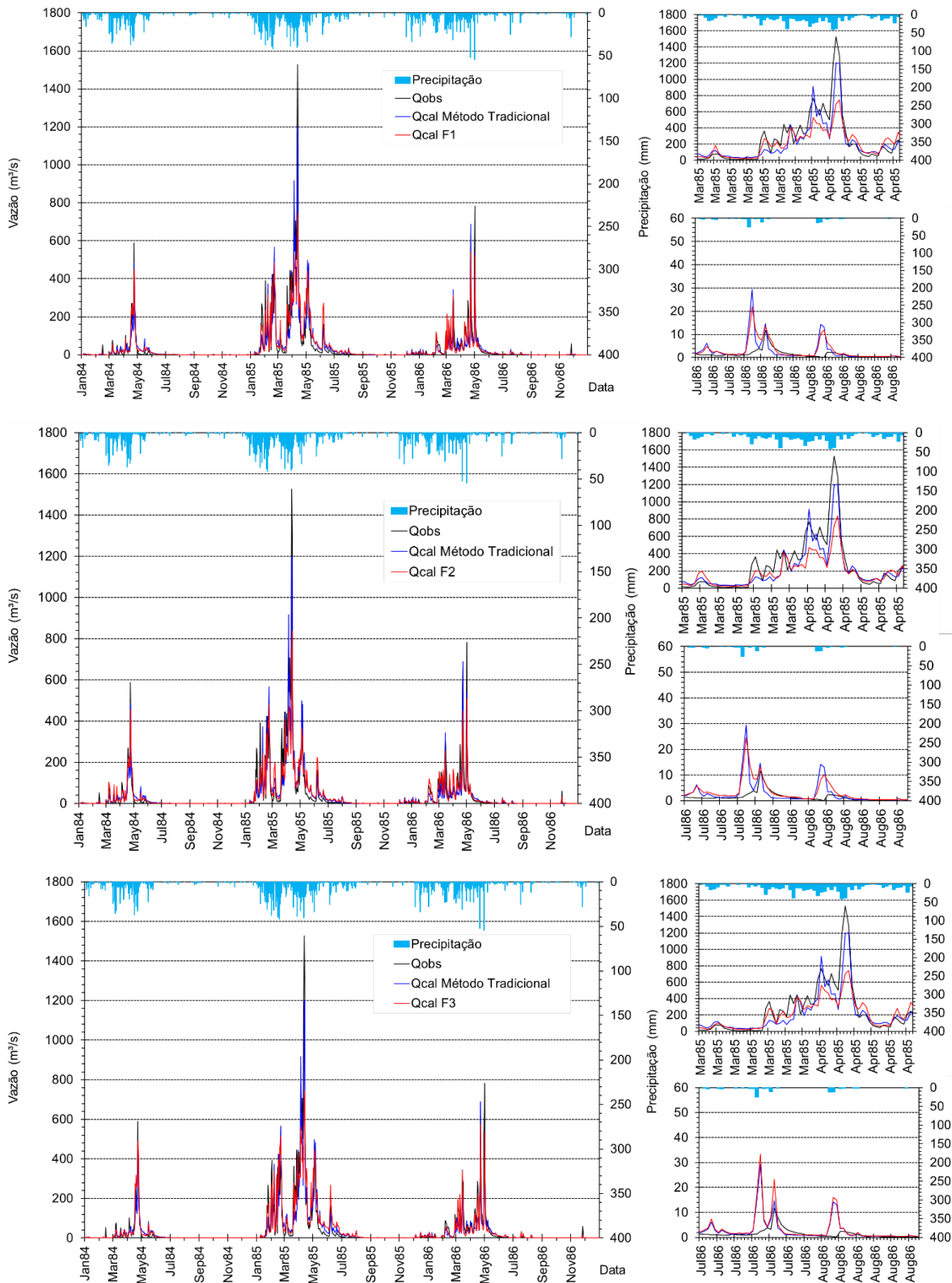


Figura 34 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (F1, F2 e F3) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017)

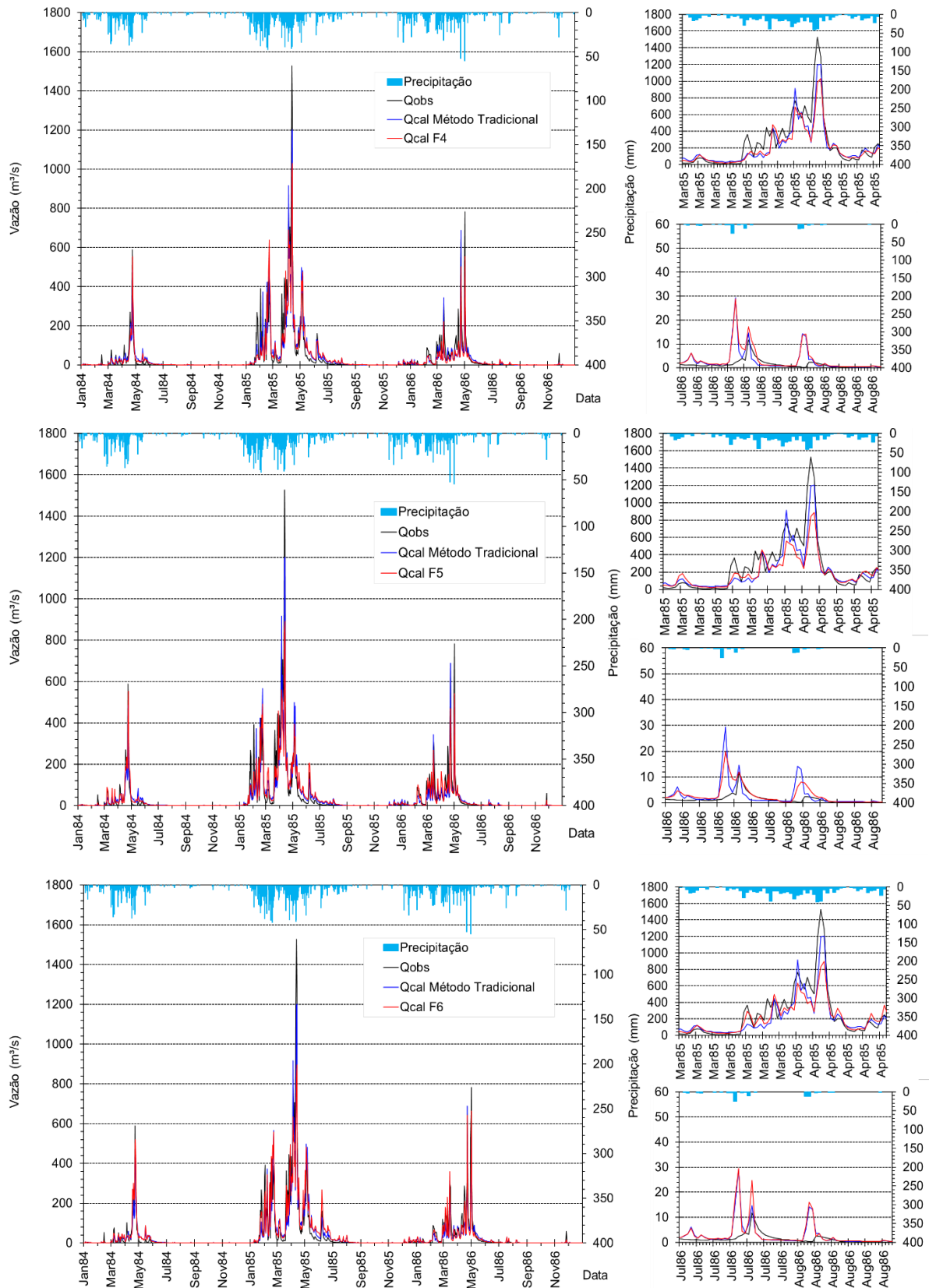


Figura 35 – Comparação entre hidrogramas observados e calculados (F4, F5 e F6) em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017)

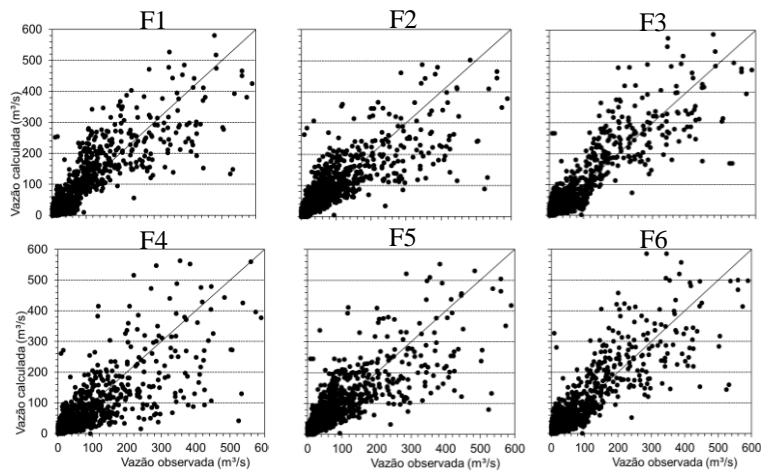


Figura 36 – Vazões diárias calculadas x observadas para o período de calibração pelo método alternativo. (Fonte: Autoria própria, 2017)

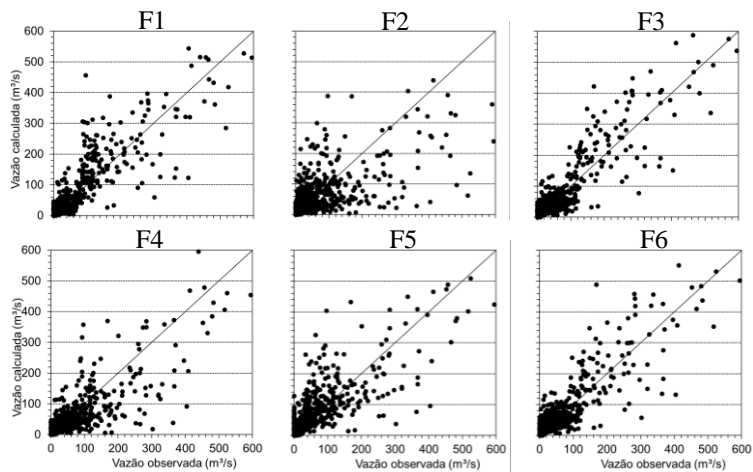
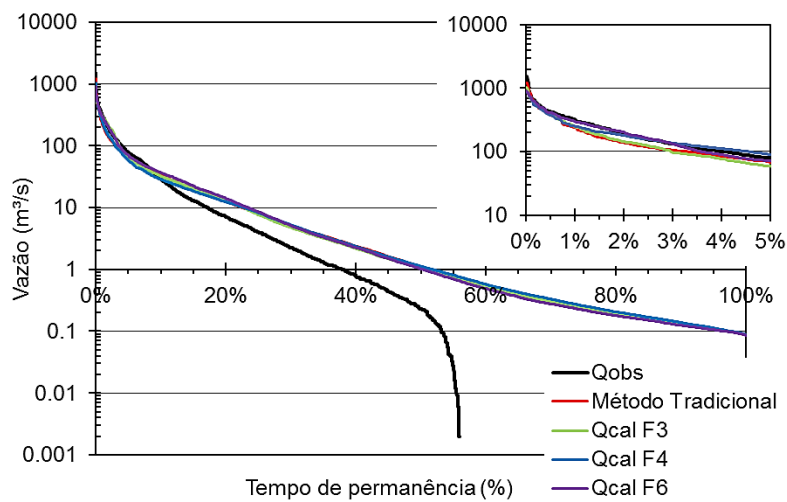


Figura 37 – Vazões diárias calculadas x observadas para o período de validação pelo método alternativo. (Fonte: Autoria própria, 2017)

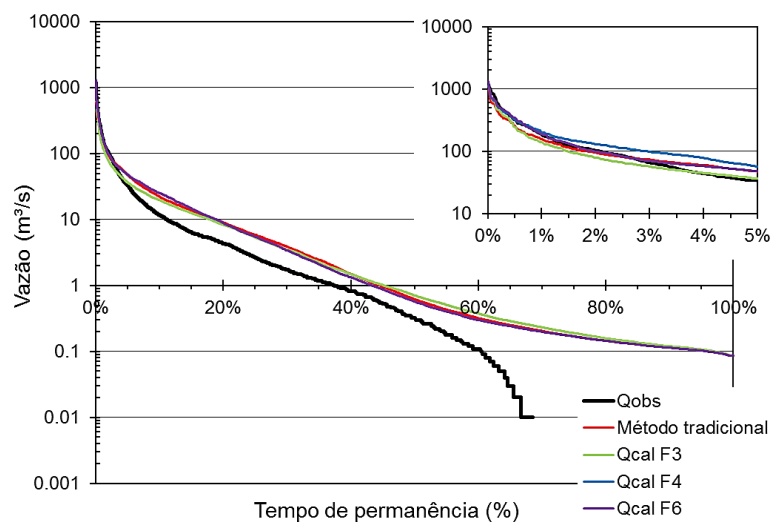
Analisando as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas, chega-se a constatações relativamente semelhantes. Figuras 38A (calibração) e 38B (validação) mostram as curvas de permanência na bacia estudada, em que os fracionamentos F3, F4 e F6 apresentaram as curvas de permanência das vazões calculadas mais próximas à observada.

As vazões médias e baixas ainda não foram tão bem representadas como se desejava, sendo as maiores disparidades observadas entre as Q30 e Q99 (vazões médias e baixas). Na comparação entre as curvas de permanência para as maiores vazões de cheias, com

permanência inferior a 5%, houve maior correspondência, principalmente, nos fracionamentos F4 e F6 entre os valores observados e calculados pelo modelo.



(A)



(B)

Figura 38 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas (F3, F4 e F6), com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo, para o período de (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017)

#### 5.4 ANÁLISE DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POR PERÍODO DO ANO

Para avaliar a qualidade de ajuste do modelo aos dados observados foram utilizadas as medidas de desempenho expostas na Tabela 21. Pode-se observar que não houve diferenças significativas ao comparar as calibrações do método alternativo ao tradicional,

principalmente, com relação a CPA 2, embora é relevante destacar que houve uma leve melhora nos índices NSlog (-0,32), NSDlog (0,20), TREMQ (1,68) e REMQbv (26,95), visto que a principal motivação para este estudo foi melhorar a representação das vazões baixas e da intermitência dos rios da bacia hidrográfica do rio Piancó. Contudo, a maioria das métricas mostra bons resultados para o ajuste do modelo, com os maiores valores concentrados nas estatísticas de erros (EMA, REMQ, REMQav e REMQbv) o que é comum para esse tipo de estatística.

Analisando os valores das medidas de desempenho do período de calibração e validação (Tabela 21), observa-se que o CPA1 para a maioria dos índices (Tabela 21 valores em negrito) no período de calibração, indicam ligeiramente os melhores ajustes quando comparado a CPA 2 e ao método tradicional. Embora no período de validação os melhores ajuste para o CPA2 na maior parte das medidas de desempenho.

Tabela 21 - Avaliação dos ajustes dos hidrogramas observados e calculados com os modelos tradicional e alternativo no período de calibração

	Unidades	Método tradicional		Método alternativo			
		Calibração	Validação	Calibração		Validação	
				CPA 1	CPA 2	CPA 1	CPA 2
<b>R</b>	Ad	0,85	0,81	0,86	0,86	0,85	<b>0,87</b>
<b>r<sup>2</sup></b>	Ad	0,72	0,66	<b>0,74</b>	0,73	0,72	<b>0,76</b>
<b>NS</b>	Ad	0,72	0,65	0,73	0,73	0,72	<b>0,75</b>
<b>NSlog</b>	Ad	-0,34	-0,18	-0,33	<b>-0,32</b>	-0,17	-0,17
<b>NSabs</b>	Ad	0,61	0,53	<b>0,62</b>	0,59	<b>0,55</b>	0,52
<b>NSD</b>	Ad	0,66	0,62	<b>0,68</b>	0,67	0,74	<b>0,77</b>
<b>NSDlog</b>	Ad	0,19	0,22	0,20	0,20	0,22	0,22
<b>NSDabs</b>	Ad	0,46	0,60	<b>0,48</b>	0,44	<b>0,61</b>	0,59
<b>NSM</b>	Ad	0,51	0,77	<b>0,54</b>	0,52	0,81	<b>0,83</b>
<b>EMA</b>	m <sup>3</sup> /s	10,01	6,81	<b>9,73</b>	10,39	<b>6,50</b>	6,83
<b>REMQ</b>	m <sup>3</sup> /s	33,96	29,12	<b>33,15</b>	33,66	26,30	<b>24,57</b>
<b>REMQav</b>	m <sup>3</sup> /s	10,19	16,04	10,46	<b>10,42</b>	12,84	<b>10,26</b>
<b>REMQbv</b>	m <sup>3</sup> /s	27,01	18,81	<b>26,27</b>	26,95	<b>18,08</b>	18,37
<b>TREMQ</b>	m <sup>3</sup> /s	1,58	1,47	<b>1,54</b>	1,68	<b>1,44</b>	1,54
<b>RSR</b>	Ad	0,53	0,59	0,52	0,52	0,53	<b>0,50</b>
<b>ΔV</b>	Ad	0,86	9,49	<b>3,53</b>	8,42	<b>11,97</b>	17,72
<b>EV</b>	Ad	0,39	0,26	<b>0,40</b>	0,36	<b>0,30</b>	0,26
<b>EKG</b>	Ad	0,82	0,71	<b>0,83</b>	0,82	<b>0,79</b>	0,77
<b>D</b>	Ad	0,92	0,88	0,92	0,92	0,92	<b>0,93</b>
<b>HF</b>	Ad	0,83	0,71	0,83	0,83	0,79	<b>0,85</b>
<b>Y</b>	Ad	0,71	0,60	<b>0,71</b>	0,67	0,64	0,64

(Fonte: Autoria própria, 2017)

A análise visual do hidrograma simulado em relação ao observado consiste em uma importante ferramenta de avaliação do ajuste e essencial para uma correta avaliação do modelo. Nas Figuras 39A e 39B podem ser analisados os hidrogramas observado e simulado pelo modelo MGB-IPH na fase de calibração, os quais são apresentados apenas em alguns anos do período estudado, de 1984 a 1986, para melhor visualização.

Ao analisar os hidrogramas calculados na fase de calibração (Figura 38A) nota-se que nos períodos de recessão, o ajuste do MGB-IPH foi melhor adequado para a CPA 2, caracterizando um melhor desempenho do modelo na simulação de vazões mínimas. Embora as vazões de pico tenham sido subestimadas na maioria dos anos, o ajuste não foi negativamente sacrificado nesses termos.

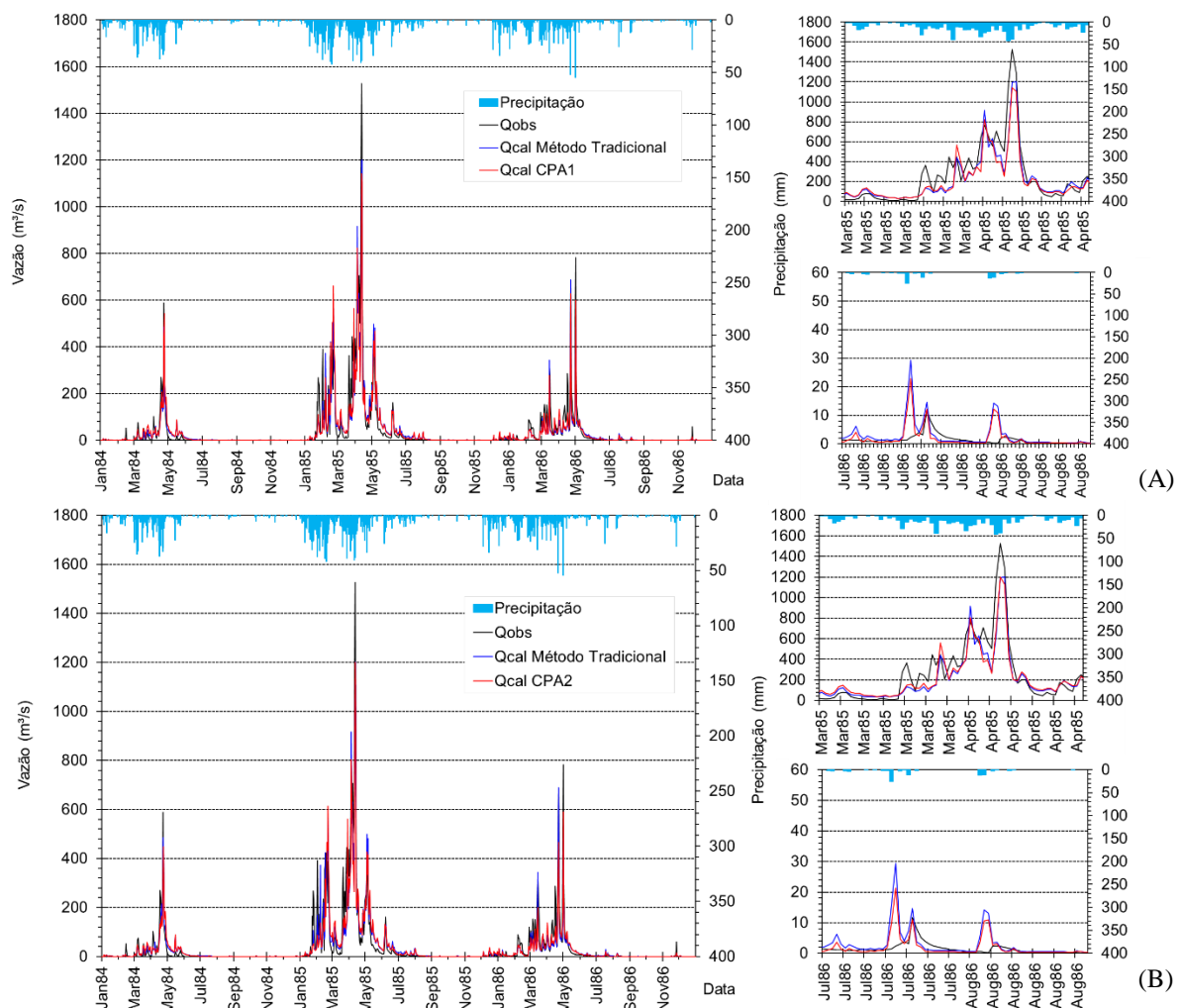


Figura 39 – Comparação dos hidrogramas observados e calculados em parte do período de calibração. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Com relação à análise de dispersão entre as vazões calculadas e observadas o período de validação para ambos CPA1 e CPA2 apresenta menor dispersão quando comparado ao método tradicional e ao período de calibração. Embora assim como comentado anteriormente não deixar claro a existência de erro sistemático ou tendência do modelo em superestimar ou subestimar as vazões observadas, seja no período de calibração como no de validação (Figura 40). É possível perceber que a aplicação do método alternativo (CPA1 e CPA2) apresentou dispersão relativamente similar tanto na calibração como na validação. Nota-se uma distribuição assimétrica positiva entre as vazões calculadas para o período de calibração.

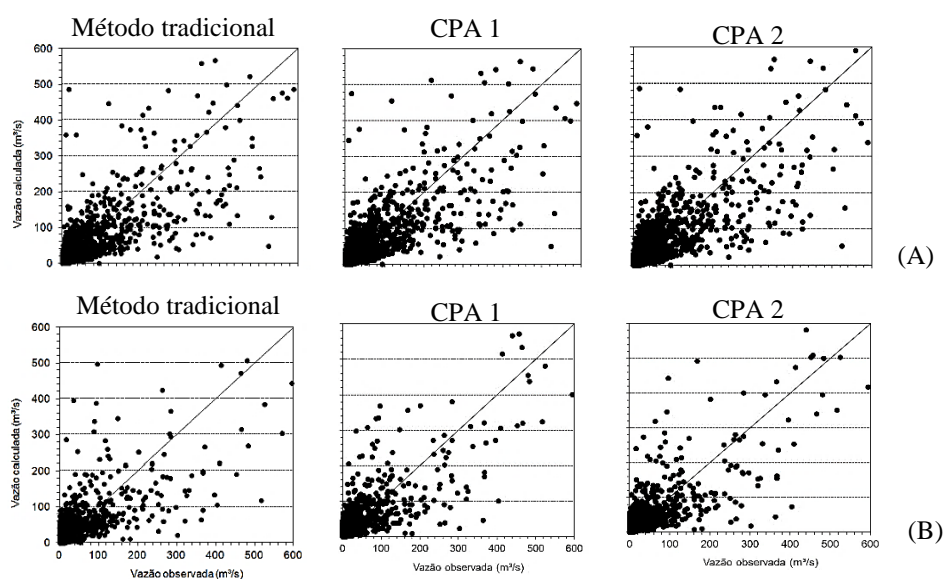


Figura 40 – Correlações entre vazões observadas e calculadas pelo método tradicional e alternativo nos períodos de (A) calibração (superiores) e (B) validação (inferiores).

(Fonte: Autoria própria, 2017)

Analisando a curva de permanência das vazões observadas e calculadas, chega-se às mesmas verificações citadas anteriormente. A análise visual das curvas de permanência permite a constatação de que tanto no período de calibração quanto no de validação, as vazões simuladas acima da permanência de 5% do tempo foram superestimadas, sobretudo nas permanências mais baixas (Figura 41 A). Com relação às vazões nas permanências inferiores a 5%, ou seja, as maiores vazões, o modelo subestimou as vazões até 1% na calibração e até 2% na validação. Para as vazões acima de 60% de excedência (Q60) tanto na calibração como na validação, na CPA 2 (curva verde) verifica-se uma melhora nas

estimativas valores de vazão, como pode ser observado na Figura 41. Já para as vazões entre 20 a 60% foram melhor representadas pela CPA1 (curva laranja).

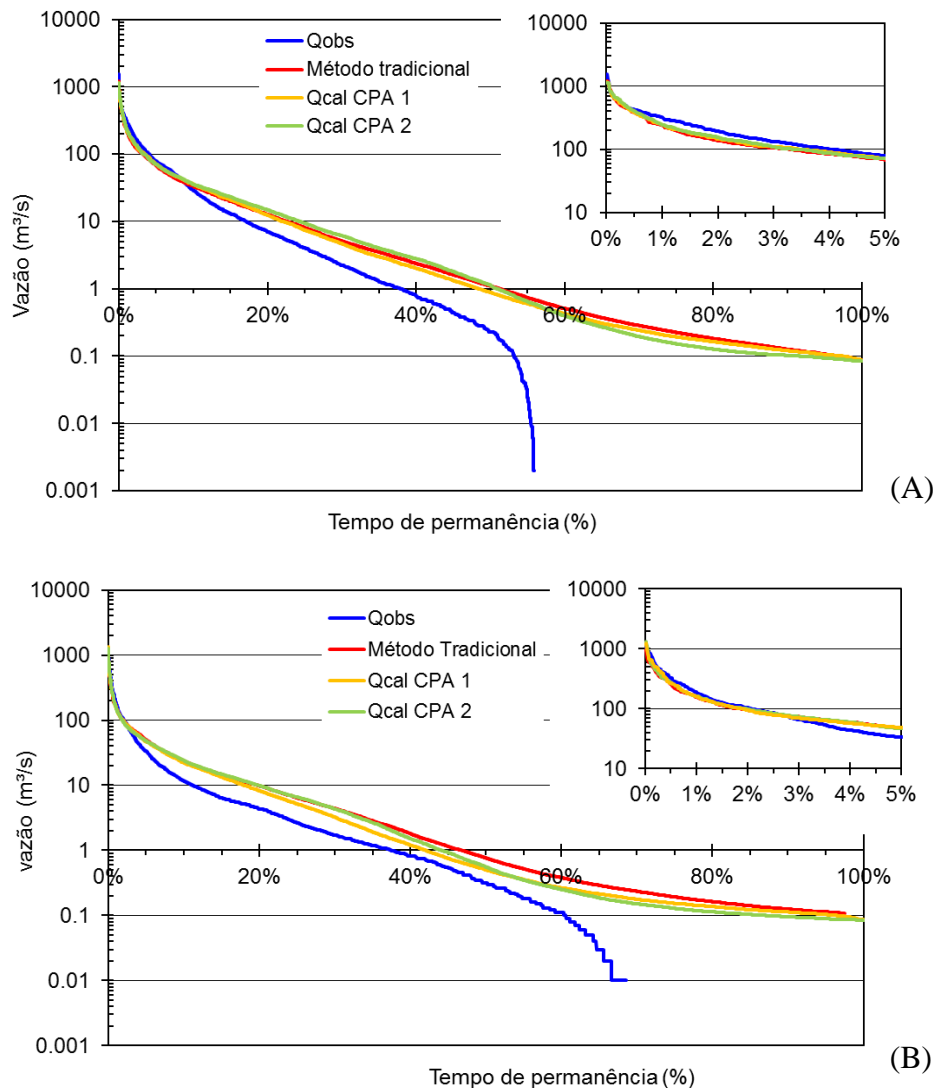


Figura 41 – Curva de permanência das vazões observadas e calculadas pelo método alternativo e tradicional nos períodos de (A) calibração e (B) validação. (Fonte: Autoria própria, 2017)

Um valor de referência frequentemente extraído desta curva é o de 90% de permanência (Q90%), o qual representa a vazão superada ou igualada em 90% do tempo. Na curva de vazões observada o valor de Q90% foi de 0,0 m³/s, na simulada foi de 0,121 m³/s (CPA 1), 0,102 m³/s (CPA 2) e 0,130 m³/s (método tradicional), enquanto na validação o

valor observado também foi 0,0 m<sup>3</sup>/s e o simulado 0,113 m<sup>3</sup>/s (CPA 1), 0,095 m<sup>3</sup>/s (CPA 2) e 0,114m<sup>3</sup>/s (método tradicional). Na Figura 41 também pode-se observar que as curvas de permanência no período de validação (Figura 41B) permaneceram mais próximas às vazões observadas do que o observado no período de calibração (Figura 41A).

Em síntese, observa-se que a aplicação do método alternativo no período chuvoso e de estiagem quando calibrados com as FO B (EKG, NSDlog e EV) apresentou resultados melhores do que calibrados com a FO A (NS, NSlog e  $\Delta V$ ), tendo em vista que a CPA 2 se sobressaiu quando comparada com a CPA 1 e o método tradicional de calibração na maioria das análises realizadas neste estudo.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais de estimativa de chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB com diferentes combinações de FO, em busca de possíveis conjuntos de FO a serem utilizados para analisar alguns aspectos da hidrologia de macro-escala em regiões semiárida. Além disso, foram avaliados métodos alternativos de calibração com o intuito de alcançar aprimoramento do processo de calibração do modelo MGB-IPH nas mesmas condições.

De modo geral, pode-se concluir que o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH representa satisfatoriamente o padrão geral do regime de vazão observado da bacia hidrográfica do rio Piancó. Em termos da sazonalidade das vazões, da distinção de anos mais secos e anos mais úmidos, do instante de tempo de subida e descida dos hidrogramas e da intensidade das cheias de pequeno e médio porte na maioria das calibrações realizadas.

Os resultados obtidos neste estudo, baseados em vinte FO, corroboram estudos anteriores mostrando claramente a sensibilidade e importância da escolha destas funções nos resultados da calibração, o que justifica a utilização da abordagem multiobjetivo.

O algoritmo de otimização apresentou satisfatória capacidade de convergência, uma vez que conseguiu atingir valores próximos aos ótimos teóricos para cada função objetivo. Algumas FO, como REMQ e REMQbv, apresentaram maior amplitude com relação ao valor ótimo teórico desejado e os valores da região de Pareto encontrados na maioria das calibrações que utilizaram tais funções.

Com relação as FO que obtiveram melhores desempenhos nas calibrações se destacaram aquelas que minimizam os desvios quadrados (NS, DSD, HF, D e EKG), na maioria das calibrações realizadas apresentaram valores satisfatórios. Como o esperado estas funções foram tendenciosas em superestimar vazões mais baixas dos hidrogramas, apresentando maior sensibilidade as vazões mais elevadas.

As vazões mais baixas do hidrograma foram melhor representadas quando utilizados os valores dos parâmetros obtidos com base na minimização das funções TREMQ e NSDlog, embora ambas não obtiveram valores tão próximos ao ótimo teórico desejado. Entretanto,

foi evidente que as calibrações que continham estas FO em sua combinação relativamente melhoraram o desempenho do modelo MGB-IPH em estimar as vazões mais baixas, apesar que concomitantemente também foi acompanhado de uma relativa piora na estimativa das vazões mais altas, principalmente, com relação a função TREMQ. O coeficiente NSDlog apesar de ser uma função de natureza logarítmica assim como o NSlog, obteve estatísticas bem melhores quando comparado a NSlog na maior parte das calibrações. De certa forma, melhorou o ajuste dos desvios entre vazões calculadas e observadas para rios intermitentes.

As FO que melhor representaram volume total escoado neste estudo foram EV e FCP. Combinações de FO com EV e FCPerm demonstraram melhor desempenho quando comparadas com as combinações com  $\Delta V$  e DCPerm para a maior parte das calibrações realizadas.

No geral, as estimativas das vazões testadas com modelo MGB-IPH bons ajustes. Os melhores conjuntos de funções objetivo foram representados pelas calibrações CALIB 92 (EKG - NSDlog - EV) e CALIB 111 (NSD - NSlog - FCPerm), sendo estes mais adequados para rios intermitentes.

Com relação a aplicação do método do fracionamento do hidrograma das vazões observadas, constatou-se que apesar de mínimas as diferenças entre os fracionamentos, os melhores resultados foram obtidos pelos fracionamentos com a combinação de FO: EKG, NSDlog e EV. Os coeficientes das medidas de desempenhos do método alternativo se sobressaíram quando comparados ao método tradicional, porém na comparação dos hidrogramas percebe-se que o método tradicional foi melhor na representação das vazões de pico (vazões altas). Sobretudo, para a bacia hidrográfica considerada no estudo foram encontrados valores satisfatórios na combinação testada dos limites que dividem o hidrograma das vazões observadas por faixas. Nesse sentido, a metodologia proposta apresentou resultados superiores ao método tradicional.

A abordagem do método de calibração por período do ano mostrou-se relativamente eficiente quando comparada com o método tradicional, com valores para maioria das estatísticas considerados satisfatórios embora muito próximos entre si. Com a aplicação do método obteve-se ajustes mais próximos as vazões observadas tanto nas recessões quanto nos picos dos hidrogramas. Contudo, a assim como no método do fracionamento do hidrograma a combinação de FO, EKG, NSDlog e EV, também demonstrou resultados mais adequados para rios intermitentes apesar de mínimas as diferenças entre os testes.

De maneira geral, pode-se concluir que o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH mostra potencial para modelagem de bacias de características semiáridas. Os resultados da calibração e da verificação demonstram que o modelo representa razoavelmente bem as vazões da bacia hidrográfica do rio Piancó, embora a representação da intermitência do rio ainda não foi bem simulada neste estudo como era desejado.

Contudo, é relevante mencionar que o fato do modelo hidrológico MGB-IPH não ter sido arquitetado, em termos da sua formulação matemática de representação dos processos hidrológicos, para rios com essa característica, provavelmente implica na existência dessa dificuldade em representar a intermitência do rio Piancó.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

Para continuidade desse estudo sugere-se realizar outras calibrações revendo ou melhorando representação de uso do solo e tipo de solo no modelo hidrológico. Com isso, a divisão de URHs provavelmente poderá ser alterada e assim aumentar o detalhamento do balanço hídrico dentro de cada célula, conseqüentemente, pode-se provocar certo melhoramento no ajuste do modelo nessas condições.

Este trabalho apresenta um interessante subsídio para a calibração automática multiobjetivo de modelos hidrológicos, que pode ser utilizada também para analisar a incerteza nos resultados associada aos parâmetros calibrados. Dessa forma, ainda pode ser feito um maior detalhamento quanto à verificação da influência das FO sobre a sensibilidade de cada parâmetro calibrado no modelo.

Também pode ser abordada uma análise sobre as funções objetivos com investigações em outros processos intermediários, como por exemplo a evapotranspiração, tendo em vista que esta também é uma variável muito sensível às condições climáticas da região semiárida. Com o auxílio do sensoriamento remoto, através de imagens de satélite é possível obter dados observados para validar o estudo, considerando a falta de dados medidos (estimados) para grandes áreas como é o caso da bacia hidrográfica do rio Piancó.

Outro ponto interessante seria adaptar o modelo MGB-IPH quanto a sua formulação matemática de representação dos processos hidrológicos para considerar de forma mais detalhada as características das regiões semiáridas, como por exemplo, a questão da intermitência dos rios.

Com relação aos métodos de calibração alternativos apresentado neste estudo, no método do fracionamento do hidrograma seria interessante testar outros coeficientes e limites, como também usar outro critério de escolha para o melhor conjunto de parâmetros para cada faixa. Por exemplo, para a faixa de vazões altas escolher aquele conjunto parâmetros que possuir o menor valor referente a FO1, visto que esta apresenta maior sensibilidade as vazões altas. Com isso, o critério de escolha estará diretamente relacionado com a faixa de calibração em questão. A mesma abordagem também pode ser usada na calibração por período do ano, no período úmido a escolha para o melhor conjunto de parâmetros deverá dar maior ênfase para a FO1 (sensibilidade as vazões altas) e no período seco a FO2 (sensibilidade as vazões baixas).

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. da S.; VELHO, H. F. de C.; GOMES, V. C.F. Calibrating an hydrological model by an evolutionary strategy for multi-objective optimization. **Inverse Problems in Science and Engineering**. V. 21, N. 3, p. 438–450, 2013.

AKHTAR, M.; AHMAD, N.; BOOIJ, M. J. Use of regional climate model simulations as input for hydrological models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 1075–1089, 2009.

BASTIDAS, L.A.; GRUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. Parameter estimation. In: SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. (Org). Mathematical models of large watershed hydrology. **Water Resources Publications**. v.891, p. 25-66, 2002.

BENNETT, N. D.; CROKE, B. F.W.; GUARISO, G.; GUILLAUME, J. H.A.; HAMILTON, S. H.; JAKEMAN, A. J.; LIBELLI, S. M.; NEWHAMA, L. T. H. NORTON, J. P.; PERRIN, C.; PIERCE, S. A.; ROBSON, B.; SEPPELT, R.; VOINOV, A. A.; FATH, B. D.; ANDREASSIAN, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**. v.40, p. 1-20, 2013.

BEVEN, K. **Rainfall-Runoff modelling**. The Primer. John Wiley and Sons, Chichester, UK. 489p., 2001

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação de eficiência de um algoritmo evolucionário multiobjetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 37–60, 2009.

BOYLE, D. P., GUPTA, H.V. E SOROOSHIAN, S. Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strengths of manual and automatic methods, *Water Resources Research*, v.36, n.12, p. 3663–3674, 2000.

COLLISCHONN. W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). UFRGS. Porto Alegre, 270p., 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C.E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, 52-5, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Ajuste multi-objetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v 6, n 1, p. 95-118, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 8, n.3, p. 27-39, 2003.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 1: Ajuste e Verificação do Modelo Hidrológico Distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. v.10, n.4, p. 43-59, 2005.

COSTA, B. S. Modelagem hidrológica utilizando um sistema computacional: estudo de caso do Rio Cachoeira-Bahia. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – UESC. ILHÉUS – BAHIA. 121p., 2014.

CRISS, R. E.; WINSTON, W. E. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. **Hydrol. Process**. v.22, p. 2723–2725, 2008.

DARIANE, A. B.; JAVADIANZADEH, M. M. Towards an Efficient Rainfall–Runoff Model through Partitioning Scheme. **Water**, v. 8, n. 63, p. 17, 2016.

DAKHLAOU, H.; BARGAOU, A. Z.; BÁRDOSSY, A. Toward a more efficient Calibration Schema for HBV rainfall–runoff model. **Journal of Hydrology**, p. 161–179, 2012.

DECKERS, D.L.E.H.; BOOIJ, M.J.; RIENTJES, T.H.M.; KROL, M.S. Catchment variability and parameter estimation in multi-objective regionalisation of a rainfall-runoff model. **Water Resour. Manag**. v.24, n.14, p. 3961-3985, 2010.

EFSTRATIADIS, ANDREAS; KOUTSOYIANNIS, DEMETRIS. One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review Multi-objective calibration approaches in hydrological modelling. **Hydrological Sciences Journal**. v.55, n.1, p. 58–78, 2010.

ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; RIBEIRO NETO, A. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 81-91, 2013.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

FELIX, W. de S. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). UFPB, João Pessoa, 126p, 2015.

FELIX, W. de S.; PAZ, A. R. da. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH**, Porto Alegre. v. 21, p. 1-14, 2016.

FENICIA, F.; SOLOMATINE, D. P.; SAVENIJE, H. H. G.; MATGEN, P. Soft combination of local models in a multi-objective framework. **Hydrology Earth System Sciences**. v.11, p. 1797–1809, 2007.

FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M. de; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Eng Sanit Ambient.** v.21, n.4, p. 697-707, 2016.

GETIRANA, A. C. V.; ESPINOZA, J.C.V.; RONCHAIL, J.; ROTUNNO FILHO, O.C. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, v. 404, p. 304–322, 2011.

GETIRANA, A, C, V.; ROUNNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico com Observações in Situ, Altimetria e Gravimetria Espaciais. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.16, n.1, p. 29-45, 2011.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 80 - 91, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, Vol. 4, n°. 2, p.135-143, 1999.

GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. **Water Resour Res.** 34(4), p.751–764, 1998.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. F. G.; MEDEIROS NETO, F. D. de. Algoritmos evolucionários na determinação da configuração de custo mínimo de sistemas de co-geração de energia com base no gás natural. **Pesquisa Operacional**, v.25, n.2, p.231-259, 2005.

HALL, M. J. How well does your model fit the data? **Journal of Hydroinformatics**. v.3, p. 49-55, 2001.

HOGUE, T. S.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. A Multistep Automatic Calibration Scheme for River Forecasting Models. **Journal of Hydrometeorology**, Vol 1, p. 524-542, 2000.

IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S. **Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu**: elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu. Fortaleza, 2013. Relatório Parcial: RP-03.

JANSSEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v. 83, p. 55-66, 1995.

KOLLAT, J. B.; REED, P. M.; WAGENER, T. When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful? **Water Resources Research**, v. 48, p.1-19, 2012.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v.5, p. 89–97, 2005.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; KOIVUSALO, H.; SETÄLÄ, H. A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. **Urban Water Journal**, v. 10, p. 394-410, 2013.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, vol. 35, n°.1, p. 233-241, 1999.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrological Research**, v.12, p.173-189, 2007.

LINDSTRÖM, G.; JOHANSSON, B.; PERSSON, M.; GARDELIN, M.; BERGSTRÖM, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, **Journal of Hydrology**, v.201, p. 272-288, 1997.

MCCUEN, RICHARD H. Assessment of Hydrological and Statistical Significance. **Journal of Hydrologic Engineering**, p. 1-2, 2016.

MELLER, A.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo-Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.17, n.3, p. 209-224, 2012.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.

MULETA, MISGANA K. Model Performance Sensitivity to Objective Function during Automated Calibrations. **Journal of Hydrologic Engineering**, V. 17, n. 6, p.756-767, 2012.

NASCIMENTO, L. S. V.; REIS JR., D. S.; MARTINS, E. S. P. R. Avaliação do Algoritmo Evolutivo Mopso na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**.V.14, n.1, p. 85-97, 2009.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.

NUNES, F. M. S.; FARIAS, C. A. S. de; MARTINS, W. A.; ALMEIDA, R. N.; LEITE, J. C. A. Aplicação do Tank Model para estimativa mensal de vazões na bacia hidrográfica do rio piacó. **Revista Verde**, v. 9, n. 1, p. 343-349, 2014.

NUNES, F. M. S.; FARIAS, C. A. S. de; MARTINS, W. A.; ALMEIDA, R. N.; LEITE, J. C. A. Modelagem hidrológica via SMAP para estimativa de vazões mensais na bacia do rio Piacó. **Revista Verde**, v. 9, n. 3, p. 289 – 295, 2014.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; GONÇALVES, L. G. G. de; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; SILVA, J. S. da. Assimilating in situ and radar altimetry

data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 17, p. 2929–2946, 2013.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 333–346, 2013.

PARIS, A.; OLIVEIRA, G. G.; BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. **Método alternativo de calibração e simulação de modelos hidrológicos baseado no fracionamento do hidrograma**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, 2011, Maceió – AL. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C. ; COLLISCHONN, W. ; VICTORIA, D. C. ; ANDRADE, R. G. . **Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x minibacias**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2011, Maceió. Anais... XIX SBRH, 2011.

PECHLIVANIDIS, I.G.; JACKSON, B.M.; MCMILLAN, H.K.; GUPTA, H.V. Using an informational entropy-based metric as a diagnostic of flow duration to drive model parameter identification. **Journal Global NEST**, v. 14, n. 3, p. 325-334, 2012.

REED, P.M.; HADKA, D.; HERMAN, J.D.; KASPRZYK, J.R.; KOLLAT, J.B. Evolutionary multiobjective optimization in water resources: **The past, present, and future**, **Advances in Water Resources**, v.51, p. 438-456, 2013.

RIBEIRO NETO, A.; COLLISCHONN, W.; SILVA, R. C. V.; TUCCI, C.E.M. **Hydrological Modelling in Amazonia** - use of the MGB-IPH Model and Alternative Data Base. In: VII IAHS Scientific Assembly, 2005, Foz do Iguaçu – PR – Brasil. IAHS Publ. v. 303, 2006.

RIENTJES, T.H.M.; MUTHUWATTA, L.P.; BOS, M.G.; BOOIJ, M.J.; BHATTI, H.A. Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v.505, p. 276–290, 2013.

ROMANOWICZ, R.J.; OSUCH, M; GRABOWIECKA, M. On the Choice of Calibration Periods and Objective Functions: A Practical Guide to Model Parameter Identification. **Acta Geophysica**, vol. 61, n° 6, p. 1477-1503, 2013.

RWETABULA, J.; SMEDT, F.; REBHUN, M. Simulation of hydrological processes in the Simiyu River, tributary of Lake Victoria, Tanzania. **Water SA**. v. 38, n°. 4, p. 623-632, 2012.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, v.21, p. 2075–2080, 2007.

SILVA. B. C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) UFRGS, Porto Alegre, 2005.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARK, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. v. 12, nº 3, p. 31-41, 2007.

SILVA, D. F.; ALCÂNTARA, C. R. Déficit Hídrico na Região Nordeste: Variabilidade Espaço-Temporal. **UNOPAR Cient. Exatas Tecnol.**, Londrina, v. 8, n. 1, p.45-51, 2009.

SILVA, M. T.; SILVA, V. de P. R. da; SOUZA, E. P. de; ARAÚJO, A. L. Aplicação do modelo SWAT na estimativa da vazão na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.8, n.6, p. 1615-1627, 2015.

SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. **Watershed Models**. Taylor & Francis, Boca Raton, EUA, 653 p., 2006.

SINGH, J. H.; KNAPP, V.; DEMISSIE, M. Hydrologic modeling of the iroquois river watershed using HSPF and SWAT. Champaign, Ill.: **Illinois State Water Survey**. p.1-24, 2004.

SHOPE, C. L.; MAHARJAN, G. R.; TENHUNEN, J.; SEO, B.; KIM, K.; RILEY, J.; ARNHOLD, S.; KOELLNER, T.; OK, Y. S.; PEIFFER, S.; KIM, B.; PARK, J. H.; HUWE, B. Using the SWAT model to improve process descriptions and define hydrologic partitioning in South Korea. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.18, p.539–557, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre. 668p., 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2º Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS ABRH GWP, v.1, 678p., 2005.

UFPB. Universidade Federal da Paraíba. 2001. Regionalização de vazões características de longo termo para os rios da sub-bacia 37. 40p. Convênio n. 0007/2000 entre a ANEEL e a Universidade Federal da Paraíba – Campus II.

WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H.V. Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments. Imperial College Press. 306p., 2004.

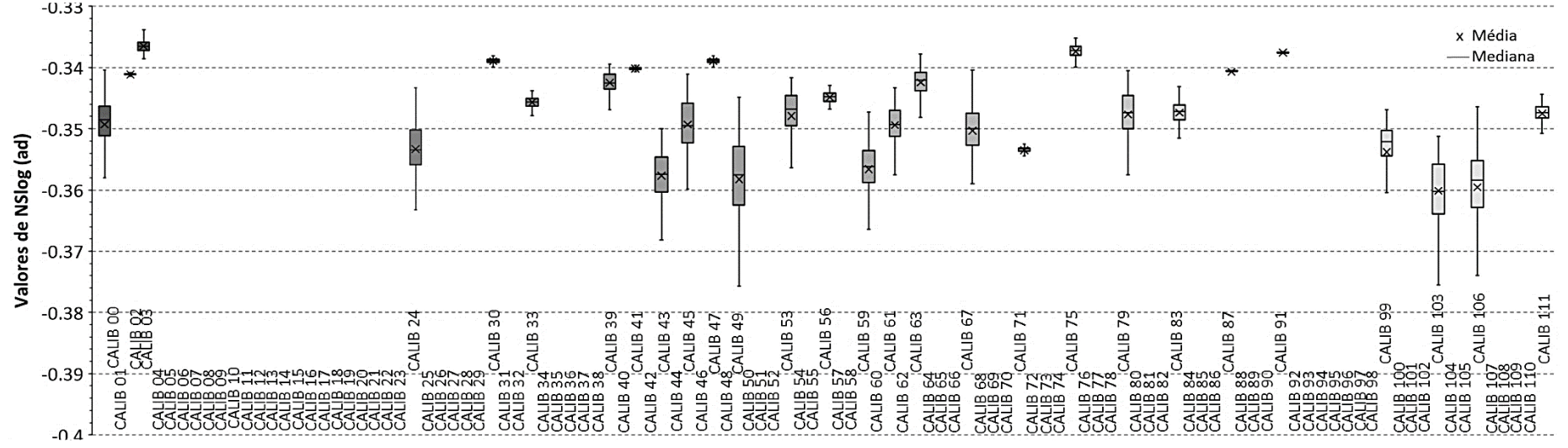
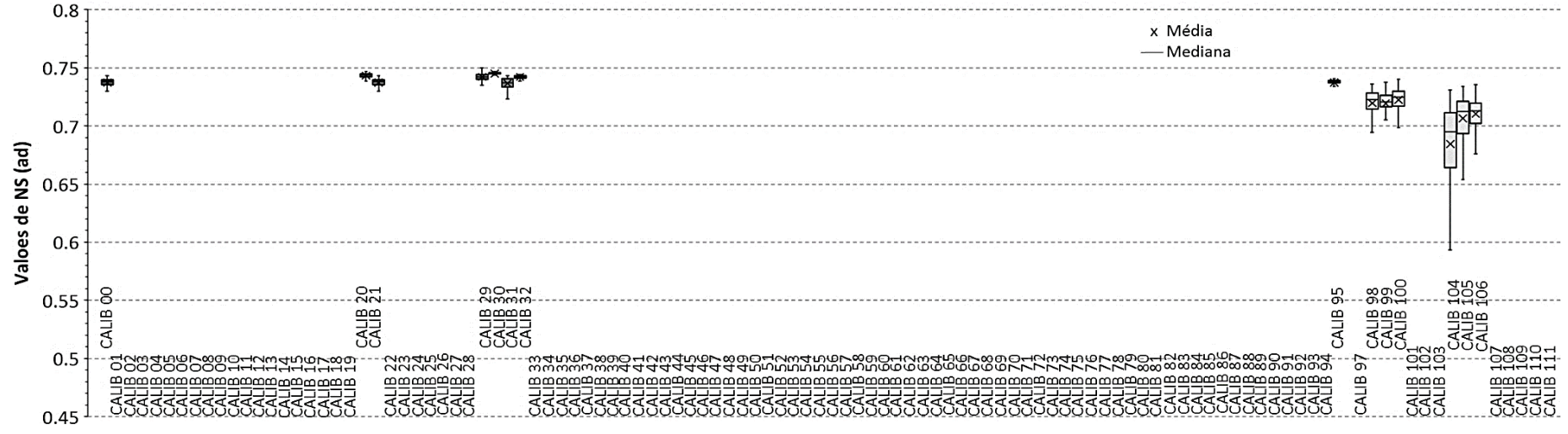
WAGNER, W., VERHOEST, N. E. C., LUDWIG, R., TEDESCO M. Contribution of meteorological input in calibrating a distributed hydrologic model in a watershed in the Tianshan Mountains, China. **Environmental Earth Sciences**. v. 74, p. 2413-2424, 2015.

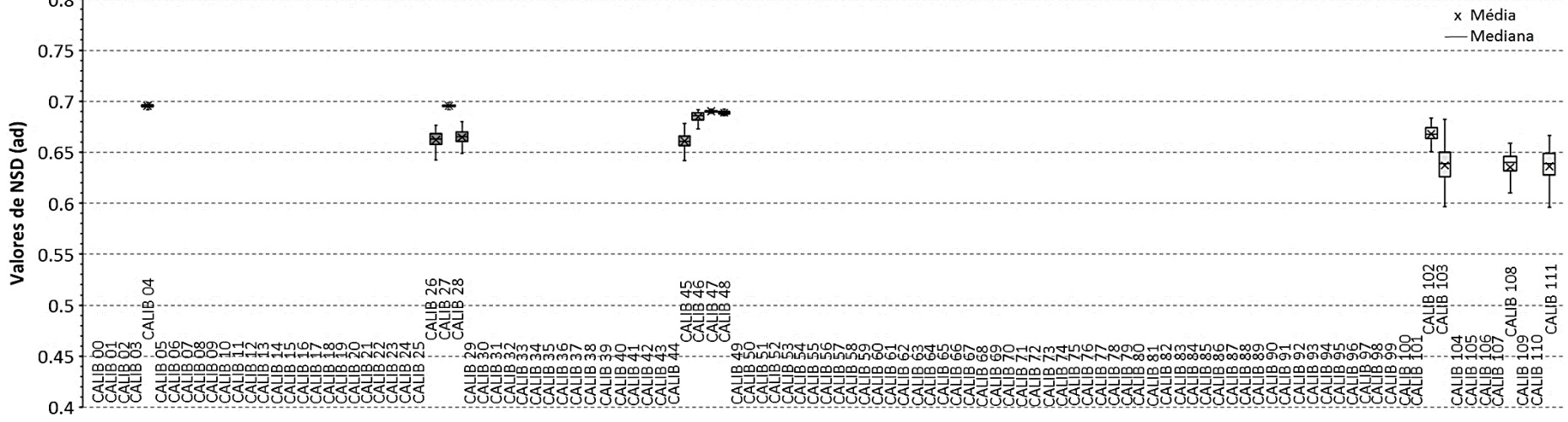
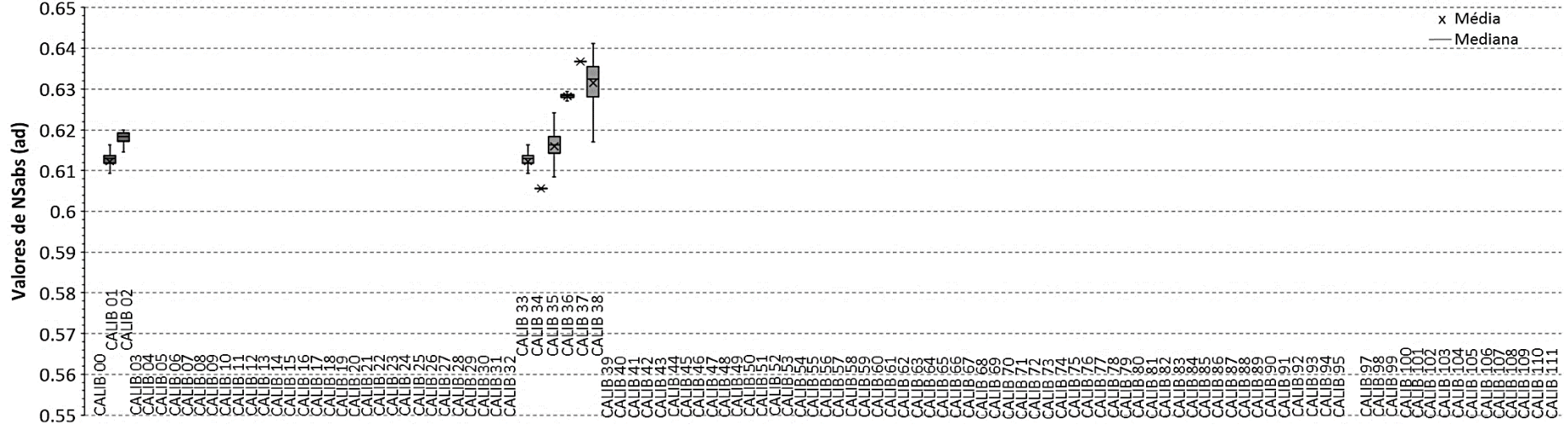
WOHLING, T.; SAMANIEGO, L.; KUMAR, ROHINI. Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed hydrological model of the upper Neckar catchment. **Environ Earth Sciences**, v.69, p. 453–468, 2013.

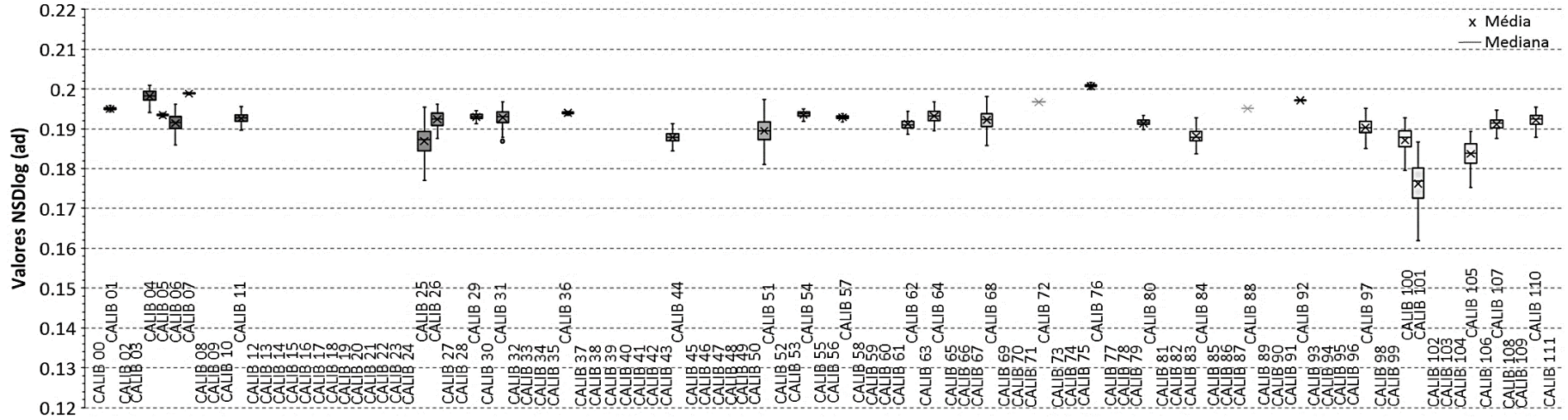
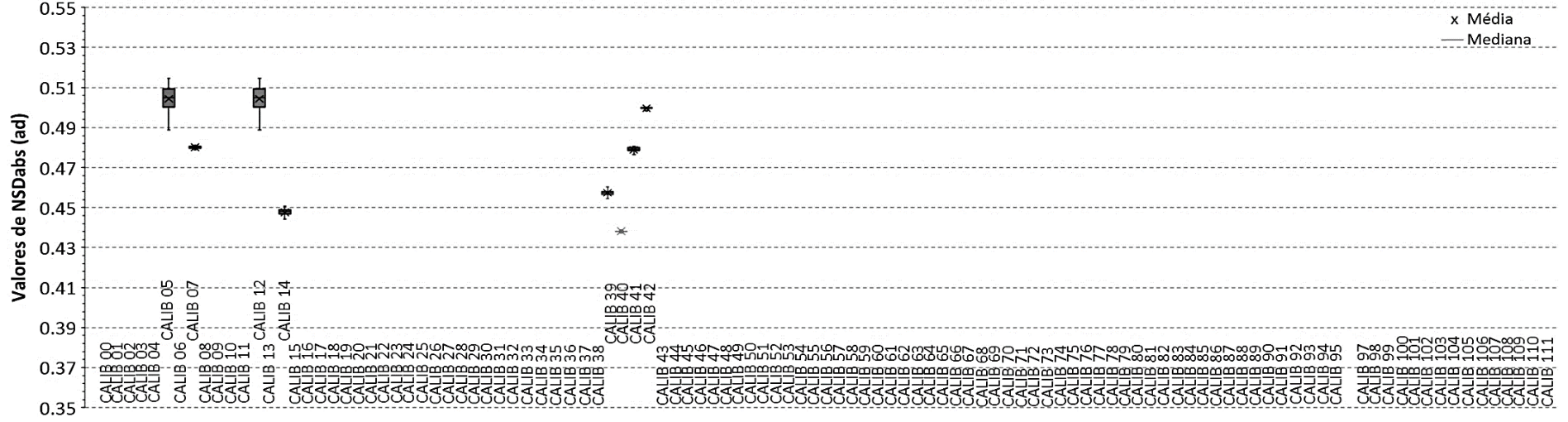
YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v.204, p. 83-97, 1998.

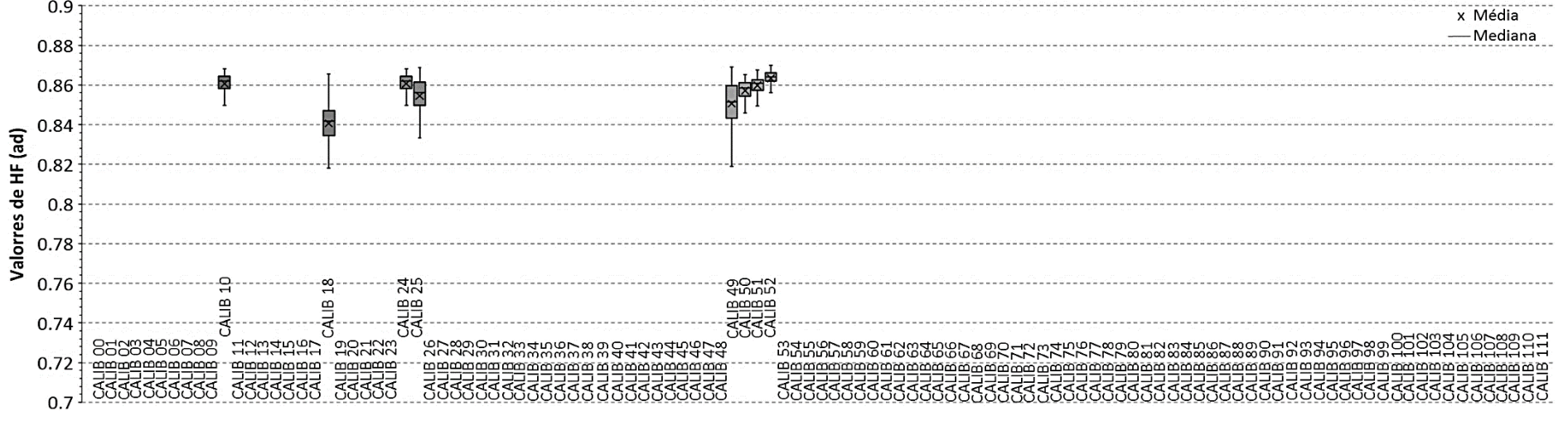
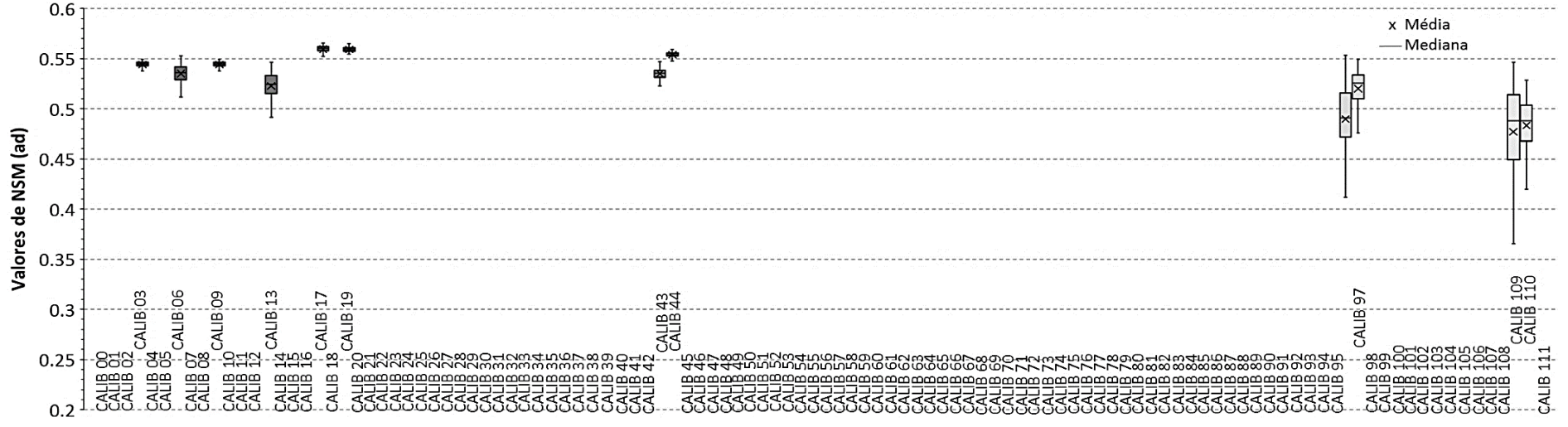
ZHANG, Y.; SHAO, Q.; ZHANG, S.; ZHAI, X.; SHE, D. Multi-metric calibration of hydrological model to capture overall flow regimes. **Journal of Hydrology**, v.539, p. 525–538, 2016.

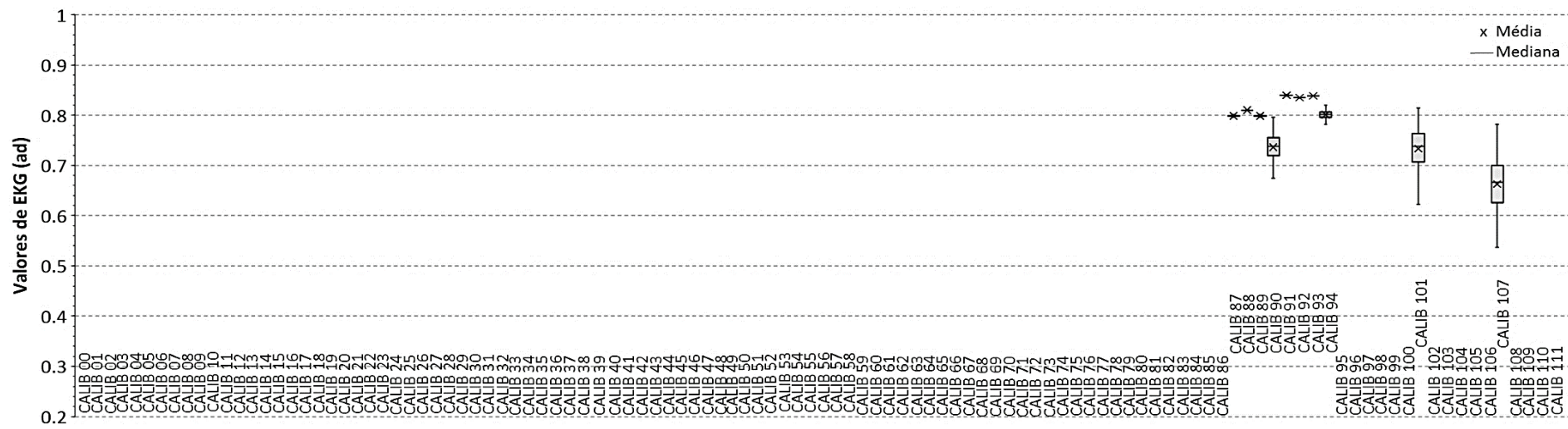
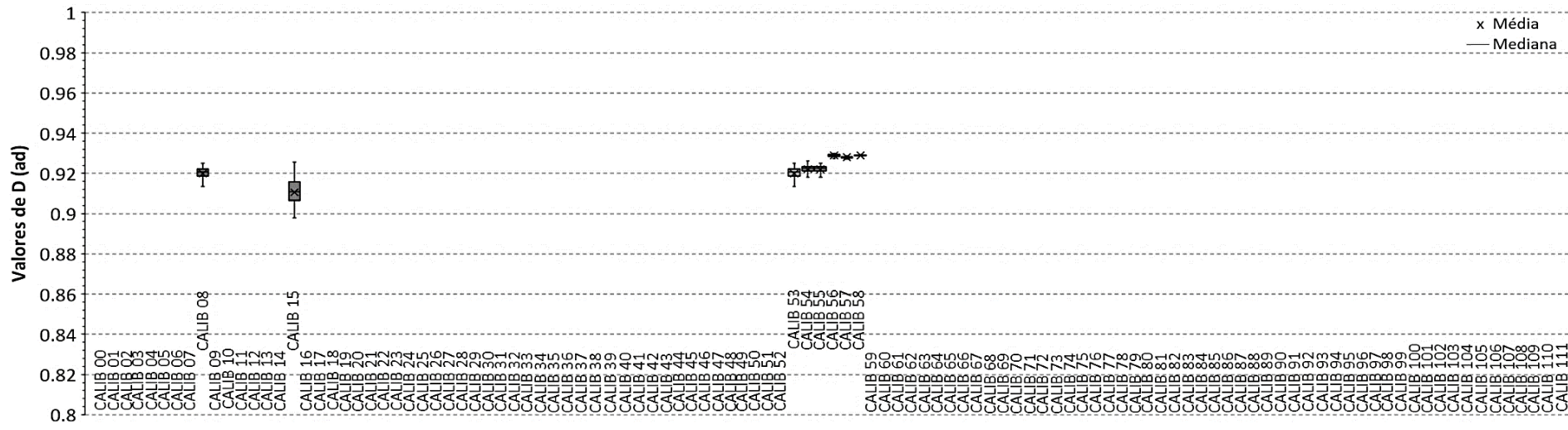
**APÊNDICE A: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA  
CALCULADOS PELO MGB-IPH COM 200 INDIVÍDUOS DAS 111  
CALIBRAÇÕES**

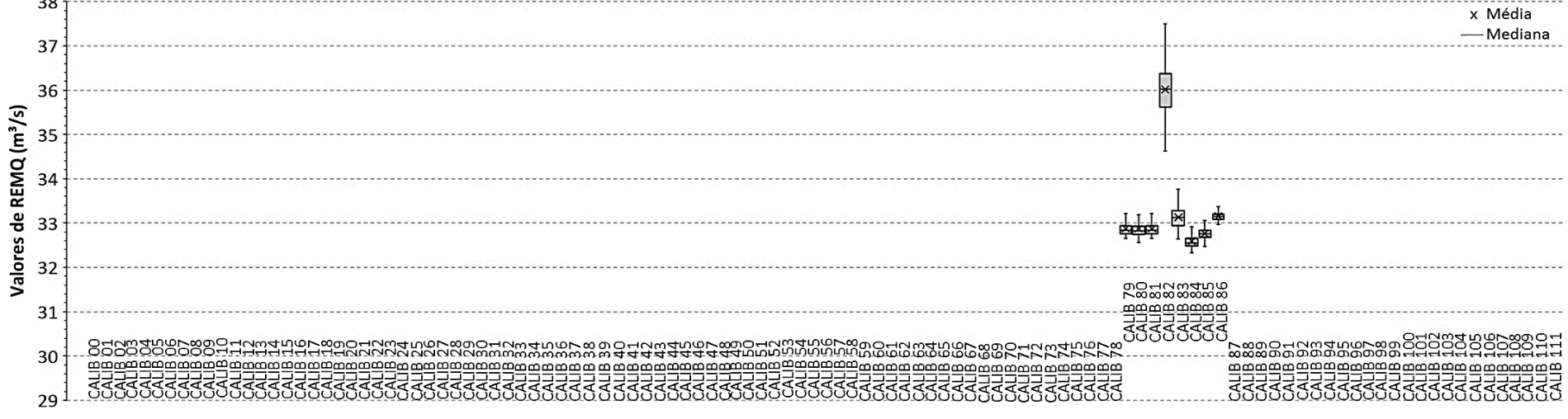
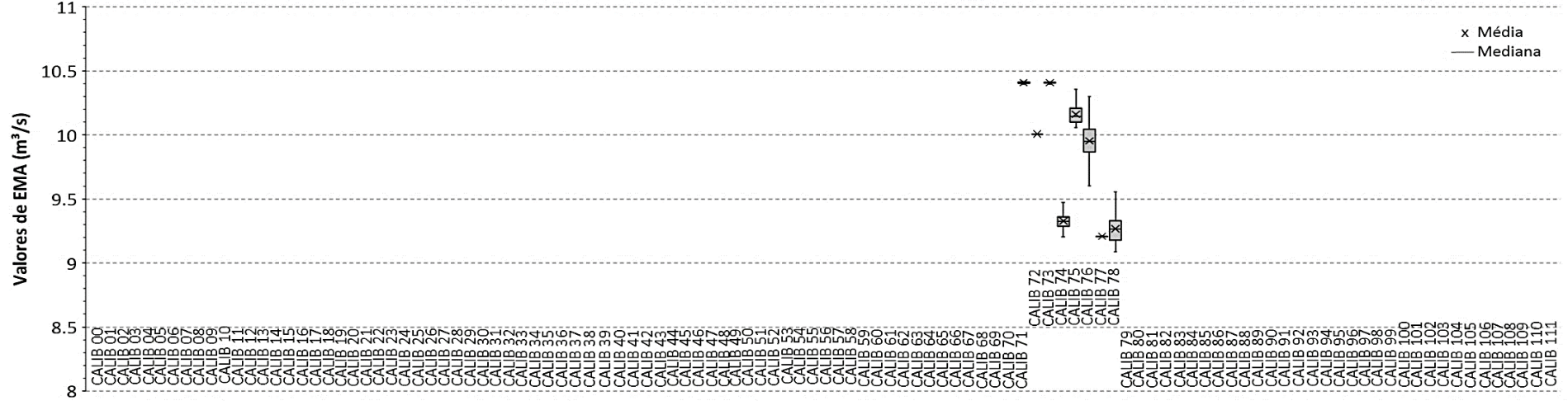


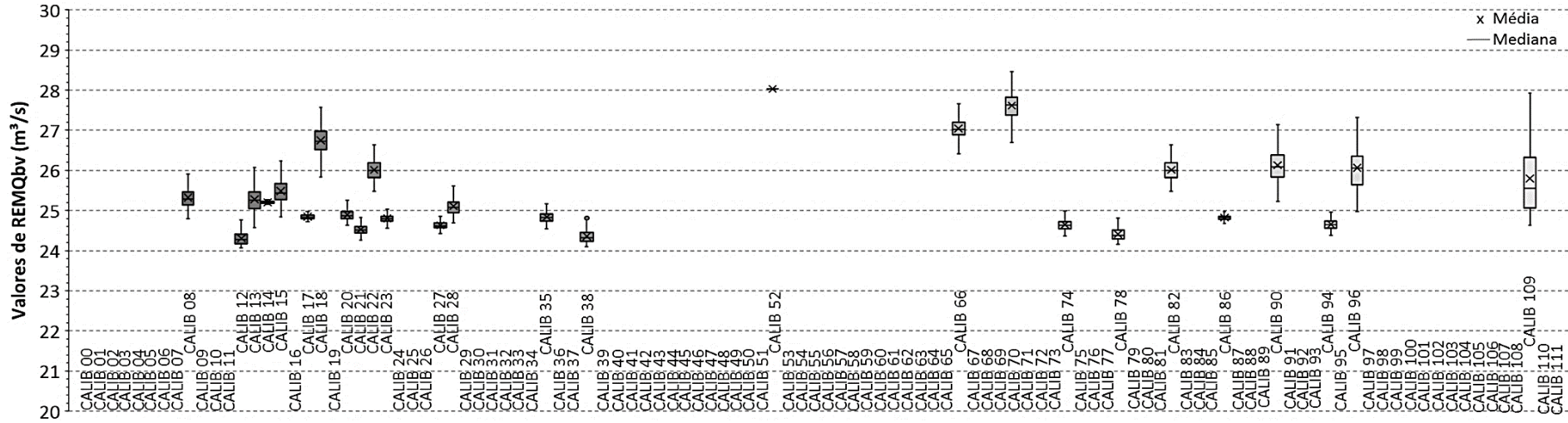
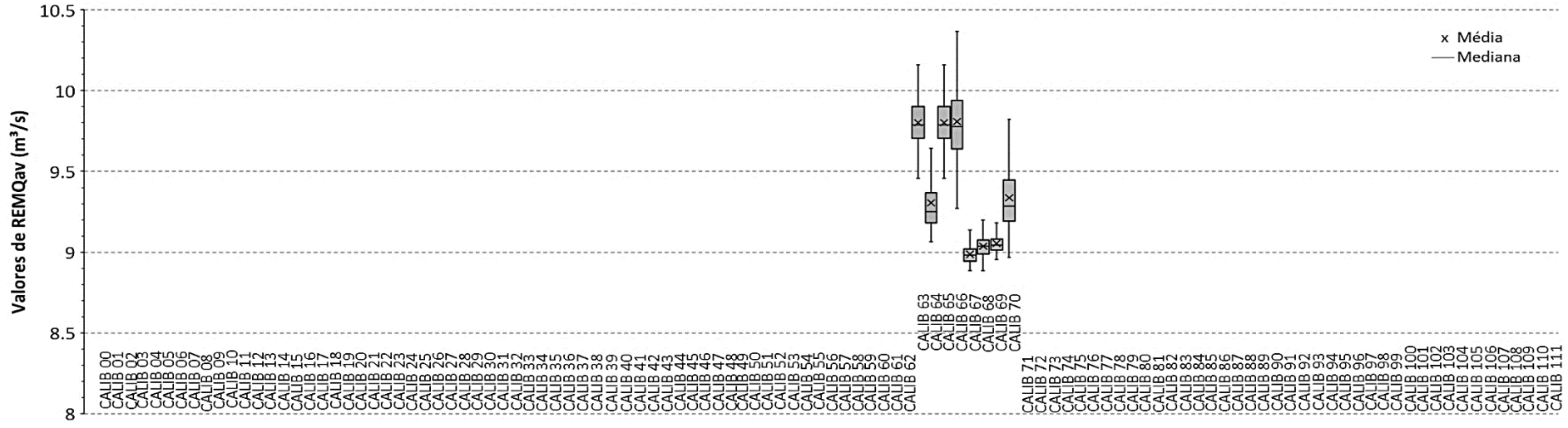


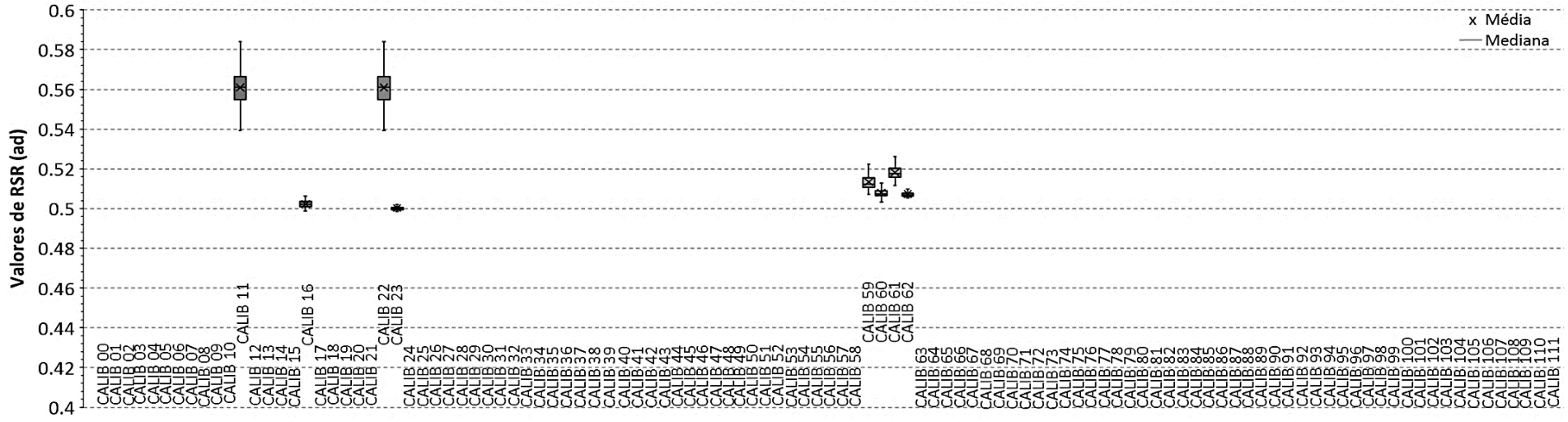
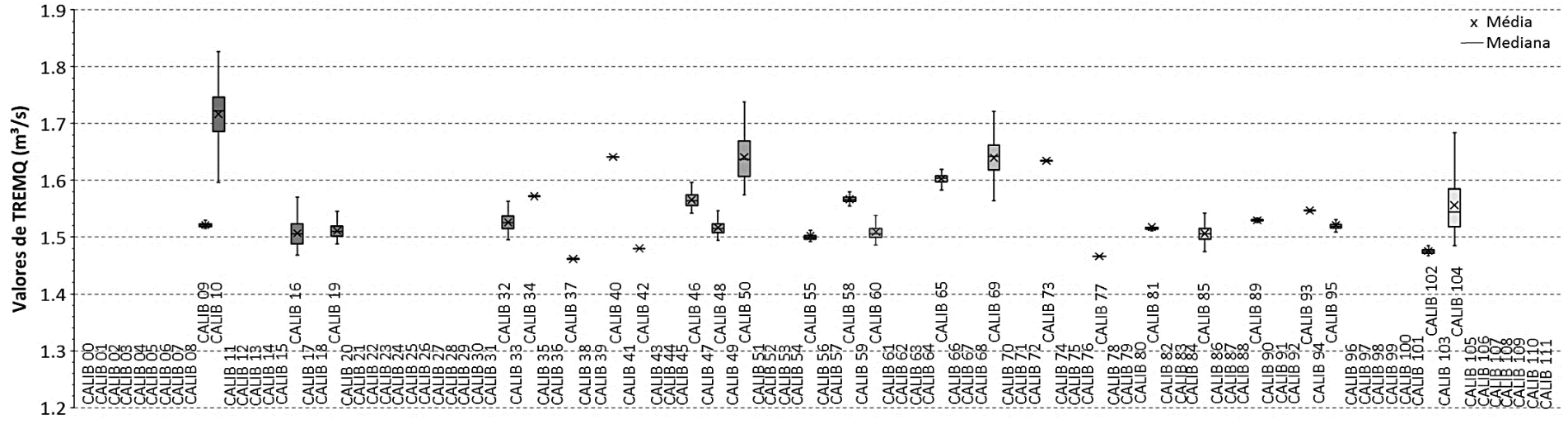


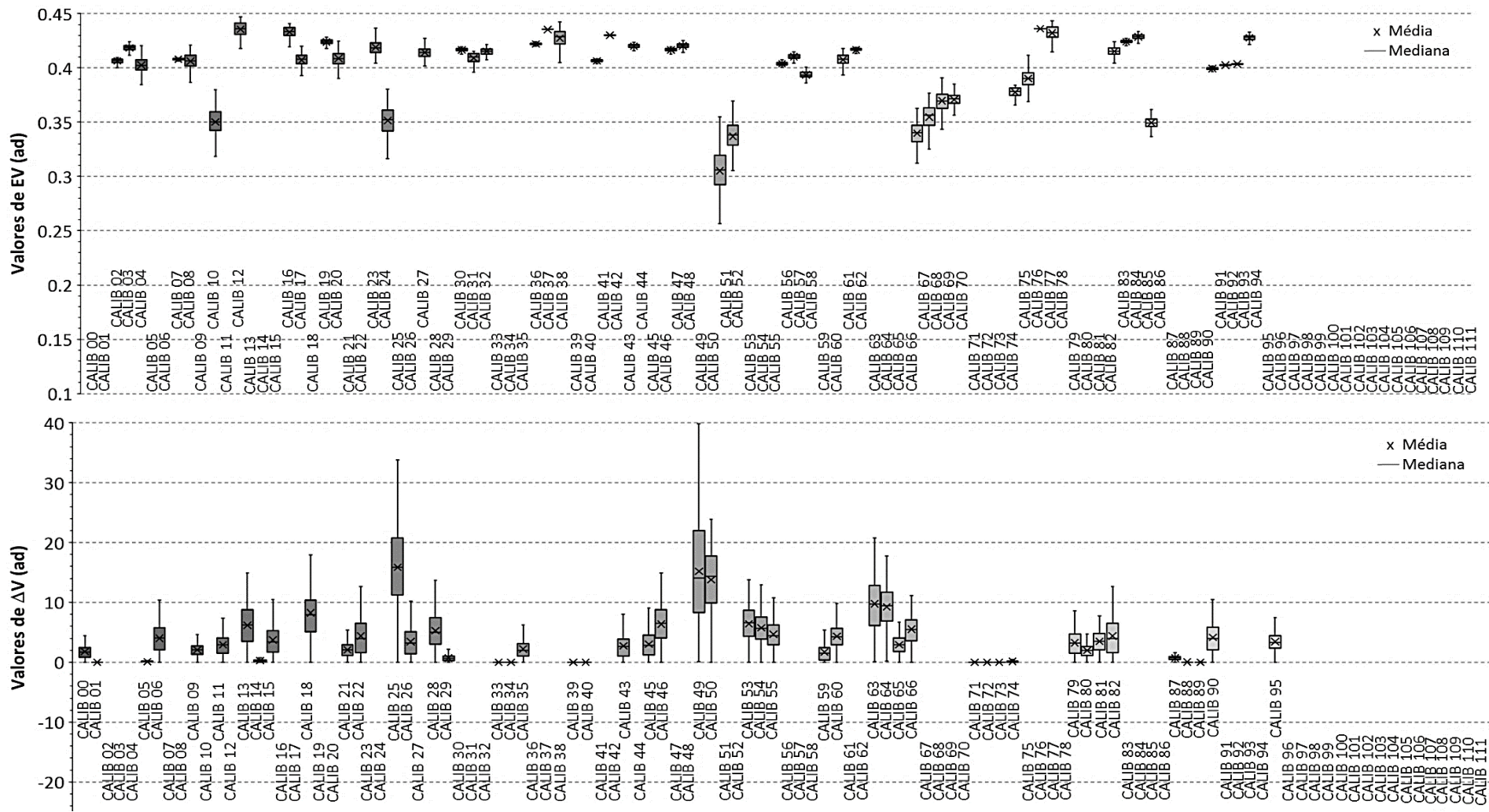


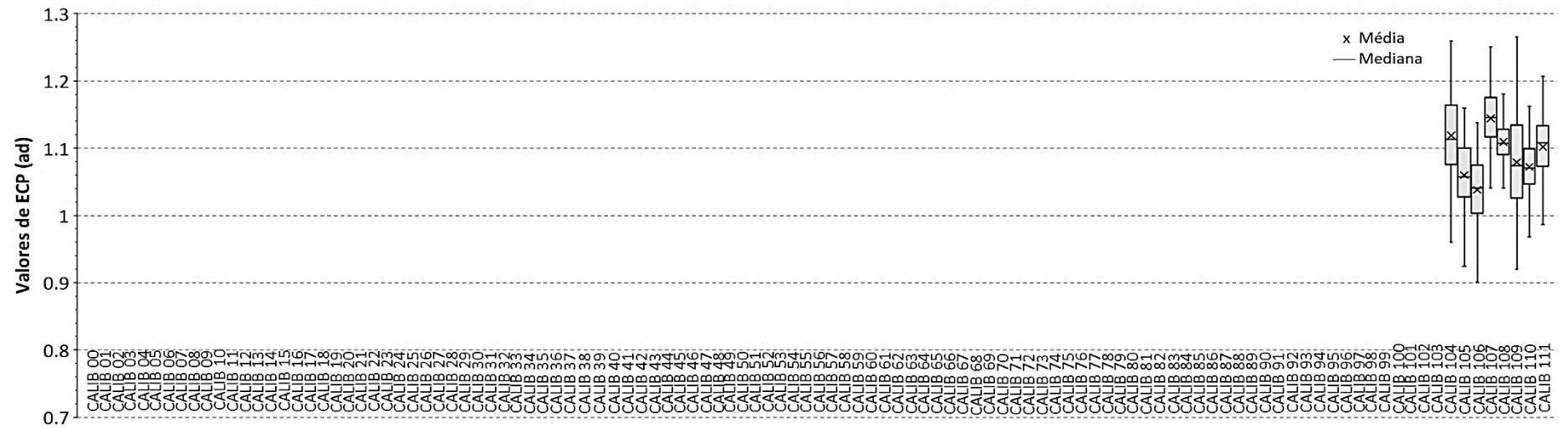
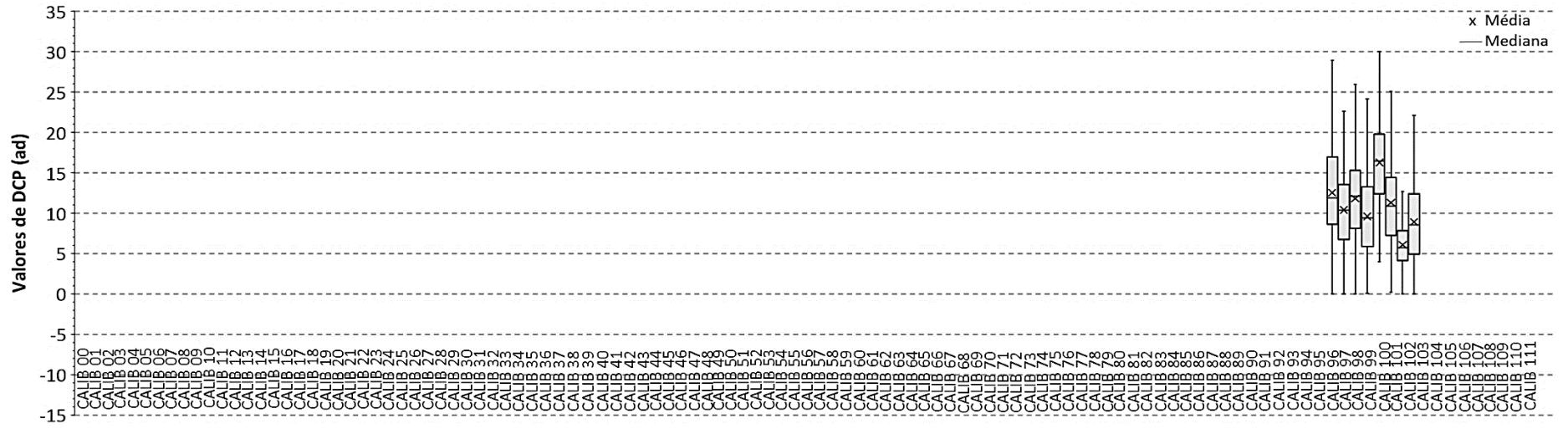












**APÊNDICE B: DISPERSÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS  
NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (1970-1990) DO MODELO MGB-IPH**

