

OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO
ATRAVÉS DE UM MODELO HIDROLÓGICO
COM ASSIMILAÇÃO DE DADOS

Margarita Maria Elisa Pereira Pessoa

Porto Alegre, RS - Brasil

Outubro de 2017

Margarita Maria Elisa Pereira Pessoa

***OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO ATRAVÉS DE
UM MODELO HIDROLÓGICO COM ASSIMILAÇÃO DE DADOS***

*Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul como
requisito parcial para a obtenção do
título de Doutor.*

Orientador: Prof. Dr. Walter Collischonn

Porto Alegre, RS – Brasil

Outubro de 2017

CIP - Catalogação na Publicação

Pereira, Margarita
OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO
ATRAVÉS DE UM MODELO HIDROLÓGICO COM ASSIMILAÇÃO DE
DADOS / Margarita Pereira. -- 2017.
145 f.
Orientador: Walter Collischonn.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Modelagem Hidrológica . 2. Assimilação de Dados
. 3. Regionalização de Vazões. 4. Bacias não
monitoradas. I. Collischonn, Walter, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Margarita Maria Elisa Pereira Pessoa

***OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO ATRAVÉS DE
UM MODELO HIDROLÓGICO COM ASSIMILAÇÃO DE DADOS***

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Douto em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Data de Provação: 23 de outubro de 2017.

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Cristian Chreties (UDELAR)

.....

Prof. Dr. Daniel Allasia (UFSM)

.....

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva (UFRGS)

Agradecimientos

Tengo tanto que agradecer al culminar esta etapa tan importante. Agradecer a las personas que me ayudaron desde que decidí salir del país para pasar largos años de estudio de postgrado fuera, personas que me recibieron en Porto Alegre, amigos maravillosos que la vida me dio, colegas del Instituto de Pesquisas Hidráulicas que fueron como hermanos todos estos años y a quienes llevaré por siempre en mi corazón. Agradecer especialmente a mi Orientador, el profesor Walter Collischonn por las enseñanzas, la motivación constante, la sensibilidad, tolerancia y paciencia. A todos los profesores del IPH de quienes he aprendido tanto, verdaderos multiplicadores de conocimiento siempre dispuestos a transmitir lo que saben, siempre dispuestos a ayudar. A algunos Ángeles que Dios puso en mi camino y que estuvieron allí en momentos difíciles, en momentos críticos aliviando las dificultades sin pedir nada a cambio. A amigos paraguayos que gané y con quienes tuve la gracia de coincidir en tiempo y espacio lejos de nuestro país. A mi Amada Familia siempre pendiente, siempre enviando fuerzas, siempre sosteniéndome en todo momento, Papá y Mamá mis ejemplos, mis Hermanos mi fortaleza, mis sobrinos mi alegría en la distancia, mi adorada Madrina mi protectora a través de la oración, mi esposo aliado de Batallas y mis dos Guerreritos, mis pequeños hijos, que Dios me entregó en medio de todo este largo proceso para darle verdadero sentido a todo este esfuerzo pero por sobre todo a Dios porque sin él nada es posible!!! A todos ustedes mi eterna gratitud!!!!

RESUMO

A estimativa de valores de vazão de referência máximos, médios e mínimos em locais sem dados constitui um desafio constante nos estudos de hidrologia. Em muitos casos este desafio é enfrentado utilizando as técnicas tradicionais de regionalização de vazões com suas diversas variantes e técnicas. Em outros casos são adotadas as técnicas de modelagem hidrológica chuva-vazão. No presente trabalho é apresentada uma ampla revisão bibliográfica referente aos métodos que são utilizados a nível global em pós da obtenção de dados de vazões em locais sem monitoramento. A metodologia para estimativa de vazões em locais sem dados proposta aqui é baseada na modelagem hidrológica com um modelo chuva-vazão distribuído, combinada com uma técnica de assimilação de dados de vazão observados. São apresentados testes da metodologia utilizando o modelo MGB-IPH para todas as bacias contidas total ou parcialmente no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados são avaliados através da comparação entre as vazões de referência obtidas pela metodologia proposta e as vazões de referência calculadas com base nos dados observados em postos fluviométricos que não são utilizados no processo de assimilação de dados e cujos locais são chamados de Pseudo Não Monitorados. As vazões de referência estimadas com base na metodologia proposta também são comparadas com os valores encontrados utilizando equações de regionalização de vazões desenvolvidas para a mesma região e um método simples de interpolação linear. A avaliação dos métodos foi realizada através da quantificação dos erros relativos médios resultantes dos 4 métodos, comparando Vazões Calculadas vs. Vazões Observadas em aqueles Locais Pseudo Não Monitorados. Em geral observa-se que a assimilação de dados contribui na melhora da estimativa das vazões de referência em locais sem dados quando comparados com os outros métodos testados a exceção do caso das vazões Q_{50} e Q_{10} onde a diminuição do ERM é mínima. Os resultados obtidos nesta pesquisa encorajam o avanço nas pesquisas dentro dessa linha seja aprimorando o próprio método testado aqui ou utilizando outras metodologias de assimilação no acoplamento ao modelo hidrológico MGB-IPH e outros.

ABSTRACT

The estimate of maximum, average and minimum reference flow in places without observed data is a constant challenge in studies of hydrological engineering. In many cases this challenge is faced using traditional techniques of regionalization of flow with its various variants and techniques. In other cases, the techniques of hydrological rainfall–runoff modelling are adopted. In the present work a broad bibliographic review is presented referring to the methods that are used at global level in post of obtaining flow data in ungauged catchments. This research presents an empirical data assimilation method applied within the MGB-IPH model to minimize the errors in the estimation of streamflow, performed through hydrologic simulations in the Rio Grande do Sul State of Brazil. The results are evaluated by comparing of the reference flow rates obtained by the proposed methodology and reference streamflows calculated based on data observed at fluviometric stations, called Pseudo-Ungauged Locations, not used in data assimilation process. The reference streamflow estimated based on the proposed methodology are also compared with the values found using regionalization equations flows developed for the same region and a simple linear interpolation method. The evaluation of the methods was carried out by quantifying the Average Relative Errors resulting from the three methods, comparing calculated flows vs. observed flows in those sites called Pseudo-Ungauged Locations. In general it is observed that data assimilation contributes to the improvement of the estimation of the reference flows in places with no data when compared with the other methods tested, except for the case of the flows Q_{50} and Q_{10} where the decrease of ERM is minimal. The results obtained in this research encourage the advancement of research within this line either by improving the method used here or by using other assimilation methodologies in the MGB-IPH or other hydrological model.

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
FIGURAS	1
TABELAS	4
SÍMBOLOS.....	5
1. INTRODUÇÃO	8
1.1 Contexto e Justificativa do Trabalho	8
1.2 Objetivos	14
2. OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM DADOS OU BACIAS NÃO MONITORADAS	15
2.1 Regionalização de Vazões	18
2.2 Simulações Hidrológicas	31
2.3 Outras Metodologias Híbridas Utilizadas no Brasil.	33
2.4 Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH.....	37
2.5 Assimilação de Dados em Simulações Hidrológicas.	41
2.5.1 Aplicação Frequente de Métodos de Assimilação de Dados.	43
2.5.2 Assimilação de dados no Modelo MGB-IPH.....	46
3. METODO DE APLICAÇÃO DO TESTE DE AVALIAÇÃO	50
4. AVALIAÇÃO DO MÉTODO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	53
4.1 Localização e Características da Região.....	53
4.2 Dados Utilizados	56
4.3 Aplicação da Sequencia do Teste de Avaliação	61
4.4 Resultados e Discussão para o Estudo de Caso	88
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	95
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
7. ANEXOS	104

FIGURAS

Figura 1 –Predição de vazões em bacias não monitoradas através do conceito de similaridade hidrológica. Fonte: (Blöschl et al., 2013).....	16
Figura 2 –Hidrograma e períodos de recessão. Fonte: Silveira (1997) apud Tamioso (2012)	34
Figura 3 –Preparação dos dados, processos e resultados do MGB-IPH. Fonte: Collischonn (2009).....	39
Figura 4 –Efeito da aplicação de um método de assimilação ou atualização das variáveis sobre o hidrograma calculado por um modelo hidrológico (a) Simulação com previsão de Vazões (b) Simulação de Vazões Simples dentro de um período de tempo determinado.....	42
Figura 5 – Métodos usados na assimilação de dados. Fonte: Refsgaard (1997) apud Meller et al. (2012).....	44
Figura 6 –Fluxograma da metodologia proposta.....	52
Figura 7 –Localização da Região de Estudo	54
Figura 8 –Bacias Hidrográficas Principais no Estado do Rio Grande do Sul.....	55
Figura 9 – Localização das estações utilizadas e discretização em sub-bacias para o RS	57
Figura 10 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados.....	58
Figura 11 – Distribuição espacial dos postos climatológicos selecionados.....	58
Figura 12 – Distribuição espacial dos postos fluviométricos selecionados e Rede Unifilar H-Integrada editada e melhorada com a hidrografia da base cartográfica de Hasenack et. al. (2006).....	60
Figura 13 –URH's para a Região de Estudo.....	61
Figura 14 – Locais de Calibração e LPNM.....	62
Figura 15 – Locais de Calibração.....	63
Figura 16 – Locais Pseudo-Não Monitorados.....	64
Figura 17 –Discretização do estado do RS em minibacias.....	67
Figura 18 –Pontos que refletem melhores valores de Nash Log e Erro de Volume.....	70
Figura 19 – Alguns locais onde são apresentados resultados para alguns conjuntos de parâmetros.....	71

Figura 20 – Vazões observadas e simuladas no posto fluviométrico Passo do Granzotto no rio Forquilha utilizando na simulação o conjunto de parâmetros que devolve o melhor coeficiente de Nash Sutcliffe.....	71
Figura 21 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo Colombelli no rio Apue utilizando na simulação o conjunto de parâmetros que devolve o melhor coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos das Vazões.....	72
Figura 22 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo Rio da Várzea no rio da Várzea utilizando na simulação o conjunto de parâmetros que devolve o menor erro de volume.....	72
Figura 23 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Ponte Mística no rio Ijuí utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 1 selecionado aleatoriamente da região de Pareto.....	73
Figura 24 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo do Sarmiento no rio Piratinim utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 3 selecionado aleatoriamente da região de Pareto.....	73
Figura 25 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Rosario do Sul no rio Santa Maria utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 3 selecionado aleatoriamente da região de Pareto.....	74
Figura 26 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo das Tunas no rio Vacacaí utilizando na simulação o melhor coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos das Vazões.....	74
Figura 27 – Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo do Ricardo no rio Piratini utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 5 selecionado aleatoriamente da região de Pareto.....	75
Figura 28 – Mapa esquemático exemplo de assimilação de dados.....	77
Figura 29 – Comparação do erro relativo médio das vazões por 4 metodologias.....	90
Figura 30 – Variação da Q_{90} em função da área.....	91
Figura 31 – Variação da Q_{95} em função da área.....	91
Figura 32 – Variação da Q_{50} em função da área.....	92
Figura 33 – Variação da Q_{10} em função da área.....	92
Figura 34 – Variação da $Q_{\max Tr25}$ em função da área.....	93
Figura 35 – Variação da $Q_{\max TR50}$ em função da área.....	93

Figura 36 – Q90 para cada trecho de rio do Estado do Rio Grande do Sul.....	94
Figura 37 – ERM's associados aos valores de Q90 obtidos para cada trecho de rio do Estado do Rio Grande do Sul.....	94

TABELAS

Tabela 1 – Detalhe dos locais escolhidos para a calibração	63
Tabela 2 – Detalhe dos locais escolhidos como LPNM	65
Tabela 3 – Faixa de valores em que se permitiu a variação dos parâmetros durante a calibração.....	69
Tabela 4 – Alguns Resultados da calibração na região do RS	70
Tabela 5 – Configuração de parâmetros do método de atualização que apresentou melhores resultados	76
Tabela 6 – Esquema de Assimilação para todos os LPNM	78
Tabela 7 – ERM dos LPNM e percentagem de diminuição comparando métodos	90

SÍMBOLOS

$Q_{7,10}$	Vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de recorrência, $m^3 s^{-1}$
Q_{90}	Vazões com 90% de permanência no tempo, $m^3 s^{-1}$
Q_{95}	Vazões com 90% de permanência no tempo, $m^3 s^{-1}$
Q_{50}	Vazões com 50% de permanência no tempo, $m^3 s^{-1}$
Q_{10}	Vazões com 10% de permanência no tempo, $m^3 s^{-1}$
$Q_{\max Tr25}$	Vazão máxima com Tempo de Retorno de 25 anos, $m^3 s^{-1}$
$Q_{\max Tr50}$	Vazão máxima com Tempo de Retorno de 50 anos, $m^3 s^{-1}$
URH	Unidades de Resposta Hidrológica
CN	Numero de Curva
Q_y	Vazão onde se deseja conhecer a vazão no método de interpolação, $m^3 s^{-1}$
Q_x	Vazão no local com dados no método de interpolação, $m^3 s^{-1}$
A_y	Área de drenagem no local sem dados no método de interpolação, Km^2
A_x	Área de drenagem no local com dados no método de interpolação, Km^2
Q_u	Vazão no local sem monitoramento método IDW, $m^3 s^{-1}$
Q_j	Vazão no local com monitoramento método IDW, $m^3 s^{-1}$
N	Numero de locais com monitoramento que são ponderados método IDW
W_j	Pesos atribuídos aos locais com dados dependente do inverso da distancia entre o posto com monitoramento considerado e o posto sem monitoramento
X_j	Coordenadas do posto com monitoramento, m
X_u	Coordenadas do posto sem monitoramento, m
Q_{x0}	Vazão desejada no local sem monitoramento método Kriging, $m^3 s^{-1}$
X_0	Coordenadas do ponto sem monitoramento método Kriging, m
Q_{xi}	Valor observado no ponto com monitoramento método Kriging, $m^3 s^{-1}$
λ_i	Coefficiente de ponderação método Kriging
Q_z	Vazão na seção de interesse método Eletrobrás (1985b), $m^3 s^{-1}$
$Q_{m,j}$	Vazão no posto de montante ou de jusante método Eletrobrás (1985b), $m^3 s^{-1}$
Q_m	Vazão no posto de montante método Eletrobrás (1985b), $m^3 s^{-1}$
Q_j	Vazão no posto de jusante método Eletrobrás (1985b), $m^3 s^{-1}$
A_z	Área de drenagem na seção de interesse método Eletrobrás (1985b), Km^2
$A_{m,j}$	Área de drenagem do posto de montante ou de jusante método Eletrobrás (1985b), Km^2
A_m	Área de drenagem do posto de montante método Eletrobrás (1985b), Km^2
A_j	Área de drenagem do posto de jusante método Eletrobrás (1985b), Km^2
P_m	Peso reativo à estação de montante método Chaves et al. (2002), adimensional
P_j	Peso relativo à estação de jusante método Chaves et al. (2002), adimensional

d_m	Distancia entre o posto de montante e a seção de interesse método Chaves et al. (2002), Km
d_j	Distancia entre o posto de jusante e a seção de interesse método Chaves et al. (2002), Km
W_m	Capacidade de armazenamento do solo [mm]
b	Parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação [-]
K_{INT}	Parâmetro de drenagem sub-superficial. [mm.dia ⁻¹]
K_{BAS}	Parâmetro de escoamento subterrâneo. [mm.dia ⁻¹]
C_S	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas células [-]
C_I	Parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células [-]
C_{BAS}	Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo. [dias]
IAF	Índice de área foliar
r_s	Resistência superficial [s.m ⁻¹]
α :	Albedo [-]
W_z	Lim. Inferior de armazen. no solo para haver escoamento sub-superficial [mm]
FCA	Fator de atualização das variáveis de estado do modelo MGB-IPH
Q_{obs}^t	Vazões observadas utilizadas no cálculo do Fator de atualização
Q_{calc}^t	Vazões calculadas utilizadas no cálculo do Fator de atualização
t	Tempo de cálculo [dias]
t_0	Instante de tempo da realização da simulação [dias]
t_a	Intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e observados [dias]
s	Representa o ponto de exutório da sub-bacia onde existe um posto fluviométrico com dados observados para atualização do modelo
$Q_{at_{i,s}}$	Valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia i localizada a montante do ponto s
A_i	Área de drenagem acumulada na minibacia i
A_s	Área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados.
$ebac$	Parâmetro do processo de assimilação de dados com valores entre 0 e 1.
PBi	Fração do escoamento originária dos reservatórios conceituais do modelo
$VBat_{i,s}$	Volume atualizado no reservatório na minibacia i situada a montante de s
VB_i	Volume calculado do reservatório conceitual na minibacia i
b_i	Filtro de vazão de base utilizado no método de assimilação, m ³ s ⁻¹
$PBlim$	Valor predeterminado da fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo.

<i>bx</i>	Parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1
<i>b</i>	Escoamento subterrâneo, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
<i>a</i>	Parâmetro de forma da recessão
<i>BFI_{max}</i>	Máximo percentual de escoamento subterrâneo que o filtro permite calcular
<i>PBi</i>	Fração do escoamento originária do reservatório subterrâneo no intervalo de tempo <i>i</i>
<i>Qi</i>	Vazão total observada no ponto, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
<i>LPNM</i>	Locais Pseudo Não Monitorados
<i>FSR</i>	URH do tipo Floresta em Solo Raso
<i>FSP</i>	URH do tipo Floresta em Solo Profundo
<i>CSR</i>	URH do tipo Campo em Solo Raso
<i>CSP</i>	URH do tipo Campo em Solo Profundo
<i>ASR</i>	URH do tipo Agricultura em Solo Raso
<i>ASP</i>	URH do tipo Agricultura em Solo Profundo
<i>F1</i>	Função objetivo da calibração automática que depende do coeficiente Nash Sutcliffe
<i>F2</i>	Função objetivo da calibração automática que depende do coeficiente Nash Sutcliffe dos Logaritmos das Vazões
<i>F3</i>	Função objetivo da calibração automática que depende do erro do volume total das vazões
<i>Xi</i>	Ponderador aplicado a cada um dos postos fluviométricos no calculo das funções objetivo
<i>R2i</i>	Coefficiente de Nash Sutcliffe das vazões para o posto <i>i</i>
<i>Rlogi</i>	Coefficiente de Nash Sutcliffe dos logaritmos das vazões para o posto <i>i</i>
ΔVi	Erro de volume total para o posto <i>i</i>
<i>ERM</i>	Erro relativo médio
<i>Qcalc_i</i>	Vazão calculada em cada LPNM
<i>Qobs_i</i>	Vazão observada em cada LPNM

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Justificativa do Trabalho

A estimativa de vazões em locais em que não existem postos fluviométricos é um dos problemas clássicos da hidrologia, pois dificuldades na gestão de recursos hídricos, na previsão de eventos extremos, no planejamentos do setor elétrico entre outros dependem desta importante informação. Este é um problema tão relevante que, em 2003, a Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS - *International Association of Hydrological Sciences*) lançou a Década IAHS 2003-2012 dedicada à Predição em Bacias sem Dados (PUB - Prediction in Ungauged Basins). O programa PUB concentrou-se em incentivar e coordenar a comunidade científica para obter avanços na estimativa das incertezas das predições hidrológicas em bacias sem dados e na redução destas incertezas.

A carência de dados de vazão frequentemente se deve à falta de estações de medição fluviométrica no local desejado, ou se tiver locais de medição na região, estes nem sempre possuem dados confiáveis ou não tem a quantidade de dados necessários para uma boa representatividade. Na prática quase sempre existirão lacunas temporais e espaciais que necessitam ser preenchidas com base em metodologias robustas (TUCCI, 2002).

Outra problemática não menos importante é que as observações podem não representar as vazões naturais dos rios. Isso ocorre porque existem extrações e derivações de água para usos consuntivos, e porque existem obras hidráulicas que produzem alterações na vazão águas a montante do local de observação. Essas interferências deverão ser cada vez maiores com o passar do tempo o que demandaria com maior frequência métodos que favoreçam a correção nas estimativas de vazões.

O problema da estimativa de vazões em locais sem dados observados tem sido abordado principalmente através de duas metodologias: a Regionalização de Vazões que inclui os métodos de determinação de regiões homogêneas, interpolação e extrapolação de vazões conforme a seção de interesse e por outra parte a Simulação do Processo de Transformação de Chuva em Vazão. Sendo a primeira a mais comum quando se deseja obter determinados indicadores ou sinais hidrológicos (Q90; Q95; Q7,10; etc.) e a segunda quando desejadas séries contínuas de vazões e onde o recurso da regionalização é utilizado apenas para obter parâmetros que vão ser introduzidos nos modelos.

No caso especial dos métodos de interpolação lineares e não lineares estes podem ser ou não agrupados dentro dos estudos de Regionalização de Vazões e os mesmos tem sido bastante explorados nos últimos anos como alternativa aos métodos tradicionais de agrupamentos por regiões homogêneas e aos Modelos de transformação chuva-vazão pela facilidade e agilidade que podem ter em alguns casos a aplicação dos mesmos. Segundo Smakhtin (1999), a vantagem principal dos métodos de é a economia em tempo e custo computacional quando comparados com alguns métodos baseados na modelagem hidrológica na obtenção de vazões em locais sem dados.

Estudos mais recentes utilizam dados gerados a partir de sensoriamento remoto, relacionados à largura do rio, declividade e elevação da superfície da água, para obter batimetria dos rios, coeficiente de rugosidade e vazões nos trechos de rio que coincidem com a passagem espacial dos satélites (DURAND et al., 2014 apud PAIVA et. al., 2015; PARIS et. al., 2016), posteriormente estas informações podem ser transferidas para outros pontos da rede de drenagem através de métodos de interpolação não lineares (PAIVA et. al., 2015).

Na Regionalização de Vazões, o que se verifica, é que em regiões relativamente homogêneas do ponto de vista do clima, geologia, topografia e que apresentam boa disponibilidade de dados de vazão, esta tende a apresentar bons resultados (PRUSKI et. al., 2013). Por outro lado, a regionalização também tem algumas limitações (NOVAES et. al., 2007). Uma primeira limitação é que o produto final das regionalizações tradicionais é alguma vazão de referência (mínima, média ou máxima), e não a série de vazões no local sem dados. Em algumas aplicações o que se deseja é a série de vazões, que os métodos tradicionais de regionalização não permitem obter, embora existam algumas formas de

gerar séries temporais com abordagens semelhantes à regionalização (HIRSCH, 1982; OTSUKI e REIS, 2011).

Uma segunda limitação da regionalização de vazões tradicional é que a regionalização sempre está influenciada pelos dados do passado. Se precisarmos estimar vazões para um cenário futuro, em que alguma condição se alterou, então a regionalização é menos útil. Em alguns casos o que se deseja é a vazão em um local sem dados em um cenário futuro, em que o clima ou as características da bacia sejam diferentes (retiradas de água, barragens, reservatórios, mudanças do clima, urbanização, alteração da vegetação). A regionalização normalmente não permite lidar com estas situações. Este é um dos motivos pelos quais as técnicas de estimativas de vazão máxima com base na chuva são tão frequentemente adotadas em pequenas bacias nas quais se espera um processo de urbanização.

Outra limitação da regionalização é que as séries de vazão observada nos postos fluviométricos refletem cada vez menos o comportamento natural da bacia. Isto ocorre por influência, cada vez maior, das retiradas de água para usos consuntivos, e por influência da operação de reservatórios e esquemas de transposição de bacias. No rio Paracatu no estado de Minas Gerais, por exemplo, o impacto das retiradas de água para usos consuntivos sobre a estimativa das vazões mínimas foi estimado em até 23% por Rodrigues (2008) e também por Pruski et. al. (2011).

Finalmente, alguns autores apontam que a regionalização de vazões apresenta problemas na extrapolação de escalas espaciais, porque o comportamento hidrológico de pequenas bacias pode ser muito diferente do de bacias maiores (TUCCI, 2002; SILVA et al., 2003).

A estimativa de vazão em locais sem dados a partir da transformação de chuva em vazão pode ser uma alternativa à regionalização de vazões, e poderia resolver alguns dos problemas encontrados na regionalização tradicional. Modelos hidrológicos de transformação de chuva em vazão são, normalmente, utilizados para extrapolar a informação conhecida no tempo e no espaço, porque os dados de precipitação têm, em geral, séries mais longas, em um maior número de locais e com menos falhas do que as de dados de vazão (OBREGÓN et. al, 1999).

As vantagens da estimativa de vazões a partir da chuva utilizando modelos chuva-vazão seriam: 1) possibilidade de gerar séries temporais de vazão; 2) possibilidade de

analisar cenários diferentes de clima, uso da terra e uso da água na bacia; 3) possibilidade de incluir ou não no modelo hidrológico, de forma relativamente simples, as operações de reservatórios e as retiradas de usos consuntivos (desde que existam os dados sobre estes usos e operações). Além destas vantagens resulta evidente o efeito multiplicador que pode ter um posto pluviométrico na obtenção de informação em locais não monitorados de vazão, pois informação de chuva captada por um pluviômetro pode explicar o comportamento da vazão em vários trechos de rio.

Por outro lado, os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem parâmetros cujos valores não são conhecidos a priori, e que somente podem ser definidos a partir da calibração em uma bacia com dados observados de vazão. Em consequência disso, surge uma espécie de paradoxo: a ferramenta para estimar vazões em locais sem dados é o modelo chuva-vazão, que somente pode ser calibrado em bacias com dados.

Dois tipos de soluções têm sido utilizados para este problema. O primeiro tipo de solução é utilizar modelos parcimoniosos (com poucos parâmetros) que exigem a coleta de um conjunto mínimo de dados. O segundo tipo de solução tem sido a regionalização dos parâmetros do modelo chuva-vazão.

Um exemplo no Brasil do primeiro tipo de solução é a técnica conhecida como Método Silveira, que está baseada na aplicação de um modelo chuva-vazão simples que pode ser calibrado com apenas duas medições de vazão no período de estiagem (SILVEIRA, 1997; SILVEIRA et. al, 2005; TAMIOSO, 2012). Este método é aplicado principalmente em bacias pequenas e na estimativa de vazões mínimas.

Existe uma ampla gama de métodos de regionalização de parâmetros, porém dois tipos podem ser citados como os mais comuns: 1) Método da vizinhança: aplicado quando o modelo é inicialmente calibrado em uma bacia com dados, é depois aplicado em uma bacia vizinha sem dados, mantendo os mesmos valores dos parâmetros (WAGENER e WEATHER, 2006); e 2) Método de relação dos parâmetros com características físicas mais fáceis de medir: baseados na determinação de relações entre os valores dos parâmetros e as características das bacias hidrográficas que podem ser obtidas com maior facilidade, como os tipos de solos, a declividade e a cobertura florestal (WAGENER et al., 2004).

Existem diversas abordagens no caso da regionalização de parâmetros. Entre estes, é importante destacar os métodos clássicos desenvolvidos pelo antigo Soil.

Conservation Service (SCS) nos Estados Unidos, como o CN e os hidrogramas unitários sintéticos, que possivelmente estão entre os métodos mais populares da hidrologia (PORTO, 1995; CANHOLI, 2005).

Para modelos chuva-vazão do tipo série contínua, que permitem obter não apenas as vazões máximas ou mínimas, e sim toda a série temporal de vazões ao longo de períodos relativamente extensos, os métodos de regionalização de parâmetros mais comuns estão baseados na obtenção de relações estatísticas entre os valores dos parâmetros e valores de variáveis que caracterizam a bacia (DINIZ, 2008; SARAIVA et al., 2011; VENDRUSCOLO, 2005).

Outro método frequentemente adotado em modelos hidrológicos chuva-vazão para caracterizar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos que também pode ser considerado um método de regionalização de parâmetros é o método da divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Neste método, procura-se determinar, a priori, algumas unidades de paisagem, definidas pela combinação de tipos de solos, relevo, geologia e vegetação, em que se acredita que os processos hidrológicos dominantes sejam relativamente homogêneos (FLÜGEL, 1995; KOWEN et al., 1993). Posteriormente, os parâmetros do modelo são associados às classes que definem as Unidades de Resposta Hidrológica (URH). A expectativa é que o comportamento hidrológico de uma mesma URH seja o mesmo, independentemente do local em que está a URH na bacia.

Nas últimas décadas, a estimativa de vazão em locais sem dados a partir da modelagem hidrológica chuva-vazão utilizando modelos de séries contínuas foi utilizada por vários autores para a estimativa de vazões máximas. Estes trabalhos apontam à necessidade de obter as séries das vazões e não só as vazões de pico obtidas através dos métodos tradicionais baseados em eventos (BROCA et al., 2011). Também uma característica importante destes modelos é que realizam balanços de água contínuos a cada passo do tempo para as bacias o que permite a simulação de condições antecedentes a cada evento de chuva (p.ex. umidade do solo) e evita a necessidade de se preocupar com a duração da chuva como nos casos dos métodos baseados em eventos.

Uma vantagem adicional da abordagem do modelo de simulação contínua é que o efeito de atenuação das cheias, provocadas, por exemplo, por reservatórios, pode ser contabilizado diretamente pelo modelo (SMITHERS, et al., 2013) e também esta

abordagem pode ser usada em bacias hidrográficas pouco ou não monitoradas no caso das vazões máximas (RAHMAN et al., 1998; MORETTI e MONTANARI, 2008).

No caso de estimativas de vazões mínimas, segundo BARMAH e VARLEY (2012b), modelos de planejamento de recursos hídricos podem se sustentar nas análises de disponibilidade realizada a partir de modelagem hidrológica, devido à capacidade dos modelos de: representar o impacto das alterações passadas e futuras na organização da gestão da água e no uso da terra, utilizar parâmetros em locais sem monitoramento que se encontrem dentro ou adjacentes a bacias monitoradas, estender series de vazões a partir de dados de chuva, e analisar cenários futuros de mudanças climáticas.

Alguns autores também apresentaram propostas de metodologias híbridas, que utilizam a regionalização e a simulação chuva-vazão. Este é o caso do trabalho de Obregon et al. (1999), que usaram a regionalização de vazões em uma região bastante carente de dados, e nos locais com séries de dados relativamente curtas, estes autores utilizaram um modelo chuva-vazão para estender as séries de vazão antes de iniciar os procedimentos normais de regionalização.

Outra proposta alternativa de combinar a regionalização e a modelagem hidrológica chuva-vazão foi apresentada recentemente por Pinheiro e Naghettini (2010). Estes autores utilizaram técnicas de regionalização para obter curvas de permanência de vazão diária em locais sem dados, e posteriormente calibraram um modelo chuva-vazão procurando reproduzir esta curva de permanência. Com esta metodologia os autores conseguiram gerar séries temporais contínuas da vazão em locais sem dados, embora o modelo chuva-vazão tenha sido calibrado considerando apenas o ajuste da curva de permanência.

Finalmente, em todo processo de estimativa de vazões são gerados erros e incertezas que podem ser associados a erros nos dados observados, à deficiência nos métodos utilizados e à distribuição dos valores dos parâmetros que são usados em tais métodos (MELLER, 2012). Uma técnica comumente utilizada, para diminuir esses erros e incertezas, no caso de previsão de vazões, através de simulações hidrológicas, é aquela que consiste em um processo de retroalimentação no qual valores observados de variáveis relevantes (vazão, nível da água, umidade do solo) são utilizadas para corrigir as variáveis de estado do modelo hidrológico aproximando as condições simuladas pelo

modelo às condições observadas em campo. Este processo é chamado de Assimilação de dados.

Foram encontrados na literatura, trabalhos que utilizam o método de assimilação de dados em modelos hidrológicos, para aprimorar a previsão de vazões em tempo real, em locais não monitorados (MADSEN e STOKNER, 2005; WÖHLING et al., 2006; PAZ et al., 2007; MOORE, 2007; CLARK et al., 2008; XIE e ZHANG, 2010; PAIVA et al., 2013; QUIROZ, 2017).

Este trabalho propõe a avaliação do acoplamento de um método empírico de assimilação de dados a um modelo hidrológico distribuído chuva-vazão, na predição de séries de vazões em locais sem monitoramento, para períodos de tempo determinados, em que a série é calculada e corrigida através da técnica de assimilação de dados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é avaliar uma metodologia de estimativa de vazões de referencia em locais sem dados a partir do acoplamento de um método de assimilação de dados a um modelo de simulação hidrológica chuva-vazão de grandes Bacias.

Outros objetivos derivados deste principal seriam:

Comparar esses resultados do método de acoplamento com os valores de vazões obtidas por simulações hidrológicas sem assimilação de dados, por métodos tradicionais de regionalização de vazões e por um método simples de interpolação linear.

Gerar vazões de referencia mínimas, médias e máximas para toda uma grande região (no caso todo o Estado do Rio Grande do Sul) seguindo a metodologia proposta e estimando o erro associado a cada trecho de rio.

CAPÍTULO 2

OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM DADOS OU BACIAS NÃO MONITORADAS

Bacias não monitoradas são aquelas onde os registros de observações hidrológicas, que permitem o cálculo de variáveis de interesse, são inadequados tanto em qualidade como em quantidade, nas escalas espaciais e temporais apropriadas e com precisão aceitável para aplicações práticas (SIVAPALAN et al., 2003).

Por exemplo, se a variável observada de interesse não tem sido medida na resolução necessária, ou no período necessário para realizar previsões ou para calibração do modelo, a bacia seria classificada como não monitorada com relação a esta variável. As variáveis podem ser, por exemplo: a precipitação, a vazão, taxas de erosão, concentrações de sedimentos etc.

A maioria dos rios e trechos de rios e afluentes no mundo são não monitorados ou mal monitorados principalmente com relação à vazão (SIVAPALAN et al. 2003). Os locais não monitorados frequentemente se encontram em regiões das cabeceiras dos rios, regiões marítimas, montanhosas ou rurais remotas; de um modo geral se encontram em regiões de difícil acesso ou em bacias onde não existe exigência nenhuma através de regulamentos ou leis que promovam medições hidrológicas.

Uma série de abordagens estão disponíveis atualmente para predição de variáveis hidrológicas em bacias sem monitoramento e grande parte dos trabalhos orientados a este fim utilizam o conceito da "Hidrologia Comparativa" que é o estudo da influência do clima e a natureza superficial e sub-superficial da terra sobre as características dos processos hidrológicos e que também permite através do entendimento da interação entre a hidrologia e o ecossistema determinar se é possível transferir predições hidrológicas desde uma região para outra (FALKENMARK e CHAPMAN, 1989 apud BLÖSCHL et al., 2013). O sucesso da abordagem da Hidrologia Comparativa por sua vez reside no conceito de "Similaridade ou Dissimilaridade". Quando as bacias são comparadas segundo características particulares, algumas delas podem aparecer mais

similares entre si do que outras com relação a aquela característica. Esta similaridade pode guiar a interpretação de diferentes padrões emergentes delas. Bacias de um modo geral podem ser consideradas hidrológicamente similares quando elas se segregam ou se filtram segundo a sua variabilidade climática e aspectos característicos refletidos nos seus sinais hidrológicos. Então a similaridade hidrológica pode ser utilizada de duas formas para prever vazões em bacias sem monitoramento. Uma para assistir no entendimento dos processos hidrológicos e outra para transferir informações desde um local monitorado para outro não monitorado. Em ambos os casos são necessárias agrupações de bacias segundo determinados aspectos de similaridade o que é comumente chamado como processo de regionalização.

A abordagem da hidrologia comparativa então consiste em aprender das similaridades e diferenças de bacias em termos de clima, características das mesmas e o seus sinais de vazão (BLÖSCHL et al., 2013). A Figura 4 apresenta o esquema de predição de sinais de vazão em bacias não monitoradas através das similaridades climáticas, de bacias e de vazões no qual características das bacias monitoradas são relacionadas com as vazões observadas para obter funções que explicam tais relações e posteriormente são utilizadas nas bacias não monitoradas onde as características das mesmas são fáceis de obter e assim finalmente obter nelas os sinais hidrológicos desejados.

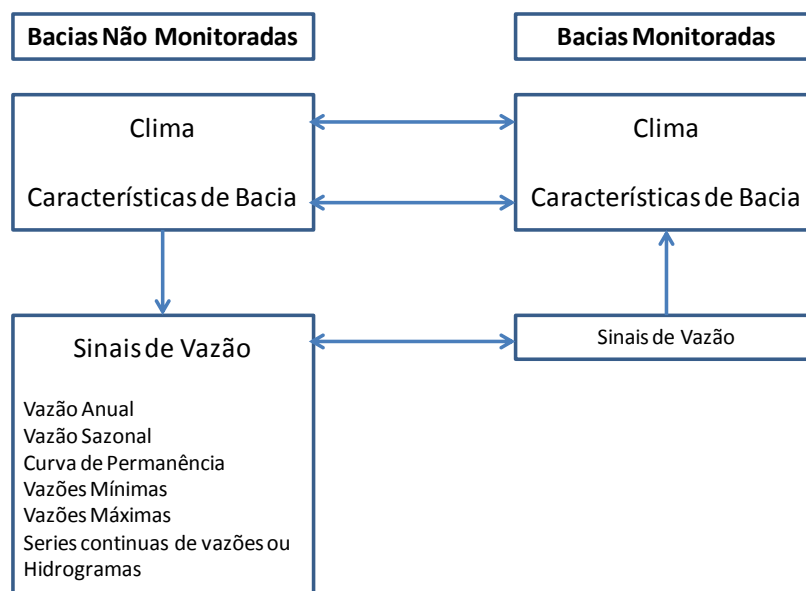


Figura 1–Predição de vazões em bacias não monitoradas através do conceito de similaridade hidrológica. Fonte: (Blöschl et al., 2013).

Inúmeros são os métodos até agora desenvolvidos com o intuito de estimar vazões em locais sem monitoramento e existe ainda muita subjetividade na classificação deles por parte dos diversos autores. Blöschl et al. (2013) por exemplo os agrupa em dois tipos: Métodos Estatísticos e Métodos Baseados em Processos. No primeiro grupo encontram-se entre outros os métodos de regressão, métodos geoestatísticos e estimações a partir de pequenos registros. O segundo grupo inclui, por exemplo, os modelos chuva-vazão contínuos.

Neste capítulo é apresentada em forma sucinta a revisão bibliográfica que tem sido realizada na procura do que existe a nível mundial com relação às metodologias de obtenção de vazões em locais sem monitoramento, e também quais as aplicações comuns das técnicas de assimilação de dados na atualidade, assim como a descrição do modelo MGB-IPH e qual o método de assimilação acoplado a ele que é adotado para atingir os objetivos da tese.

2.1 Regionalização de Vazões

A expressão “regionalização hidrológica” é utilizada para denominar a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (TUCCI, 2002; NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Young, (2006), define Regionalização como a técnica que relaciona fenômenos hidrológicos e as características físicas e climáticas de uma bacia hidrográfica ou região.

Outros autores definem a Regionalização como uma metodologia em que um modelo conceitual é aplicado a um número representativo de bacias monitoradas e relações estatísticas são derivadas entre os parâmetros do modelo e características das bacias com a finalidade de realizar predições em bacias não monitoradas (WAGENER e WEATHER, 2006; RAZAVI e COULIBALY, 2013; SHOAIB et al., 2013).

Segundo Shoaib et al. (2013), as técnicas de regionalização oferecem um mecanismo para determinar o comportamento hidrológico de bacias monitoradas, e a classificação destas por regiões de acordo por exemplo com a vazão ou com as características fisiográficas ou climáticas e logo fornecem um modo de estender a informação a partir de bacias monitoradas para as não monitoradas.

Os estudos de regionalização podem ser classificados em dois grandes grupos, como sugerido por Shoaib et al. (2013) e He et al. (2011): (a) Aqueles que estimam determinados índices ou sinais hidrológicos e (b) Aqueles que trabalham com a estimativa de séries de temporais contínuas de vazões. Por sua vez Razavi e Coulibaly (2013), subdividem este segundo grupo em dois subgrupos (b1) Métodos Dependentes dos Modelos Chuva-Vazão e (b2) Métodos Independentes dos Modelos Chuva-Vazão. No primeiro caso, os parâmetros do modelo são utilizados como instrumentos para transferir informações hidrológicas de bacias monitoradas para as não monitoradas, enquanto o segundo caso são transferidas vazões diretamente através de métodos orientados a dados (data-driven methods). Adicionalmente, a estas duas classificações, vai ser apresentado no texto outro método que também pode ser considerado um método de regionalização de parâmetros, (c) O método da divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (URH ou HRU's em inglês), frequentemente adotado em modelos hidrológicos chuva-vazão para caracterizar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos. E finalmente são apresentadas, (d) Métodos que utilizam Interpolações lineares e não lineares para a obtenção de vazões em locais sem dados.

(a) Métodos que estimam determinados Índices ou Sinais hidrológicos Selecionados

Este tipo de estudos de Regionalização têm por objetivo estimar determinadas informações, determinados índices ou sinais hidrológicos em lugar de series temporais contínuas de vazões. Wagener e Wheeler (2006) classificam este tipo de abordagens como sendo aqueles tipos de regionalização que calculam as propriedades estatísticas das vazões. Eles podem ser vazões mínimas, médias, máximas, vários percentis de vazão, Curvas de Permanência, Curvas de Regularização, etc.

Este grupo pode ser subclassificados segundo o tipo de informação a regionalizar, como proposto por Tucci (2002) em: *a1* Aqueles que Regionalizam Variáveis; *a2* Aqueles que Regionalizam Funções; e *a3* Aqueles que regionalizam Indicadores Regionais. Estes são descritos brevemente a seguir:

a1 Aqueles que Regionalizam Variáveis

São aquelas em que uma variável como a precipitação média, vazão de enchente, entre outras, pode ser determinada numa região com base em relações estabelecidas através dos dados pontuais existentes;

a2 Aqueles que Regionalizam Funções

São aqueles em que uma função hidrológica como a curva de regularização, curva de duração ou de permanência, entre outras, pode ser determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes;

a3 Aqueles que regionalizam Indicadores Regionais.

São aqueles que regionalizam valores médios de variáveis ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma variável ou entendimento do seu comportamento. Por exemplo, a vazão específica média e a relação entre a vazão mínima e média.

Também segundo (TUCCI, 2002) nos três tipos citados a regionalização é estabelecida através de um dos critérios seguintes:

-Estabelecimento da relação empírica entre valores da função e características conhecidas, especialmente, do sistema hidrológico;

-Estabelecimento da função com base nos valores do item anterior ou de relações adimensionais.

-A definição dos limites regionais é realizada de acordo com as características estatísticas da função em análise e dos condicionantes físicos de comportamento.

Então, métodos estatísticos são utilizados para estimativa da probabilidade de uma variável hidrológica como vazão máxima ou mínima, e técnicas de regressão e correlação são utilizadas para relacionar estas variáveis com as características físicas e climáticas de uma bacia hidrográfica com o fim de regionalizá-las.

Este método que combina métodos estatísticos e técnicas de regressão é conhecido como Método Tradicional e ele é descrito com mais detalhes em Eletrobrás (1985a).

Vários são os trabalhos que podem ser citados dentro desta classificação, por exemplo o desenvolvido por Pruski et al. (2013) e Pruski et al. (2011), que regionalizaram vazões na bacia do rio Paracatú no estado de Minas Gerais, utilizando como variáveis explicativas a vazão equivalente da precipitação e a também a vazão equivalente da precipitação descontado de um valor de abstração de 750mm que geraram bons resultados principalmente para a vazão média de longo período e a vazão com 95% de permanência no tempo.

Agra et al. (2003), realizaram um estudo de regionalização na bacia do rio Carreiro - RS, regionalizando a vazão específica, a vazão media, da curva de permanencia, e coeficiente de escoamento.

(b) Métodos que trabalham com a estimativa de séries de temporais contínuas de vazões também chamadas de Regionalização contínua de vazões.

Séries contínuas e confiáveis de vazões são ferramentas importantes dentro do planejamento de bacias e na gestão sustentável dos recursos hídricos (RAZAVI e COULIBALY, 2013), devido a que permitem ter uma sensibilidade maior à variabilidade da vazão em locais sem dados. Este é o motivo do por que cada vez mais pesquisadores na área de hidrologia adotam o desafio de melhorar métodos para obter séries de vazões em locais sem monitoramento que permitem não só obter uma vazão máxima, ou uma mínima ou algum outro indicador por separado mas sim a série completa de valores de vazão que por sua vez permite calcular segundo a necessidade cada um dos valores parciais desejados.

Aqui é apresentada uma subclassificação destes métodos sugerida por Razavi e Coulibaly (2013) que os separa em (b1) Métodos Dependentes dos Modelos Chuva-Vazão e (b2) Métodos Independentes dos Modelos Chuva-Vazão. Os Modelos dependentes são divididos por sua vez em Métodos da Média Aritmética, de Proximidade Espacial, de Similaridade Física, de Relações de Escala, Métodos de regressão e os de Similaridade Hidrológica e por último Profundidade de dados. Os Modelos Independentes podem ser divididos também em Métodos baseados em Regressões, Modelos de Series Temporais e Relações de escala. Todos eles brevemente descritos seguidamente.

(b1) Métodos Dependentes dos Modelos Chuva-Vazão

Neste grupo os parâmetros de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são transferidos entre bacias. Estes parâmetros são logo usados para gerar series contínuas de vazões em bacias de interesse. Este grupo se encontra aqui subdividido em sete subgrupos brevemente descritos a seguir.

b1.1 Média Aritmética

Nas técnicas de Média Aritmética e proximidade espacial, os atributos das bacias não estão diretamente envolvidos e supõe-se que todas as bacias hidrográficas dentro do raio específico são semelhantes e diferenças nos valores dos parâmetros surgem apenas de fatores aleatórios (MERZ e BLÖSCHL, 2004 apud RAZAVI e COULIBALY, 2013; PARAJKA et al., 2005 apud RAZAVI e COULIBALY, 2013). Na abordagem de Média Aritmética, os parâmetros do modelo chuva-vazão de bacias vizinhas (local) ou de todas as bacias (globais) são conjugadas na média aritmética deles. A Média aritmética também pode ser usada como uma técnica de cálculo após a classificação da bacia por meio de outros métodos de regionalização (RAZAVI e COULIBALY, 2013).

b1.2 Proximidade Espacial

As abordagens de Proximidade Espacial transferem o conjunto de parâmetros do modelo baseados em técnicas de distância espacial, p. ex., técnicas de interpolação que são funções da localização geográfica (RAZAVI e COULIBALY, 2013). Por exemplo, Vandewiele e Atlabachew (1995) apud Razavi e Coulibaly (2013) aplicaram um modelo de balanço hídrico mensal em 75 bacias Belgas que foram consideradas como não monitoradas utilizando duas técnicas de proximidade espacial (Kriging e Vizinho Natural) para calcular os valores de parâmetros do modelo.

b1.3 Similaridade Física

O conceito desta abordagem é a transferência de parâmetros do modelo hidrológico de bacias monitoradas para as não monitoradas de acordo com a similaridade de seus atributos físicos. Um exemplo dessa abordagem é apresentado por Oudin et al. (2008) e Samuel et al. (2011). Nestes trabalhos, bacias hidrográficas são primeiramente agrupadas de acordo com suas semelhanças físicas ou não hidrológicas. Análises estatísticas multivariadas são normalmente utilizadas para agrupar as bacias. Então parâmetros de modelos chuva-vazão de bacias calibradas são obtidos, e os parâmetros do modelo para bacias localizadas no mesmo grupo são organizados, por exemplo, usando uma média aritmética. Esse conjunto de parâmetros é então usado para gerar vazões na bacia de interesse devido à semelhança física.

b1.4 Relações de Escala

Os métodos de Relações de Escala são aqueles baseados em atributos das bacias, geralmente a área. Croke et al. (2004) obtiveram parâmetros de modelos em bacias não monitoradas de acordo com a área das mesmas, através de relações obtidas a partir da área, profundidade da rede de drenagem e o escoamento superficial de bacias monitoradas. Logo a vazão superficial é obtida a partir de modelos hidrológicos utilizando os parâmetros obtidos em principio. Este método pode ser utilizado em forma mais simples em simulação de vazões de sub-bacias não monitoradas, assumindo que a vazão de contribuição de cada sub-bacia à vazão total da bacia é proporcional à área de drenagem e/ou outros atributos de cada uma das sub-bacias (Schreider et al. 2002).

b1.5 Métodos de Regressão

Outro tipo de abordagem é a utilização de métodos baseados em regressões, os quais incluem métodos de regressões não lineares como Redes Neurais Artificiais e os métodos de regressões lineares. Dentro de este grupo uma relação linear ou não linear é desenvolvida entre os parâmetros do modelo e os atributos das bacias. Kokkonen et al. (2003) apud Razavi e Coulibaly (2013), aplicaram um esquema de regressão para seis parâmetros do modelo IHACRES (JAKEMAN et al., 1990; JAKEMAN and HORNBERGER, 1993; POSTET al., 1996) e descritores físicos em 13 bacias da Austrália para produzir series temporais de vazão diária .

Dentro desta classificação podemos citar o trabalho de Young (2006), quem avaliou a utilização de um modelo Chuva-Vazão para estimar series de vazão no Reino

Unido através de relações entre parâmetros e as características físicas das bacias. Estas relações foram obtidas a partir de análises de regressão multivariada.

Pode ser citado também dentro desta categoria o trabalho realizado por Merz e Blöschl (2004) onde o balance hídrico foi calculado para varias bacias na Áustria utilizando um modelo concentrado que envolvia a calibração de onze parâmetros e onde a variabilidade espacial destes parâmetros foi explicada através de análises de regressão linear com os atributos físicos das bacias.

b1.6 Similaridade Hidrológica

Outro método é aquele que utiliza a similaridade hidrológica entre bacias para transferir os parâmetros de modelos. Um simples método baseado em similaridade hidrológica assume que todas as bacias dentro de uma determinada região são similares em seus comportamentos hidrológicos. Em este caso, uma media ou o conjunto inteiro de valores de parâmetros calibrados é tipicamente utilizado para estimar o valor deles em locais não monitorados em vez de derivar relações quantitativas entre descritores de bacias e parâmetros do modelo (KOKKONEN et al. 2003; MOHAMOUD, 2008).

Similaridade entre curvas de duração de vazões ou curvas de permanência podem ser consideradas como similaridade hidrológica. Masih et al. (2010) encontrou que o conjunto de parâmetros para o modelo HBV transferido desde uma bacia monitorada similar a outra com dados limitados de vazões origina melhores resultados na geração de series que as abordagens baseadas nas áreas de drenagem e proximidade espacial.

(b2) Métodos Independentes dos Modelos Chuva-Vazão

O segundo grupo não estima séries temporais de vazões por meio de modelos chuva-vazão em bacias não monitoradas e, portanto, em vez de parâmetros de modelos hidrológicos, são transferidas estruturas de equações e os parâmetros destas. Estes modelos chamados também de modelos baseados em dados ou "*Data-Driven Models*", geralmente desenvolvem e usam uma equação que representa relações do tipo entrada-saída, por exemplo, precipitação e temperatura como entrada e vazão como saída. Pode ser considerada uma vantagem destes métodos o menor requerimento de dados. Estes podem ser subclassificados por sua vez em três subgrupos:

b2.1 Métodos de Regressão

Este grupo está composto por aqueles métodos baseados em análises de regressão, os quais incluem regressão linear (p.ex. MLR, Modelos Lineares Paramétricos Simples) e regressão não-linear (p.ex. Redes Neurais Artificiais) entre vazão e atributos da bacia (RAZAVI e COULIBALY, 2013). Métodos de regressão não linear foram utilizados por Besaw et al. (2010) e Parada e Liang (2010), que treinaram Redes Neurais com dados de clima e vazão de uma bacia e as utilizaram para obter vazões em uma bacia próxima com diferentes entradas de clima.

b2.2 Modelos de serie temporal

Dentro deste tipo podem ser agrupados por exemplo os modelos do tipo Autoregressivo (AR). Chiang et al. (2002a) utilizou análises de regressão múltipla para construir relações entre os parâmetros de uma serie temporal de vazão (variável dependente) e características da bacia (variáveis independentes). Os parâmetros de series temporais de vazão previstos a partir das equações de análise de regressão múltipla foram utilizadas para sintetizar hidrogramas sob o modelo de séries temporais. Equações de regressão podem ser desenvolvidas entre percentis de vazão e atributos das bacias. Por exemplo, Mohamoud (2008) desenvolveu equações de regressão linear entre os parâmetros de um modelo de curva de permanência e descritores de paisagens e clima identificados através de métodos de regressão para bacias monitoradas, logo foram transferidas estas equações para bacias não monitoradas e convertidas as curvas de permanência simuladas para series de vazões.

b2.3 Relações de Escala

Nesta categoria dados de vazão, e mais comunmente o tamanho da bacia são vinculados através de relações de escala para realizar extrapolações desde bacia monitoradas para bacias não monitoradas (YUE e WANG, 2004).

Lima e Lall (2010) desenvolveram e aplicaram modelos hierárquicos bayesianos para avaliar em forma regional e in-situ tendências em escala temporal e espacial, relações de escala entre vazões e áreas das bacias, e simultaneamente prover de uma abordagem para reduzir incertezas relacionadas aos modelos e os parâmetros dos mesmos. Eles estimaram primeiramente vazões máximas anuais em bacias Brasileiras e logo estenderam a metodologia para vazões mensais.

(c) Método de divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (URH)

Outro método frequentemente adotado em modelos hidrológicos chuva-vazão para caracterizar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos que também pode ser considerado um método de regionalização de parâmetros é o método da divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Neste método, procura-se determinar, a priori, algumas unidades de paisagem, definidas pela combinação de tipos de solos, relevo, geologia e vegetação, em que se acredita que os processos hidrológicos dominantes sejam relativamente homogêneos (FLÜGEL, 1995; KOWEN et al., 1993). Posteriormente, os parâmetros do modelo são associados às classes que definem as Unidades de Resposta Hidrológica (URH). A expectativa é que o comportamento hidrológico de uma mesma URH seja o mesmo, independentemente do local em que está a URH na bacia.

O método da regionalização dos parâmetros através da associação do valor dos parâmetros com mapas de URH é adotado por diversos modelos hidrológicos chuva-vazão, como os modelos SWAT (NEITSCH et al., 2012); VIC (LIANG et al., 1994); LARSIM (BREMICKER, 1998) e MGB-IPH (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; FAN e COLLISCHONN, 2014, PONTES et al., 2015).

Este é o método de atribuição de parâmetros dentro da bacia que o modelo MGB-IPH utiliza e, portanto, o método que é utilizado neste trabalho de tese.

(d) Métodos baseados em Interpolações para a obtenção de vazões em locais sem dados.

Os métodos de interpolação podem ser agrupados dentro do grupo de técnicas de Regionalização de vazões desde que estes conceitualmente possibilitam a transferência de informação desde locais monitorados para os não monitorados.

Segundo a literatura, vários são os métodos de interpolação utilizados na obtenção de vazões em locais sem monitoramento. São descritos brevemente a seguir os métodos utilizados mais frequentemente:

d.1 Método de Relação de Área Única (SAR por suas siglas em inglês)

Este método permite obter vazões ou series de vazões através de relações simples entre as áreas de drenagem dos locais sem e com monitoramento segundo a Equação 1.

$$Q_y = \frac{A_y}{A_x} Q_x$$

Equação 1

Onde Q_y é a vazão no local sem dados, Q_x é a vazão no local com dados, A_y a área de drenagem do local sem dados e A_x é a área de drenagem do local com dados. É importante mencionar que esta metodologia é aplicável apenas para bacias aninhadas, nas quais o ponto monitorado encontrasse a jusante do local onde se deseja conhecer a vazão na mesma bacia.

d.2 Método de Ponderação pelo Inverso da Distancia (IDW por suas Siglas em inglês)

Este método permite calcular vazões em locais sem dados através de observações provenientes de bacias vizinhas com monitoramento. As equações utilizadas são:

$$Q_u = \frac{\sum_{j=1}^N w_j Q_j}{\sum_{j=1}^N w_j}$$

Equação 2

$$W_j = \frac{1}{d(X_j, X_u)^2}$$

Equação 3

Onde Q_u é a vazão no local desejado sem monitoramento, Q_j é a vazão nos locais com monitoramento, N o número de locais com monitoramento que são ponderados através dos pesos W_j dependentes do inverso da distancia d entre o posto não monitorado u onde se deseja a vazão e o posto j monitorado, X_j as coordenadas do Posto com monitoramento, X_u coordenadas do posto sem monitoramento.

Alguns exemplos de aplicação do método que se encontram na literatura são descritos em Zhang et. al (2015); Zhang et. al (2014); Shu e Ouarda (2012).

d.3 Método de Interpolação Kriging

Da mesma forma que o método do inverso da distancia, o método Kriging, atribui aos postos mais próximos maior peso na hora da ponderação dos dados em locais com monitoramento, porém o calculo dos pesos e feita de uma forma mais sofisticada que no caso IDW e utiliza para tal fim o semivariograma e se assume que o modelo de variação espacial dos dados é homogênea através da superfície. Na interpolação espacial Kriging o valor de vazão no local desejado é calculado pela seguinte equação

$$Q_{x_0} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i Q_{x_i}}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$$

Equação 4

Onde Q_{x_0} é a vazão desejada no local sem monitoramento X_0 , Q_{x_i} é o valor observado no ponto X_i , N o numero de locais com dados e λ_i é o coeficiente de ponderação para cada posto com dados observados e estimado considerando uma correlação e configuração espacial de dados observados através do modelo de ajuste por semivariogramas para um semivariograma experimental. O semivariograma experimental expressa a covariância entre as observações como uma função de distancia e direção de determinados locais e descreve a estrutura de correlação espacial dos dados observados (CASTIGLIONI et. al, 2011).

Em aplicações práticas, o modelo teórico de semivariograma é ajustado a um semivariograma experimental para preencher a matriz de covariância definida positiva.

Vários são os trabalhos que utilizam esta metodologia para obter variáveis hidrológicas e principalmente vazão em locais sem monitoramento, entre eles podemos citar Castiglioni et. al. (2011); Zhang et. al. (2014); Kurtzman et al. (2009); etc.

Nos últimos anos, alternativamente, novas pesquisas têm sido desenvolvidas para estimar vazões e outras informações hidrológicas através de dados obtidos por sensores espaciais em combinação com modelos Kriging de interpolação espaço-temporal para rios “River Kriging” ou RK, no contexto da Missão Espacial “Surface Water and Ocean Topography” SWOT (PAIVA et. al., 2015; BIANCAMARIA et al., 2015).

Os dados globais obtidos através do SWOT podem então complementar espacial e temporalmente as medições in-situ nos rios o que faz aumentar e melhorar a cobertura espacial das observações.

d.4 Método de Interpolação utilizados principalmente no Brasil

Outros Métodos utilizados principalmente no Brasil podem ser brevemente descritos. Eles são: O Método baseado na interpolação linear e o Método proposto por Chaves et al. (2002).

O método baseado na interpolação linear descrito em Eletrobrás (1985b), chamado também de método das Vazões Específicas, consiste em obter vazões no local de interesse utilizando vazões correspondentes às seções fluviométricas próximas. Quando a seção de interesse encontra-se entre dois postos fluviométricos, a vazão na seção de interesse é obtida somando-se à vazão da seção localizada a montante da mesma, um incremento de vazão proporcional à vazão específica da área de drenagem entre as estações localizadas a montante e a jusante da seção de interesse. E, quando a seção de interesse localiza-se a montante ou a jusante de apenas um posto fluviométrico é considerado que a vazão específica das duas seções é igual, sendo a vazão de interesse calculada com base nesta premissa. No entanto Eletrobrás (1985b) recomenda que a aplicação desta metodologia somente deve ser feita quando a relação das áreas de drenagem das duas seções analisadas é inferior a três.

No caso do método proposto por Chaves et al. (2002), a interpolação e extrapolação de vazões dependem da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, sendo as variáveis utilizadas para a estimativa das vazões nas seções de interesse a área de drenagem e as distancias entre a seção de interesse e o posto fluviométrico

Novaes et. al. (2007), explicam os métodos citados da forma seguinte:

Método baseado na interpolação linear

O método não necessita de definição de regiões hidrologicamente homogêneas, sendo, portanto, utilizadas as mesmas equações ao longo de toda a bacia hidrográfica.

O método apresenta quatro situações distintas, dependendo da posição da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos. Assim, quando a seção de interesse está situada a montante (caso 1) ou a jusante (caso 2) de um posto com vazão conhecida, a vazão de interesse é estimada pela Equação 5.

Já quando a seção de interesse está situada num trecho de rio entre duas estações fluviométricas (caso 3), a vazão desconhecida é estimada pela Equação 6.

$$Q_z = \left(\frac{Q_{m,j}}{A_{m,j}} \right) A_z$$

Equação 5

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m)$$

Equação 6

em que:

Q_z = vazão na seção de interesse, $m^3 s^{-1}$;

$Q_{m,j}$ = vazão no posto de montante ou de jusante, $m^3 s^{-1}$

Q_m = vazão no posto de montante $m^3 s^{-1}$

Q_j = vazão no posto de jusante $m^3 s^{-1}$

A_z = área de drenagem na seção de interesse, Km^2 ;

$A_{m,j}$ = área de drenagem do posto de montante ou de jusante, Km^2

A_m = área de drenagem do posto de montante, Km^2 , e;

A_j = área de drenagem do posto de jusante, Km^2

A quarta situação (caso 4) é quando a seção de interesse esta situada em um trecho de rio afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos situados em um rio de ordem superior, neste caso é aplicada uma combinação das outras duas descritas anteriormente, sendo primeiramente calculada a vazão (Equação 6) na seção de confluência estimada a vazão na confluência dos rios aplicou-se a equação 5 para estima a vazão na seção de interesse

Método Chaves et al. (2002)

Quando a seção de interesse está situada a montante (caso 1) ou a jusante (caso 2) de um posto fluviométrico a metodologia é a mesma da interpolação linear, sendo a vazão na seção de interesse calculada pela Equação 5. Já quando a seção de interesse esta situada num trecho de rio entre duas estações fluviométricas (caso 3) a vazão requerida é estimada pela equação

$$Q_z = A_z \left[\left(P_m \frac{Q_m}{A_m} \right) + \left(P_j \frac{Q_j}{A_j} \right) \right]$$

Equação 7

Sendo:

$$P_m = \left(\frac{d_j}{d_m + d_j} \right)$$

Equação 8

$$P_j = \left(\frac{d_m}{d_m + d_j} \right)$$

Equação 9

P_m = peso relativo à estação de montante, adimensional; e

P_j = peso relativo à estação de jusante, adimensional

d_m = distancia entre o posto de montante e a seção de interesse, Km

d_j = distancia entre o posto de jusante e a seção de interesse, Km

A quarta situação (caso 4) é quando a seção de interesse está situada em um trecho de rio afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos situados em um rio de ordem superior. Neste caso é aplicada uma combinação das outras duas situações descritas anteriormente, sendo primeiramente calculada a vazão (Equação 7) na seção de confluência. Estimada a vazão na confluência dos rios aplicou-se a Equação 5 para estimar a vazão na seção de interesse.

Existem também os métodos de Interpolação Linear e Chaves et al. (2002) modificados que consistem em inserir a variável precipitação media nos métodos iniciais considerando assim que a vazão na seção de interesse é também proporcional à relação entre os volumes precipitados.

Lemos (2006) regionalizou, através de três metodologias, vazões mínimas de referencia (Q7,10, Q90 e Q95) na bacia do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marías. Os métodos utilizados foram o Tradicional Eletrobrás (1985a), Chaves et al. (2002) e vazão específica.

2.2 Simulações Hidrológicas

As simulações através de modelos hidrológicos são representações matemáticas de fenômenos hidrológicos que ocorrem na natureza. Quando estas representações tem a capacidade de reproduzir os processos físicos com exatidão teórica, estes são chamados de “modelos hidrológicos de base física” e os parâmetros ou constantes dos seus equacionamento podem ser estimados razoavelmente a priori ou podem ser medidos de forma independente. Por outra parte em aqueles casos nos quais existe carência de compreensão teórica ou dificuldade de obter os dados, os modelos de base física têm sido substituídos pelos modelos conceituais. Os modelos conceituais mantêm uma base física mínima, mas contém parâmetros que não podem ser medidos diretamente em um experimento no sistema hidrológico e, portanto, exigem uma etapa de ajuste ou de calibração (COLLISCHONN, 2001).

Vários são os modelos hidrológicos utilizados para estimar vazões em locais sem dados. Alguns estudos têm utilizado modelos distribuídos de base física (p. e. MIKE SHE) para estimar vazões em bacias não monitoradas. Estes modelos normalmente não envolvem processos de Regionalização. Götzinger e Bárdossy (2007) utilizaram modificações no modelo conceitual HBV para realizar estimativas de vazões em bacias não monitoradas através de abordagens de regionalização. A aplicação de modelos hidrológicos de base física detalhados, junto aos métodos de regionalização parecem proporcionar alguma melhoria, mas a um custo muito elevado. Esta abordagem é de uso intensivo de diferentes dados e pode não ser adequado em regiões não monitoradas ou pobremente monitoradas (RAZAVI E COULIBALY, 2013).

Em modelos hidrológicos dependentes de métodos de regionalização, modelos chuva-vazão são comumente selecionados. Os modelos Chuva-Vazão selecionados em estudos de regionalização são usualmente conceituais e semidistribuídos, tais como o HBV (BERGSTRÖM, 1995), IHACRES (POST e JAKEMAN, 1999; POST et al., 1998), SWAT (NEITSCH et al., 2012), TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979; BEVEN et al., 1995).

Na seleção de um modelo apropriado, deve-se considerar a disponibilidade de dados e qual modelo seria de aplicação mais simples, mais parcimonioso e com menor número de parâmetros. Também deve ser considerado qual dos modelos é capaz de representar a variabilidade e comportamento hidrológico de interesse dentro da bacia de estudo (p.e. presença de lagos, reservatórios etc.). Na abordagem de regionalização, um

modelo hidrológico é aplicado a um grande número de bacias com dados de vazão observados, onde seus parâmetros (θ) podem ser calibrados. A seguir, os valores de características da bacia que são considerados relevantes (ϕ) são medidos ou estimados, como a declividade, a densidade de drenagem, a amplitude altimétrica e o percentual de área da bacia com florestas (RAZAVI e COULIBALY, 2013). Conhecidos os valores de θ e de ϕ , são obtidas funções empíricas (f) que relacionam θ e ϕ . Posteriormente, em bacias em que não existem dados de vazão medidos, os valores de θ são estimados com base nos valores de ϕ , que podem ser obtidos a partir de mapas, e das funções f definidas antes (WAGENER et al. 2004).

2.3 Outras Metodologias Híbridas Utilizadas no Brasil.

Método Silveira

Podemos classificar dentro deste grupo o Método Silveira, que está baseado na aplicação de um modelo chuva-vazão simples que pode ser calibrado com apenas duas medições de vazão no período de estiagem (SILVEIRA, 1997; SILVEIRA et. al, 2005; TAMIOSO, 2012). Este método é aplicado principalmente em bacias pequenas e na estimativa de vazões mínimas.

A metodologia baseia-se na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado com uma amostragem reduzida de vazões, representando uma solução alternativa à necessidade da obtenção de séries contínuas de vazões, que é feita por um monitoramento convencional. O método considera que uma rápida interação com o meio, através de algumas medições locais em período de estiagem, conduz a uma boa avaliação da disponibilidade hídrica, através de um modelo chuva-vazão com dois parâmetros. Em bacias onde o tempo de concentração é inferior a um dia, a resposta rápida da bacia, na maioria das vezes, não coincide com a hora observada da vazão. No entanto, constatou-se que o monitoramento em intervalos diários é suficiente para a estimativa da disponibilidade hídrica (vazões médias e mínimas)

A depleção fluvial de uma bacia é um retrato do seu comportamento, após a ocorrência das precipitações. Em pequenas bacias esse processo é mais marcante devido à resposta rápida da bacia a precipitações, função do pequeno tempo de concentração. Assim o escoamento superficial produzido ocorre normalmente nos próprios dias chuvosos e os períodos de recessão representam o período mais longo de tempo no fluviograma (Figura 2) (TAMIOSO, 2012).

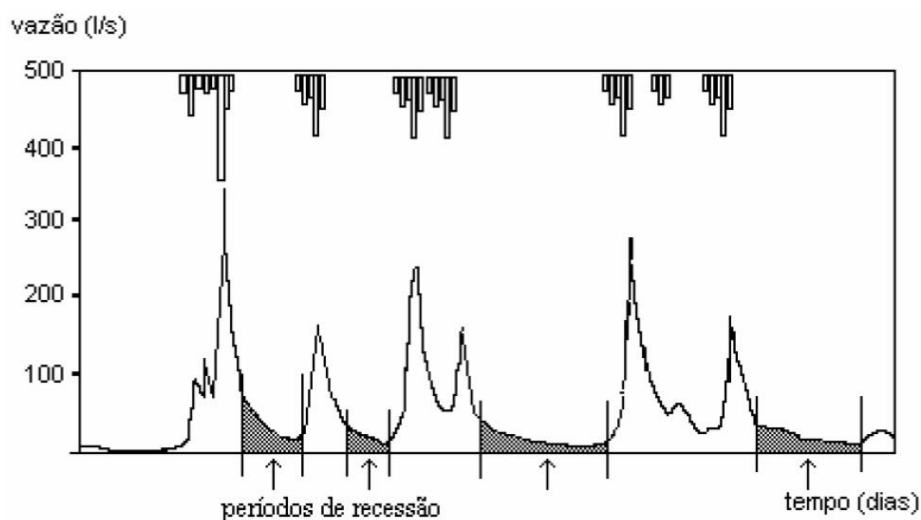


Figura 2–Hidrograma e períodos de recessão. Fonte: Silveira (1997) apud Tamioso (2012)

Dessa forma, a partir de algumas medições de vazão na seção de interesse em período de estiagem, busca-se representar uma série histórica de vazões através de simulação, transformando a precipitação em vazão. O significado da curva de depleção medida é dado por uma simulação de balanço hídrico diário que tenta reproduzi-la, a partir da cronologia de precipitações e estiagens, dados de fácil obtenção em qualquer região.

Sabendo isso, o método Silveira é aplicável a pequenas bacias, e considera estas como as áreas de drenagem onde o tempo de concentração seja inferior a um dia, de forma que a teoria do método seja válida. Como o método reproduz prioritariamente os períodos de estiagem, este é indicado para estudo de vazões de maior frequência (TAMIOSO, 2012).

Método de extensão de series proposto por Obregon et al. (1999)

Obregon et al. (1999), usaram a regionalização de vazões em uma região bastante carente de dados, nas bacias afluentes à Lagoa Mirim - RS, e nos locais com séries de dados relativamente curtas, estes autores utilizaram um modelo hidrológico chuva-vazão para estender as séries de vazão aumentando assim o tamanho da amostra antes de iniciar os procedimentos normais de regionalização.

A metodologia para regionalização de vazões em regiões com dados escassos de vazão é realizada neste estudo nas seguintes etapas:

i. Extensão das séries de vazões com base num modelo hidrológico mensal: IPHMEN (TUCCI, 1998);

ii. Regionalização das vazões com base nas séries históricas e geradas.

Primeiramente é realizada a calibração e verificação do modelo IPHMEN utilizando os postos com dados de vazão existentes. Logo com o modelo calibrado se procede a realizar simulações para estender as series nos postos com series curtas para o período que se deseja e conforme à disponibilidade de dados de clima e de precipitação disponíveis.

Uma vez estendidas as series, é realizada a regionalização das funções hidrológicas: curva de permanência e curva de regularização.

Método Calibração de um Modelo Chuva-Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluiométrico a partir de Curvas de Permanência Sintéticas (PINHEIRO E NAGHETTINI 2010)

Outra proposta alternativa de combinar a regionalização e a modelagem hidrológica chuva-vazão foi apresentada recentemente por Pinheiro e Naghettini (2010).

A proposta consiste em um método para calibração automática de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento hidrométrico, utilizando a curva de permanência sintética de longo período, obtida a partir de um modelo estatístico regional. Neste contexto, as curvas de permanência de longo período constituem funções características próprias do regime hidrológico da bacia hidrográfica e são aqui usadas como instrumento para calibração dos parâmetros de um modelo conceitual chuva-vazão. Uma vez obtidos os parâmetros que comandam a síntese hidrológica do modelo em questão, a simulação contínua de descargas, ao longo de um dado período de tempo, viabiliza avaliações hidrológicas diversas, tais como a análise de frequência de eventos raros, o balanço hídrico de reservatórios, os estudos de amortecimento de cheias e de disponibilidades hídricas.

A metodologia deste trabalho dividiu-se em duas partes principais:

- Definição de regiões homogêneas quanto às curvas de permanência de longo termo (FDCs) e elaboração de um modelo regional que permita a síntese dessas funções

hidrológicas em bacias não-monitoradas, desde que essas atendam aos critérios de homogeneidade.

- Calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão RIO GRANDE, conceitual, determinístico, concentrado e contínuo, conforme descrição geral de Queiroga et al. (2005) em locais sem dados fluviométricos, a partir das FDCs sintéticas obtidas pelo modelo regional proposto acima.

2.4 Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH.

O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo hidrológico conceitual, distribuído, aplicado a grandes bacias hidrográficas, apresentado por Collischonn (2001). As primeiras versões do modelo MGB-IPH utilizavam células regulares quadradas como unidade de discretização da bacia hidrográfica. Versões mais recentes do modelo adotam uma subdivisão da bacia em sub-bacias, ou mini-bacias (PAIVA, 2009; FAN E COLLISCHONN, 2014).

O intervalo de tempo de cálculo do modelo é diário ou menor, embora alguns processos de cálculo internos, como a propagação de ondas de cheia nos rios, utilizem intervalos de tempo menores. A maioria das aplicações do modelo MGB-IPH tem sido na simulação hidrológica de grandes bacias hidrográficas, onde normalmente é utilizado o intervalo de tempo diário.

A variabilidade espacial da precipitação no modelo é considerada através da interpolação dos dados de postos pluviométricos para o centroide de cada minibacia em que a bacia é discretizada. Nesse processo é utilizado o método do inverso do quadrado da distância.

A variabilidade espacial do relevo é considerada através da utilização de Modelos Numéricos do Terreno (MNT).

A variabilidade dos solos quanto ao tipo e uso é considerada através da utilização de planos de informação, determinados a partir de imagens de satélite ou mapas digitalizados.

O tipo de vegetação e uso do solo dentro de cada minibacia é categorizado dentro de uma ou mais classes utilizando a abordagem de Unidades de Resposta Hidrológica (URH). As URH's são áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação dos mapas de tipo e uso do solo.

Dessa forma, o balanço hidrológico é calculado para cada URH em cada minibacia e as vazões estimadas em cada URH são posteriormente somadas e propagadas até a rede de drenagem. O balanço de água no solo é realizado utilizando um método baseado 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. A evapotranspiração é estimada pelo método de Penman — Monteith (SHUTTLEWORTH 1993).

A propagação de vazão é realizada em duas etapas. Em primeiro lugar é realizada a propagação de vazão no interior da minibacia, utilizando-se modelos de reservatórios lineares simples. Cada minibacia tem três reservatórios lineares que representam a propagação dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. A vazão de saída dos três reservatórios é somada e propagada pela rede de drenagem utilizando o método Muskingum- Cunge.

Embora alguns processos sejam representados de forma empírica, o modelo hidrológico conta com uma forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Uma descrição com maior detalhe do modelo pode ser encontrada em Collischonn (2001); Collischonn (2007) e Paiva (2009).

No MGB-IPH a discretização é realizada em algumas etapas, todas elas dentro de um software SIG, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE). As etapas são detalhadamente explicadas em (MAINARDI et. al., 2009; BUARQUE et al., 2009; MAINARDI et. al., 2010).

Para a sua aplicação são necessários os seguintes dados da bacia a ser estudada: séries de chuva e vazão, séries de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Para o pré-processamento são necessários dados de topografia, mapas de tipos de solos, e mapas de cobertura vegetal e uso da terra.

A preparação dos dados de entrada os processos e resultados do modelo são resumidos na Figura a seguir.

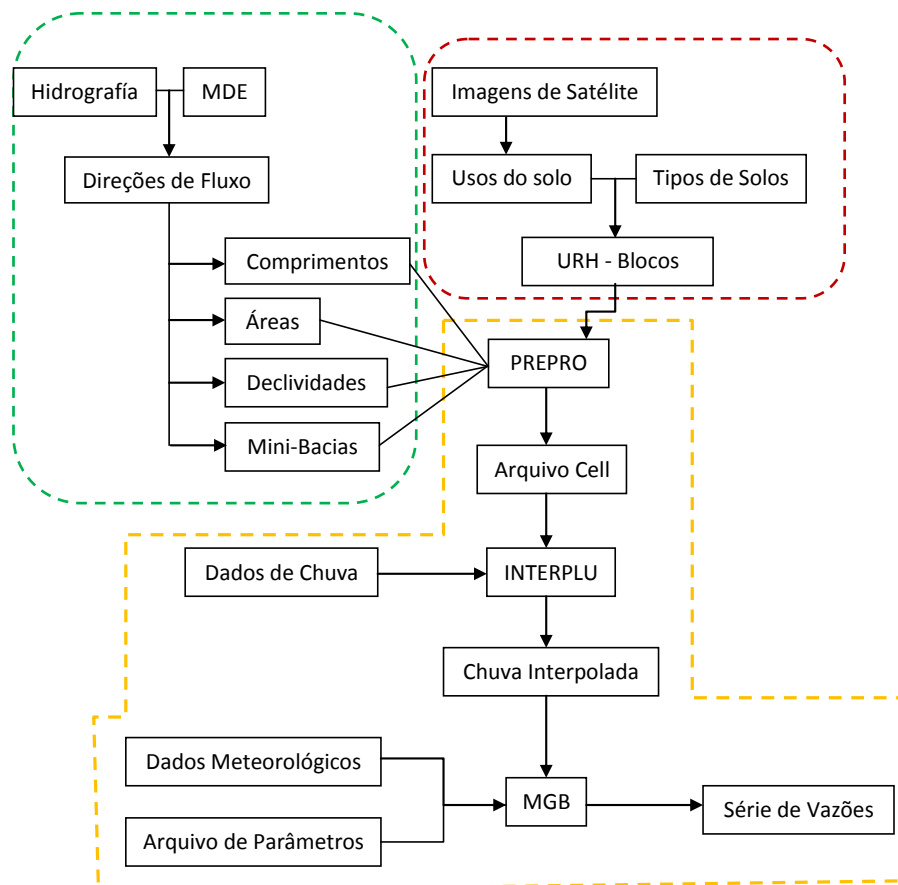


Figura 3—Preparação dos dados, processos e resultados do MGB-IPH. Fonte: Collischonn (2009)

Os parâmetros do modelo são os seguintes:

- Wm: Capacidade de armazenamento do solo [mm]
- b: Parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação [-]
- KINT: parâmetro de drenagem sub-superficial. [mm.dia-1]
- KBAS: parâmetro de escoamento subterrâneo. [mm.dia-1]
- CS: parâmetro para calibração da propagação superficial nas células [-]
- Cl: parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células [-]
- CBAS: parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo. [dias]

Os Parâmetros fixos que têm valores que podem ser medidos, que podem ser relacionados à vegetação, ou que não interferem profundamente nos resultados são:

- IAF: índice de área foliar
- rs: resistência superficial [s.m-1]
- α : albedo [-]
- Wz: limite inferior de armazenamento no solo para haver escoamento sub-

superficial

A calibração do modelo geralmente é realizada em três etapas. Numa primeira etapa os valores dos parâmetros são definidos com base em características dos solos e da vegetação e com base em aplicações anteriores em bacias semelhantes. Na segunda etapa é realizada uma calibração manual, por tentativa e erro, em que os valores dos parâmetros são alterados manualmente, procurando uma boa representação dos hidrogramas em locais onde existem dados de vazão observados. Na terceira etapa é utilizado um método de calibração automática multi-objetivo, MOCOM-UA (YAPO et al., 1998).

A técnica de Yapó et al. (1998) é denominado MOCOM-UA (Multiple-Objective Complex Evolution - Universidade do Arizona) e é uma variação do algoritmo SCE-UA (DUAN et. al., 1992). Este utiliza o conceito de “hierarquização de Pareto” ou Pareto ranking, para encontrar, em apenas um procedimento de otimização, vários pontos na região de Pareto.

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 (um hiper-cubo definido num hiper-espaço).

A seguir, são gerados, aleatoriamente, n_s conjuntos de parâmetros ou pontos na região válida. Cada ponto é dado pelos valores dos n parâmetros e, para cada um dos pontos, as n_f funções objetivo são avaliadas, gerando uma matriz de resultados $F(n_s, n_f)$.

Uma vez obtidos os valores das funções objetivo, os conjuntos de parâmetros são avaliados e hierarquizados pelos critérios de dominância e não dominância (um ponto é dominado se os valores de todas as funções objetivo deste ponto são inferiores aos valores de todas as funções objetivo de pelo menos um dos outros pontos).

Para a etapa de calibração automática as funções objetivo normalmente utilizadas são: o coeficiente Nash Sutcliffe, o coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos das Vazões, Erro Relativo de Volume e Erro Relativo da Q90

Logo das calibrações e a obtenção dos n parâmetros ótimos, as saídas do modelo comumente são series de vazões em todos os trechos para um intervalo de tempo predeterminado igual ao período de simulação.

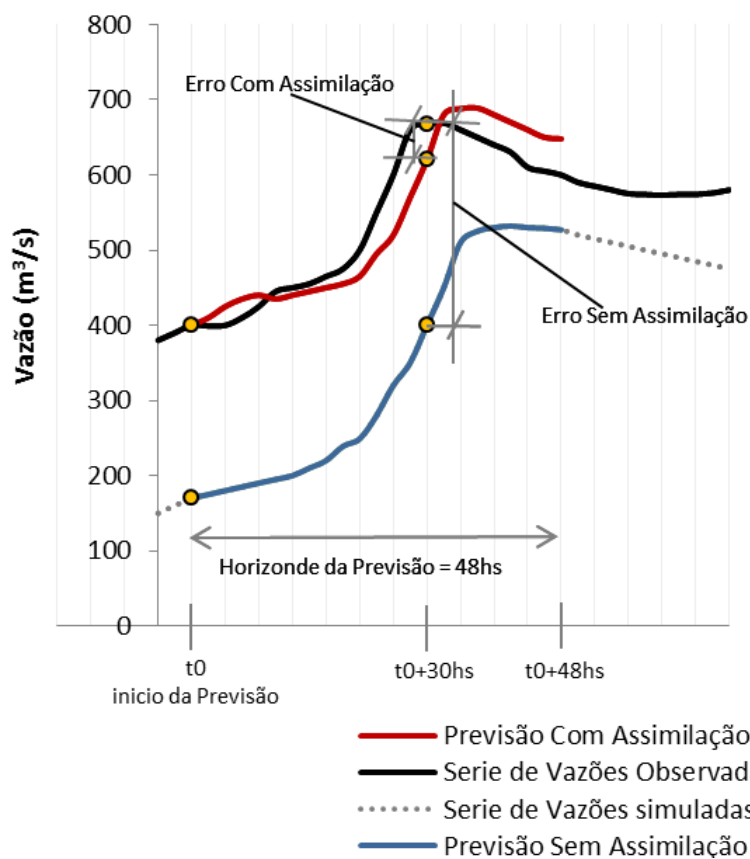
2.5 Assimilação de Dados em Simulações Hidrológicas.

A assimilação de dados é também chamada de atualização, consiste em um processo de retroalimentação em que valores observados das variáveis relevantes (vazão, nível da água, umidade do solo) são utilizadas para corrigir as variáveis de estado do modelo hidrológico, aproximando as condições simuladas pelo modelo às condições observados em campo (MADSEN e STOKNER, 2005; MELLER, 2012).

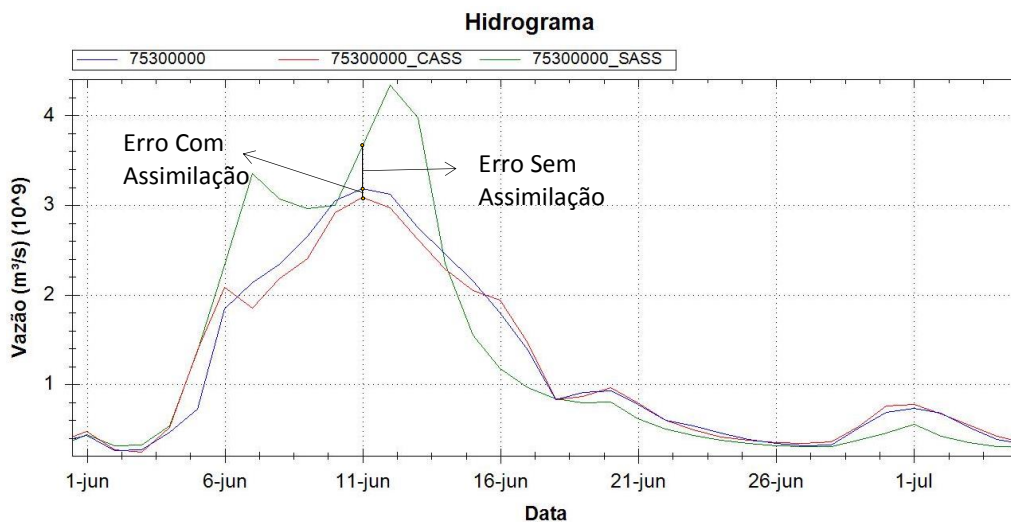
É sabido que quando aplicado um modelo hidrológico sempre surgem as diferenças entre os valores calculados pelo modelo e os dados observados, mesmo que o modelo e os dados de entrada sejam de boa qualidade. Isto ocorre porque o modelo sempre é uma representação imperfeita da natureza e porque os dados de entrada utilizados no modelo também são imperfeitos.

A assimilação de dados é comumente utilizada em modelos hidrológicos que são aplicados para a previsões de vazão. Nestes casos, a assimilação é utilizada para estimar as condições iniciais das variáveis de estado do modelo hidrológico no instante de tempo correspondente ao início da previsão. Uma boa técnica de assimilação de dados resulta em uma boa aproximação das condições iniciais, o que permite melhorar as previsões de vazão em antecedências relativamente curtas, conforme mostra a Figura 4 (MELLER 2012; PAIVA et al., 2013).

Alguns trabalhos afirmam que os métodos de assimilação, quando aplicados em modelos hidrológicos distribuídos, podem ser utilizados para aprimorar a estimativa de vazões em locais não monitorados (CLARK et al., 2008), ou para aprimorar a estimativa de outras variáveis hidrológicas, como a umidade do solo (PAUWELS e DELANNOY, 2006; WARRACH-SAGI e WULFMEYER, 2010). Em um estudo sobre a assimilação de dados em um modelo hidrológico distribuído da bacia do rio Amazonas, Paiva et al. (2013) mostraram que as previsões de séries de vazões em diversos locais tratados como não monitorados poderiam ser aprimoradas pela assimilação dos dados observados em postos fluviométricos localizados a montante ou a jusante. Estes resultados sugerem que seria possível estimar séries de vazões em locais sem dados com a combinação das técnicas de simulação chuva-vazão e de assimilação de dados.



(a) Fonte: (Meller et al.; 2012)



(b) Fonte: Elaboração Própria

Figura 4—Efeito da aplicação de um método de assimilação ou atualização das variáveis sobre o hidrograma calculado por um modelo hidrológico (a) Simulação com previsão de Vazões (b) Simulação de Vazões Simples dentro de um período de tempo determinado.

O presente trabalho apresenta uma metodologia de combinação de técnicas de modelagem chuva vazão com assimilação de dados e descreve alguns testes realizados na bacia do rio Taquari-Antas e logo em todo o Estado do Rio Grande do Sul. O modelo

hidrológico chuva vazão utilizado é o modelo distribuído de grande escala MGB-IPH (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; FAN e COLLISCHONN, 2014). A técnica de assimilação de dados adotada é a técnica Empírica ou Eurística adotada anteriormente em aplicações do modelo MGB-IPH para previsão de vazão (ANDREOLLI et al., 2006; MELLER et al., 2012; COLLISCHONN et al., 2007; PAZ et al., 2007; COLLISCHONN et al., 2005).

2.5.1 Aplicação Frequente de Métodos de Assimilação de Dados.

Como já foi mencionado a grande maioria dos métodos de Assimilação de dados, aplicados a simulações hidrológicas, se orientam a melhorar as estimativas em previsão de vazões.

Um dos inconvenientes que surgem quando se utiliza um modelo chuva-vazão para previsão de vazões, é que o valor estimado pelo modelo no instante de partida da previsão normalmente é diferente daquele observado, o que acaba por afetar a qualidade das previsões já nos primeiros intervalos de tempo de previsão. Este desvio se deve a diversos fatores. como erro nos dados de entrada, deficiência na representação dos processos físicos pelo modelo ou erros na calibração do modelo, mudanças nas características da bacia ao longo do tempo ou até erros nos dados observados nas estações de monitoramento (SERVAN e ASKEW, 1991)

Existindo dados observados de vazão ou nível, é possível aproximar o comportamento do modelo à resposta do sistema observada em campo, procedimento conhecido como assimilação de dados ou atualização.

Os Métodos de assimilação de dados na previsão hidrológica são organizados em quatro categorias principais segundo O'Connell e Clarke (1981); e, Refsgaard (1997): (a) Atualização das variáveis de entrada, (b) Atualização das variáveis de estado, (c) Atualização dos parâmetros do modelo, e (d) Atualização das variáveis de saída. A Figura 5 apresenta, esquematicamente, como cada um desses métodos interage com o modelo e em qual etapa da previsão hidrológica são aplicados.

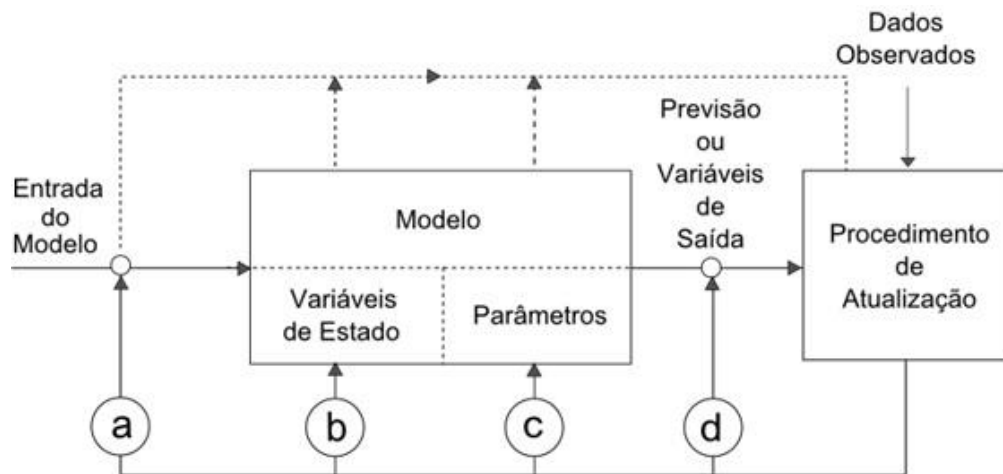


Figura 5– Métodos usados na assimilação de dados. Fonte: Refsgaard (1997) apud Meller et al. (2012)

A seguir é feita uma breve descrição dos métodos de assimilação.

Atualização das Variáveis de Entrada

Nessa técnica os dados de entrada são modificados de modo que as variáveis de saída do modelo, no instante ou período anterior ao início da previsão, se aproximem dos dados observados. A aplicação dos métodos que pertencem a essa categoria se sustenta no fato das incertezas nos dados de entrada serem frequentemente dominantes sobre os erros da previsão (REFSGAARD, 1997).

A maior parte desse tipo de procedimento é baseada em algoritmos de tentativa e erro (SERBAN e ASKEW, 1991), sendo as variáveis de entrada normalmente utilizadas a precipitação e a temperatura. As etapas mais importantes no procedimento, observadas por Serban e Askew (1991), são:

- (a) determinação do erro entre os hidrogramas medidos e simulados;
- (b) comparação com um erro aceitável, pré-definido;
- (c) seleção das variáveis de entrada a serem ajustadas, além do incremento de ajuste para cada variável e o número máximo de iterações permitido;
- (d) repetição do processo com o modelo usando as variáveis de entrada ajustadas.

Atualização das Variáveis de Estado

As condições iniciais do modelo são corrigidas através de algumas de suas variáveis de estado para se obter uma melhor relação entre os dados observados e calculados no início da previsão. O termo “estado” é usado para descrever uma variável

do modelo que se situa em um estágio entre a entrada e a saída do modelo (SZOLLOSI-NAGY, 1976 apud MOORE, 2007).

A técnica se fundamenta na hipótese que os erros presentes nos dados de entrada dos modelos chuva-vazão se acumulam e aparecem nas variáveis definidas a partir de reservatórios conceituais, elementos que tipicamente são parte da estrutura desses modelos (SERBAN e ASKEW, 1991)

A assimilação das variáveis de estado do modelo pode ser realizada basicamente de duas maneiras: por procedimentos empíricos ou métodos envolvendo o filtro de Kalman. Nos métodos empíricos as variáveis observadas - normalmente a vazão - são usadas para determinar o erro cometido pelo modelo no instante da previsão. Esse erro pode ser expresso na forma de um fator de ajuste, que é então utilizado para ajustar as variáveis de estado do modelo (MOORE, 2007). Exemplos de métodos empíricos são apresentados nos trabalhos de Wöhling et al. (2006), Paz et al. (2007) e Moore (2007).

Abordagens utilizando o filtro de Kalman ou variantes desse método tem se tornado bastante utilizadas na atualidade, podendo-se citar os trabalhos de Madsen e Stokner (2005), Xie e Zhang (2010), Paiva et al. (2013), entre outros.

Atualização dos Parâmetros

Nesta técnica de assimilação de dados os valores mais recentes de vazões ou níveis observados são utilizados para iniciar uma nova fase de calibração dos parâmetros do modelo, podendo ser usados algoritmos de otimização automática para esse fim. Os procedimentos que pertencem a essa categoria têm sido pouco utilizados na modelagem chuva-vazão conceitual (SENE, 2009; DIVAC et al., 2009), embora tenham aplicabilidade reconhecida no caso de modelos baseados em funções de transferência, autorregressivos ou de redes neurais artificiais.

A assimilação dos parâmetros do modelo tem sido alvo de críticas por diversos autores. Serban e Askew (1991), por exemplo, comentam o problema da existência de interdependência entre parâmetros, observada na maior parte dos modelos. Isso significa, em termos gerais, que a modificação de um parâmetro se reflete na necessidade de modificação de outros parâmetros o que, na prática, equivaleria a calibrar novamente modelo a cada instante inicial de previsão. Moore et al. (2005) indica que a necessidade de variação dos parâmetros ao longo do tempo é um diagnóstico da deficiência existente na estrutura do modelo.

Atualização da Saída

Também chamado de predição ou correção do erro, esse método consiste em prever os erros de previsão do modelo, o que normalmente é realizado através de modelos ajustados para a série temporal de diferenças (resíduos) entre os valores observados e calculados. Os métodos que pertencem a essa categoria são considerados os mais amplamente utilizados na previsão hidrológica (REFSGAARD, 1997), e têm como principal vantagem o fato de serem aplicados de maneira independente do modelo de previsão, o que simplifica significativamente sua operacionalização na previsão em tempo-real.

Na assimilação da saída de modelos de previsão são utilizados normalmente modelos auto-regressivos. Assim sua eficiência depende do grau de persistência do erro entre as vazões observadas e calculadas na série temporal.

O procedimento de atualização na saída contempla, de modo geral, três etapas: (a) calibração do modelo chuva-vazão; (b) calibração do modelo de previsão dos erros para a série de resíduos, que pode ocorrer uma única vez ou ser corrigida a cada previsão; e (c) correção dos resultados do modelo no modo simulação, a fim de se obter uma previsão atualizada.

2.5.2 Assimilação de dados no Modelo MGB-IPH.

A assimilação de dados no MGB-IPH é realizada através de um método empírico, proposto originalmente por Andreolli (2003) e logo por Collischonn et al. (2005), sendo sua última versão apresentada nos trabalhos de Paz et al. (2007), Collischonn et al. (2007), Meller et al. (2012).

Neste trabalho o método cujo código original foi escrito para ser aplicado em previsão de vazões, foi adaptado para ser utilizado apenas no modo de simulação do modelo MGB-IPH e é brevemente descrito a seguir.

O método utiliza as vazões observadas para atualizar as variáveis de estado do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e o volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo de cada minibacia do modelo hidrológico.

A atualização das variáveis de estado do modelo se dá através de um fator de correção de atualização (FCA), definido como o quociente entre o somatório das vazões

observadas e calculadas durante o período de simulação, conforme apresentado na Equação 10.

$$FCA_s = \frac{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{obs}^t}{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{cal}^t}$$

Equação 10

onde: Q_{obs}^t e Q_{calc}^t são as vazões observadas e calculadas respectivamente; t é o tempo de cálculo; t_0 é o instante de tempo da realização da simulação; t_a é o intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e observados, é um número de dias predeterminado, e anterior a t_0 instante da simulação, e, s representa o ponto de exutório da sub-bacia, onde existe um posto fluviométrico com dados observados para atualização do modelo.

A cada intervalo de tempo de simulação os fatores de correção das sub-bacias são calculados e aplicados às variáveis de estado do modelo para cada uma das minibacias.

No caso da atualização das vazões na rede de drenagem, o fator FCA é ponderado pela área de drenagem relativa de cada minibacia. Assim, as correções da vazão na rede de drenagem no método são mais fortes em minibacias localizadas sobre a drenagem principal, que possuem maiores áreas de drenagem acumuladas.

Para todas as minibacias, as vazões calculadas pelo modelo são atualizadas de acordo com a Equação 11.

$$Qat_{i,s} = FCA_s \cdot Qcalc_i \cdot (A_i/A_s)^{ebac} + Qcalc_i \cdot [1 - (A_i/A_s)^{ebac}]$$

Equação 11

Onde $Qat_{i,s}$ é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia i , localizada a montante do ponto s ; A_i é a área de drenagem acumulada na minibacia i ; A_s é a área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados e $ebac$ é um parâmetro com valores entre 0 e 1.

Na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais o mesmo fator de correção (FCA) aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem é utilizado. Para os reservatórios, porém, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento originária dos reservatórios conceituais do modelo, representada pela

variável PBi . Neste trabalho a correção é realizada somente no reservatório subterrâneo e o valor de PBi é calculado através da metodologia proposta por Fan e Collischonn, (2015)

A correção dos volumes dos reservatórios conceituais é dada por:

Se $PBi > PBlim$

$$VBat_{i,s} = (FCA_s)^{bx} \cdot VB_i \cdot (PB_i) + VB_i \cdot (1 - PB_i)$$

Equação 12

Se $PBi \leq PBlim$

$$VBat_{i,s} = VB_i$$

Equação 13

Onde $VBat_{i,s}$ é o volume atualizado no reservatório na minibacia i , situada a montante de s ; VB_i é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia i ; $PBlim$ é a fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo, este valor é predeterminado, e bx é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1 que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões calculadas e observadas.

De acordo com Paz et al. (2007), quando o parâmetro bx assume valores próximos de 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida. Quando assume valores próximos à zero diminui a intensidade das correções.

O PBi , é calculado então seguindo a metodologia do filtro de vazão de base proposta por Fan e Collischon (2015) como segue:

Na aplicação de filtros supõe-se que a vazão total do hidrograma em um determinado intervalo de tempo é formada por duas componentes - escoamento superficial e escoamento subterrâneo - e que é possível fazer uma estimativa destas a partir da aplicação de uma técnica de cálculo.

Para a separação de escoamento em grandes bacias hidrográficas, que tem importante contribuição subterrânea, um filtro com dois parâmetros foi proposto por Eckhardt (2005):

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{\max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1 - a) \cdot BFI_{\max} \cdot Q_i}{1 - a \cdot BFI_{\max}}$$

Equação 14

Onde Q é a vazão total do hidrograma, i é o intervalo de tempo, b é o escoamento subterrâneo, a é um parâmetro de forma da recessão, e BFI_{\max} é o máximo percentual de escoamento subterrâneo que o filtro permite calcular. O filtro é aplicado considerando limitados os valores b_i a menores ou iguais a Q_i .

Este filtro tem sido largamente utilizado e apresentado resultados promissores na separação de escoamento a partir de hidrogramas, conforme pode ser observado nos trabalhos de Eckhardt (2005), Collischonn e Fan (2012). Outra vantagem deste filtro é que seus parâmetros podem ser estimados diretamente a partir de uma análise dos hidrograma (Collischonn e Fan, 2012).

Neste trabalho é realizada uma aplicação do filtro de base ao método empírico de assimilação de dados do modelo MGB-IPH, para o cálculo do parâmetro PBi , que representa a fração do escoamento originária do reservatório subterrâneo.

Essa correção é realizada aplicando-se o filtro de vazão de base dado pela Equação 14 aos dados observados, e então calculando a fração de água subterrânea através da seguinte equação:

$$PB_i = \frac{b_i}{Q_i}$$

Equação 15

Onde PBi é a fração do escoamento originária do reservatório subterrâneo no intervalo de tempo i , b_i é a vazão de base calculada, e Q_i é a vazão total observada no ponto.

A utilização do filtro de base proporciona uma estimativa independente da fração de água subterrânea em um local, que não é afetada pela distribuição e qualidade dos dados pluviométricos, o que possivelmente permitiria uma correção mais próxima da realidade das variáveis de estados relacionadas com o escoamento subterrâneo no modelo hidrológico.

CAPÍTULO 3

METODO DE APLICAÇÃO DO TESTE DE AVALIAÇÃO

Nos itens 2.4 e 2.5.2 são descritos, respectivamente, o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH e o Método de Assimilação utilizado dentro do Modelo.

A Metodologia proposta consiste então na aplicação do Método de Assimilação de Dados descrito acoplado ao Modelo MGB-IPH com a finalidade de reduzir os erros nas estimativas de vazões nos locais sem monitoramento dentro da área de estudo escolhida. Os valores de erro gerados nessa estimativa são comparados com os gerados pelo Próprio Modelo MGB-IPH Sem Assimilação de dados, com os valores gerados pelo método tradicional de regionalização de vazões através da área e com os valores obtidos por um método simples de interpolação linear.

A sequência de aplicação do teste é descrita a seguir e resumida na Figura 6.

Primeiramente foram escolhidas as bacias onde foram aplicadas as diferentes metodologias com base na disponibilidade temporal e espacial dos dados de chuva e vazão principalmente.

Seguidamente e praticamente em forma simultânea é feita a organização dos dados necessários e seleção dos locais com postos fluviométricos para calibração, isto devido a que os pontos, onde o modelo foi calibrado, dependem da boa disponibilidade de dados de vazão preferentemente para um período de tempo coincidente em todos os postos fluviométricos selecionados.

Os postos fluviométricos foram separados em dois grupos. Os postos do primeiro grupo foram utilizados para a calibração do modelo hidrológico e para a assimilação de dados. Os postos do segundo grupo foram utilizados apenas para verificação das estimativas de vazão. Os postos desse segundo grupo são denominados aqui “Locais Pseudo-Não-Monitorados (LPNM)”.

A calibração do modelo MGB-IPH foi realizada para os postos fluviométricos do primeiro grupo, considerando um período de calibração determinado previamente baseado na disponibilidade de dados.

Em cada bacia foram realizadas as seguintes etapas, na ordem indicada:

1. Calibração do modelo hidrológico em cada bacia hidrográfica utilizando os dados dos postos fluviométricos do primeiro grupo.
2. Simulação com o modelo hidrológico para o mesmo período da calibração, para obter as vazões nos locais correspondentes aos postos fluviométricos do segundo grupo (LPNM). Esta simulação foi realizada sem o procedimento de assimilação de dados.
3. Simulação idêntica à realizada no passo 2, porém com o procedimento de assimilação de dados, considerando apenas a assimilação dos dados dos postos fluviométricos do primeiro grupo. Nesta etapa também foram geradas as vazões nos locais do segundo grupo.
4. Estimativa de vazões de referencia Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%), QmaxTr50(%) para as séries de vazão geradas na etapa 2.
5. Estimativa de vazões de referencia Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%), QmaxTr50(%) para as séries de vazão geradas na etapa 3.
6. Estimativa de vazões de referencia Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%), QmaxTr50(%) nos locais correspondentes aos postos fluviométricos do segundo grupo, utilizando uma equação de regionalização baseada em postos fluviométricos do primeiro grupo
7. Estimativa de vazões de referencia Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%), QmaxTr50(%) nos locais correspondentes aos postos fluviométricos do segundo grupo, utilizando uma relação linear com a área de drenagem com auxílio dos postos do primeiro grupo.
8. Com base nos dados observados dos postos fluviométricos do segundo grupo foram calculadas as vazões de referencia Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%), QmaxTr50(%) observadas.
9. As estimativas das vazões de referencia obtidas nas etapas 4, 5, 6 e 7 foram comparadas com as vazões de referencia observadas obtidas na etapa 8.

Finalmente são avaliadas as quatro metodologias através da comparação dos erros resultantes.

A Figura 6 apresenta o esquema resumido da aplicação da sequencia metodológica:

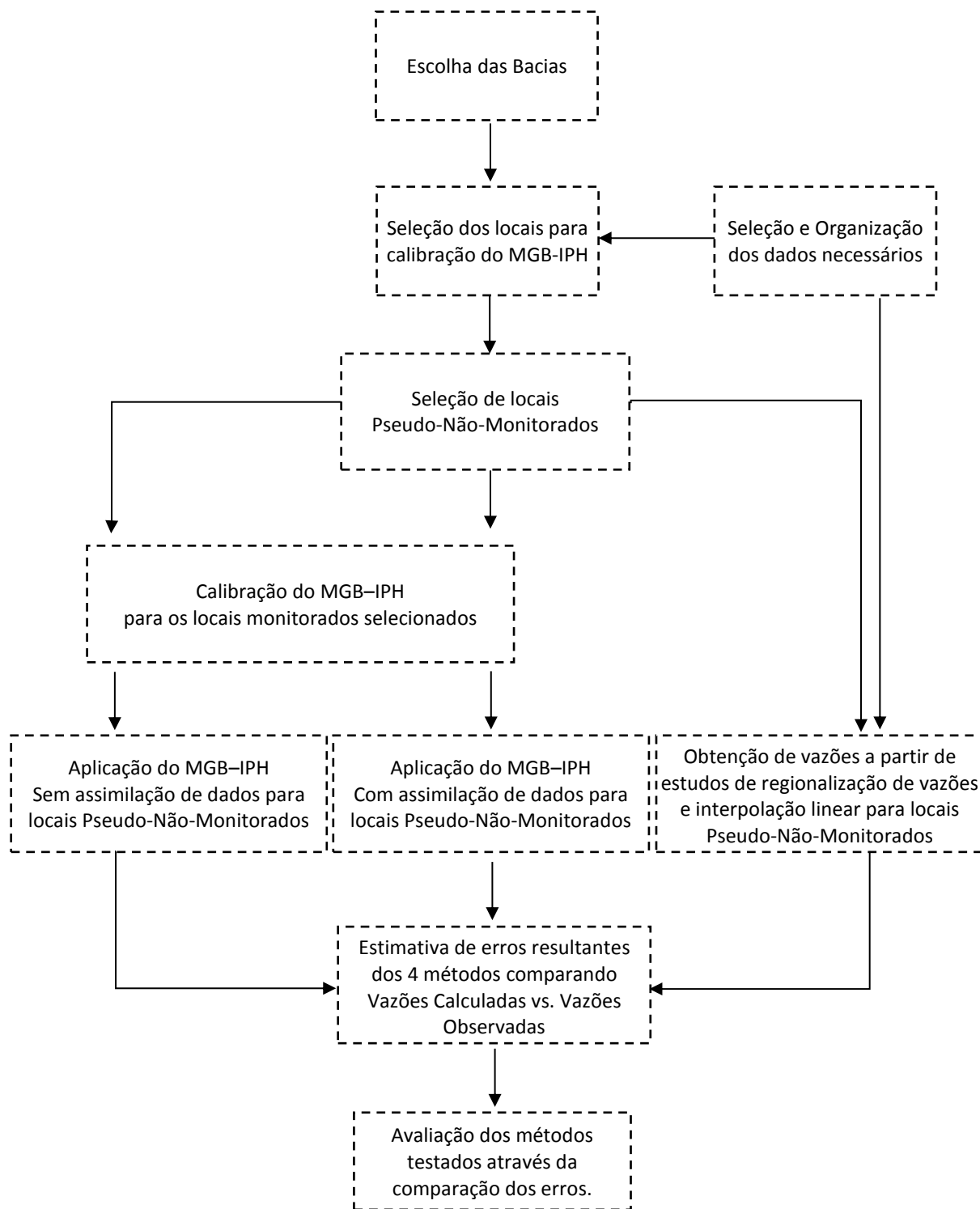


Figura 6–Fluxograma da metodologia proposta

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DO MÉTODO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Para a avaliação da metodologia proposta foi selecionada a área da região do estado do Rio Grande do Sul, pela variedade dentro da mesma de tipos de solo, tipos de vegetação ou usos de solo, geologia, topografia e também pela quantidade e qualidade dos dados hidroclimáticos o que permite que a metodologia proposta possa ser aplicada em unidades de paisagem variadas tendo boa quantidade de estações de medição de vazão com dados, onde a avaliação do método pode ser realizada retornando resultados conclusivos.

Esta é a região de todas as bacias contidas totalmente ou parcialmente dentro do Estado do Rio Grande do Sul. Este trabalho, em consequência, obterá como produto final a disponibilidade hídrica nos rios localizados dentro do estado do Rio Grande do Sul, representada por uma vazão de referencia (mínima, media ou máxima), junto a uma estimativa do erro associado a cada trecho de rio para o qual a vazão de referencia tem sido calculada.

4.1 Localização e Características da Região

O Estado do Rio Grande do Sul está localizado na região sul do Brasil, tendo como limites o Estado de Santa Catarina ao Norte, o Oceano Atlântico ao Leste, a Argentina à Oeste e o Uruguai ao Sul (Figura 7). O Estado abarca uma superfície aproximada de 281.730Km² e tem uma população aproximada de 11.247.972 hab. (IBGE, 2015).

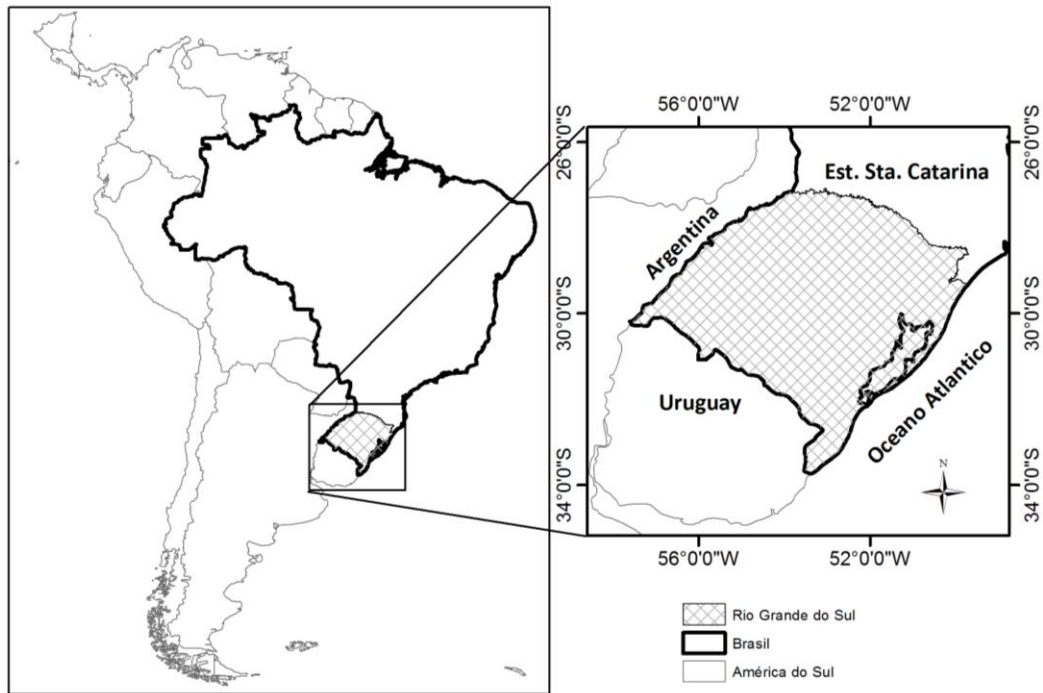
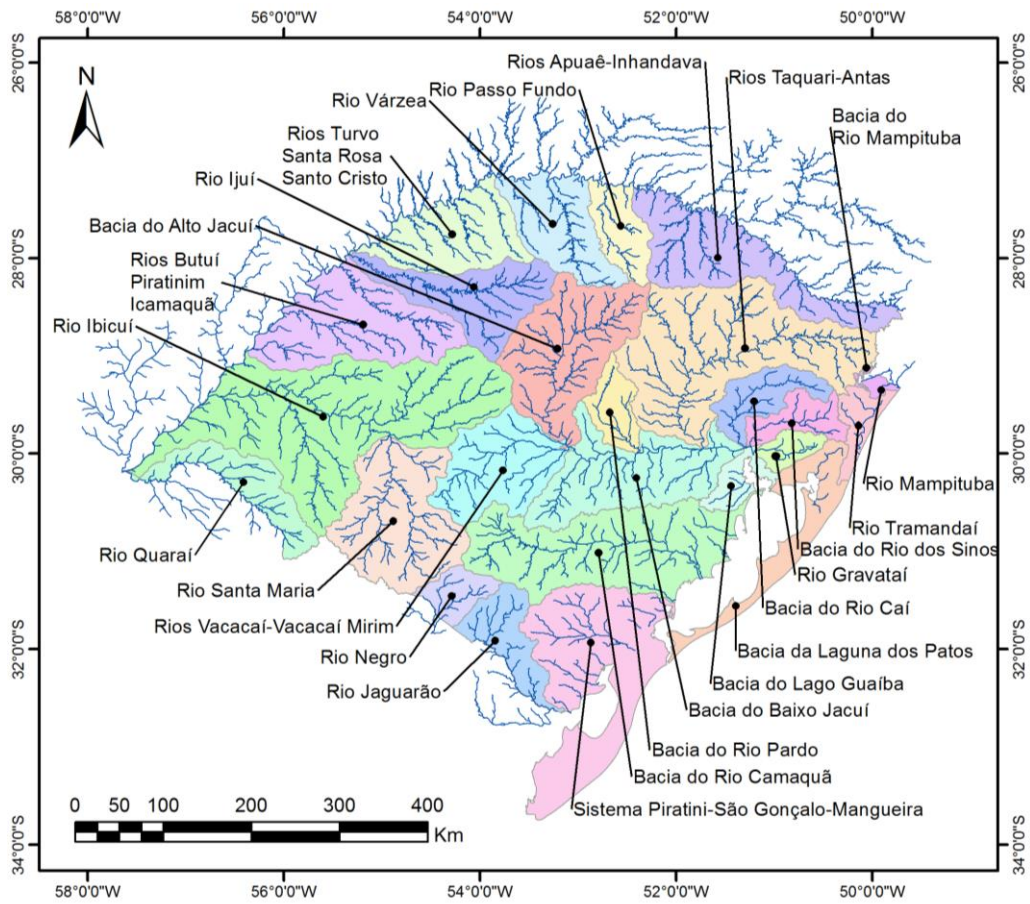


Figura 7–Localização da Região de Estudo

Segundo SEMA (2010), a Lei 10.350/1994 do estado de Rio Grande do Sul determinou a existência de três Regiões Hidrográficas, as quais foram subdivididas em bacias hidrográficas, totalizando 26 unidades (Figura 8). As três regiões hidrográficas são a região do rio Uruguai que coincide com a bacia nacional do Uruguai, a região do Guaíba e a região do Litoral, que coincidem com a bacia nacional do Atlântico Sudeste. Neste trabalho são simuladas quase a totalidade das bacias, excetuando alguns cursos de água das bacias do Litoral Médio e da região litorânea do sistema São Gonçalo-Mangueira (Figura 8). Isto devido á grande quantidade de pequenos cursos de água e lagoas interconectadas que requerem um estudo particular apropriado, fora do alcance deste trabalho.



Bacias no RS



Figura 8–Bacias Hidrográficas Principais no Estado do Rio Grande do Sul

4.2 Dados Utilizados

As informações de entrada requeridas para a aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH utilizadas consistem em dados de precipitação, dados climatológicos, dados referentes às características físicas e de cobertura da bacia hidrográfica, modelos numéricos do terreno representando a topografia, mapas de tipo e uso do solo. Também são utilizados dados de vazão, na calibração e no procedimento de assimilação de dados.

A seguir são citadas as fontes dos dados que foram usados:

- Modelo numérico do terreno, derivado da missão STRM (Shuttle Radar Topography Mission) do USGS/NASA SRTM data, com resolução de 90m, processado e corrigido por Jarvis et al. (2008). Note-se na Figura 9 que foram excluídas partes das bacias do Litoral Médio e da região litorânea do sistema São Gonçalo-Mangueira.
- Base de dados H-Integrada fornecida pela Agência Nacional de Águas a escala: 1:1.000.000, e base cartográfica do Rio Grande do Sul (Hasenack et. al., 2006) a escala: 1:250.000.
- Dados diários de precipitação de 385 postos pluviométricos localizados dentro e ao redor próximo do Estado, obtidos no sistema Hidroweb mantido pela Agência Nacional de Águas - ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), (Figura 9);
- Dados diários de vazão de 155 postos fluviométricos localizados nos rios e afluentes que conformam a hidrografia do Estado, obtidos no sistema Hidroweb mantido pela Agência Nacional de Águas - ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), (Figura 9);
- Dados das normais climatológicas mensais, publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, originários de 47 estações climatológicas localizados dentro e ao redor próximo do Estado, (Figura 9);
- Para composição das URH's, foram usados dados e tipo de solo do Projeto Radam Brasil, na escala 1:1.000.000, e dados de cobertura vegetal para a América do Sul obtidos via sensoriamento remoto, com resolução aproximada de 1km, desenvolvido por Eva et al. (2002);

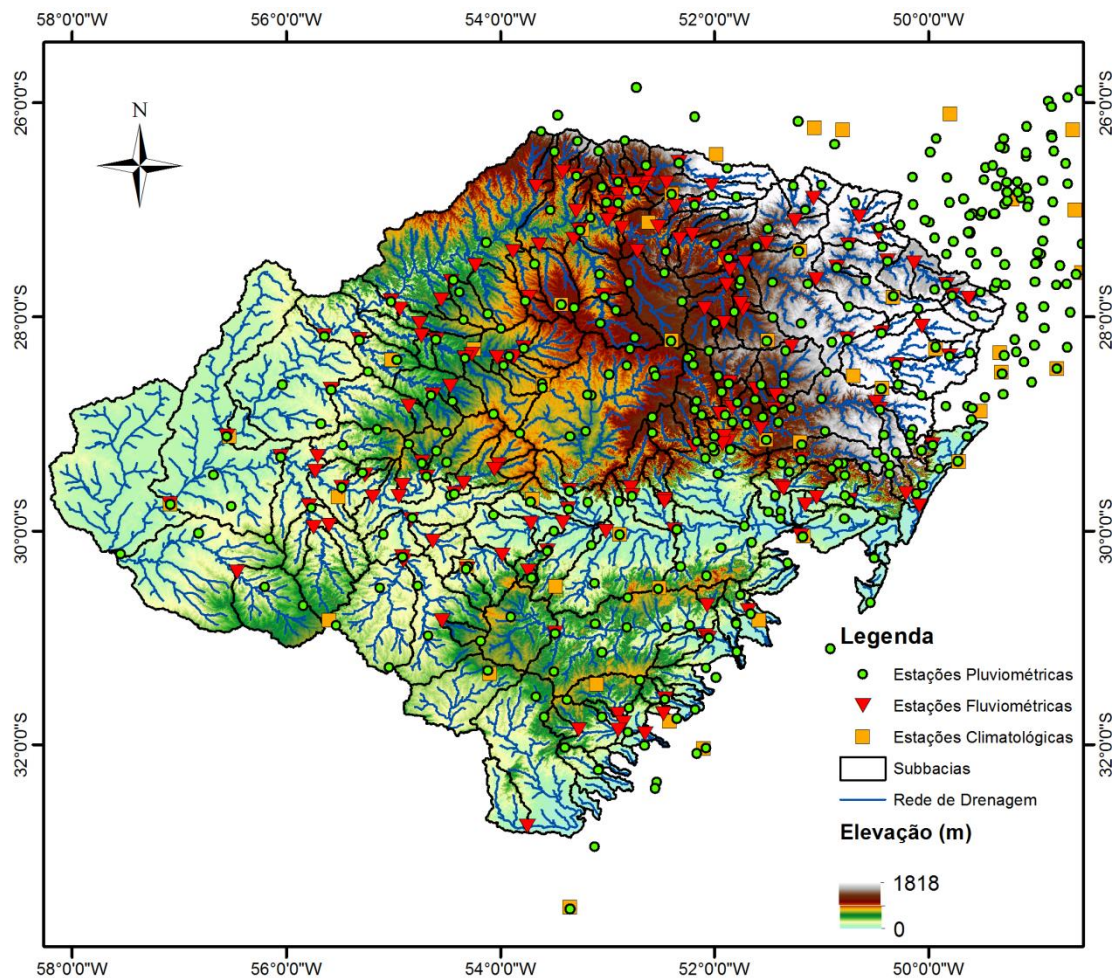


Figura 9– Localização das estações utilizadas e discretização em sub-bacias para o RS

Seguidamente são descritos os critérios de seleção e utilização dos dados, dentro da metodologia testada.

a) Seleção dos dados Pluviométricos.

Inicialmente partimos de um universo de 630 postos pluviométricos providos pela Agencia Nacional de Águas para a região do Estado do Rio Grande do Sul e parte do Estado de Santa Catarina na margem direita do rio Uruguai.

Primeiramente foi observada a disponibilidade espacial e temporal dos dados e conforme estes fatores foram selecionados 385 postos, a maioria deles coincidentes em disponibilidade de dados no período 1970 a 1990.

Na Figura 10 é apresentada a distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados.

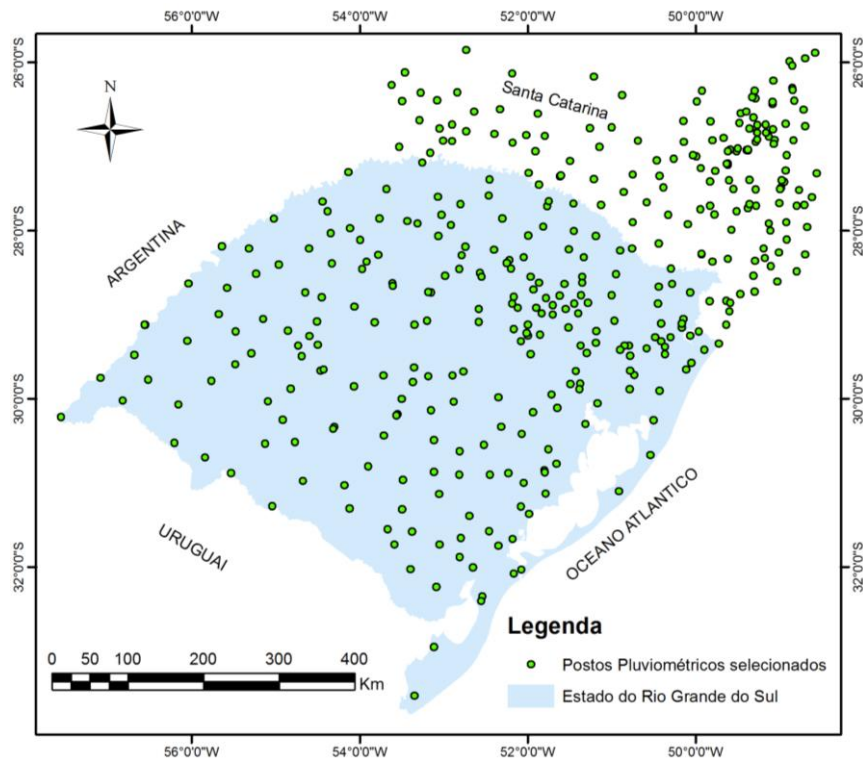


Figura 10– Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados

b) Seleção dos dados Climatológicos

Foram selecionadas 47 estações climatológicas localizadas dentro e ao redor próximo do

Estado Figura 11

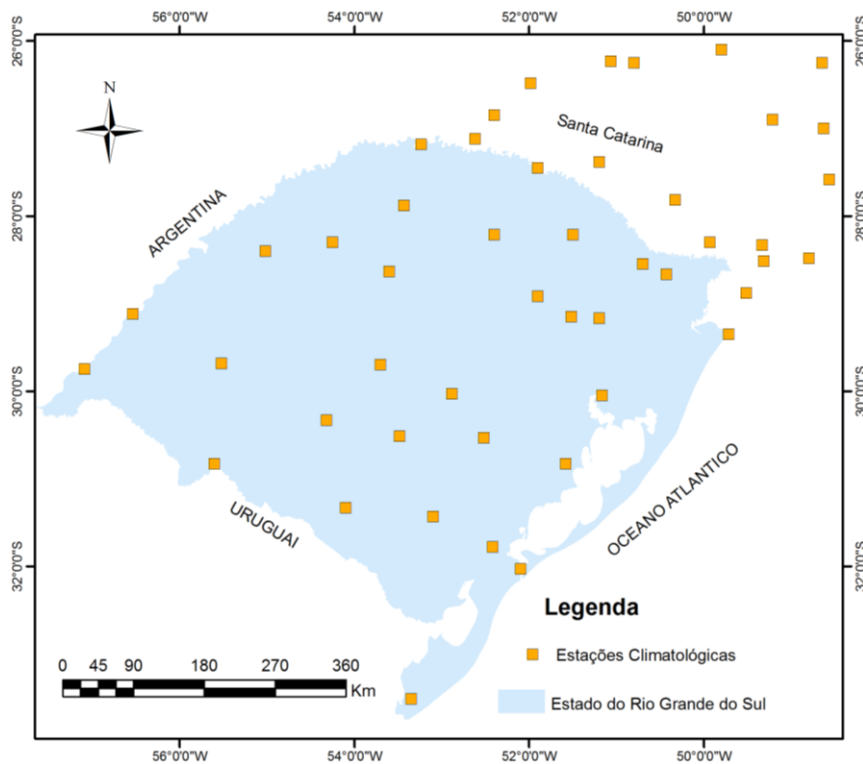


Figura 11– Distribuição espacial dos postos climatológicos selecionados

c) Seleção dos dados Fluviométricos

Com 300 postos fluviométricos inicialmente, foi realizada a seleção levando em consideração os seguintes fatores: a maior coincidência em disponibilidade temporal de dados com os postos pluviométricos escolhidos anteriormente, uma boa representatividade dos rios da região, foram descartados postos com erros nas coordenadas de localização ou de séries de dados muito curtas (menor a três anos de dados).

Foram escolhidos então 155 postos apresentados na Figura 12 dos quais alguns são utilizados para a calibração do modelo, para assimilação de dados e outros são utilizados como locais de avaliação da metodologia de assimilação de dados também chamados neste trabalho de Locais Pseudo Não Monitorados (LPNM).

d) Edição da rede unifilar h-Integrada

- A base de dados H-Integrada fornecida pela Agência Nacional de Águas a escala: 1:1.000.000, foi editada manualmente com ajuda da base cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul (Hasenack et. al., 2006) a escala: 1:250.000. Isto para dar melhor definição aos rios onde a H-integrada era insuficiente e também para melhorar o traçado dos rios nas regiões muito planas. Este procedimento é conhecido como “Stream-Burning”, porque a rede de drenagem conhecida é marcada propositalmente sobre o MDE forçando a definição da drenagem em aqueles locais em etapas posteriores da discretização da bacia (Hellweger e Maidment, 1997). Na Figura 12 é apresentada a rede unifilar editada para realizar o procedimento de “Stream-Burning”. Note-se que foram excluídas partes das bacias do Litoral Médio e da região litorânea do sistema São Gonçalo-Mangueira.

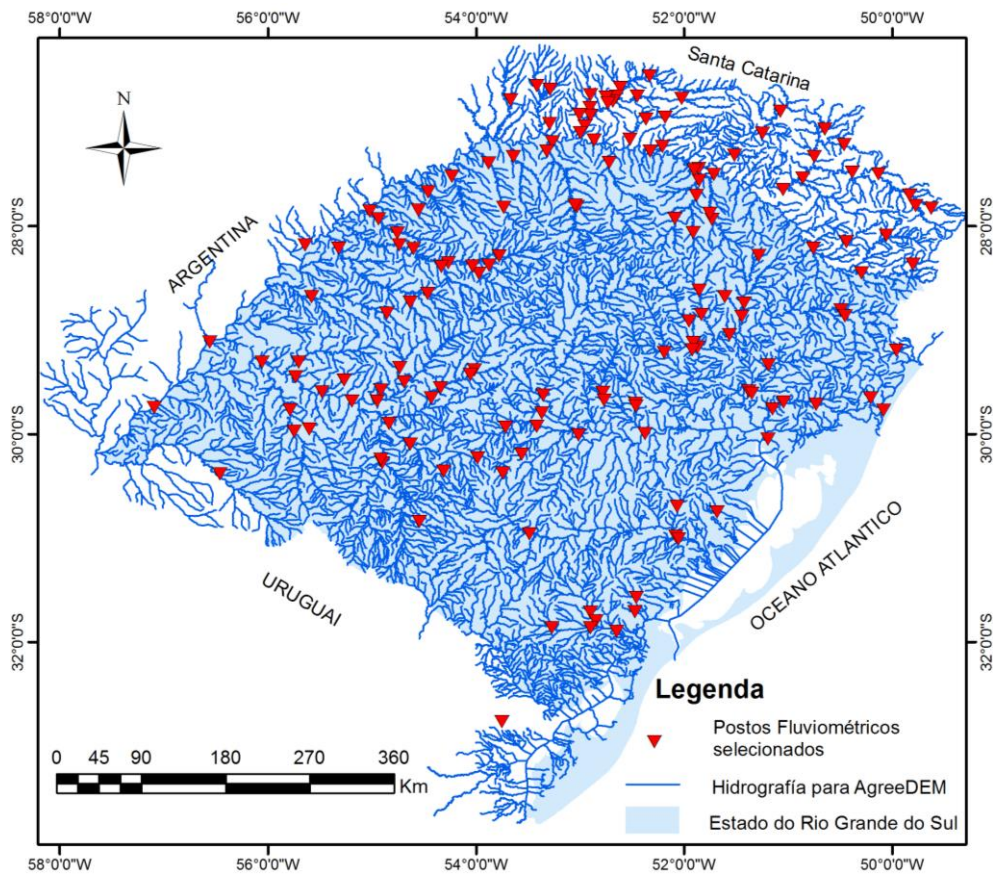


Figura 12– Distribuição espacial dos postos fluviométricos selecionados e Rede Unifilar H-Integrada editada e melhorada com a hidrografia da base cartográfica de Hasenack et. al. (2006).

e) Composição das Unidades de Resposta Hidrológica URH

Para a composição das URH's posteriormente utilizadas como entrada no MGB, foram utilizadas as imagens de tipo de solo do Projeto Radam Brasil e dados de cobertura vegetal para a América do Sul de Eva et al. (2002) como citado anteriormente.

O resultado da combinação das duas imagens Figura 13 deu como resultado 7 (sete) tipos de URH's que são

- 1- Floresta em Solos Rasos (FSR)
- 2- Florestas em Solos Profundos (FSP)
- 3- Campos em Solos Rasos (CDR)
- 4- Campo em Solos Profundos (CSP)
- 5- Agricultura em Solos Rasos (ASR)
- 6- Agricultura em Solos Profundos (ASP)
- 7- Água

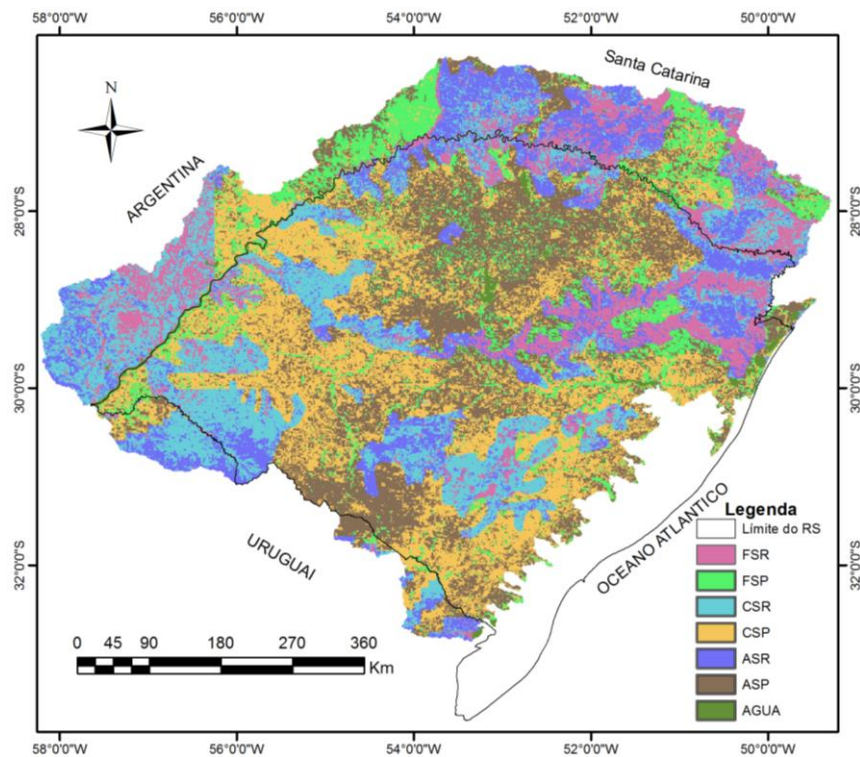


Figura 13—URH's para a Região de Estudo

4.3 Aplicação da Sequencia do Teste de Avaliação

Desejamos avaliar se existe ou não uma diminuição nas magnitudes dos erros relativos médios nas vazões calculadas em locais sem dados através do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH com Assimilação de Dados. Para tal fim, foi aplicada a sequência metodológica mencionada no item 8 e explicada em cada item seguinte:

Seleção dos Locais para Calibração e dos Locais Pseudo-Não-Monitorados.

Primeiramente foram selecionados postos fluviométricos dentro das bacias localizadas parcial e totalmente dentro do Rio Grande do Sul de tal forma a obter o maior período de dados disponíveis coincidente na maior quantidade de postos entre outras características já explicadas no item c) do apartado 4.2. Sendo assim 155 o número de postos selecionados inicialmente.

Para o caso da classificação dos mesmos visando a sua posterior utilização na calibração do modelo, na aplicação da assimilação de dados e na avaliação do método de assimilação; é assumido o pressuposto de que normalmente as bacias tem pelo menos um posto de monitoramento fluviométrico localizado perto da foz do rio principal ou exutório da bacia. Isto quer dizer que consideramos que, tipicamente, os Locais Não Monitorados costumam estar a montante dos postos fluviométricos, nas cabeceiras dos

rios. Partindo destas hipóteses foram escolhidos para ser utilizados na calibração e assimilação de dados, os postos mais próximos aos exutórios das bacias que possuíam a montante deles outros postos que seriam considerados como Locais Pseudo Não monitorados LPNM ou seja locais onde temos postos com dados para realizar as avaliações porém eles não são utilizados nem na calibração nem para assimilação de dados. Tendo sobre estes LPNM o efeito direto da atualização ou assimilação de dados de um único posto aguas abaixo deles evitando assim efeitos cumulativos ou sobrepostos de assimilação de dados na mesma sub-bacia na hora da quantificação do erro.

Dessa forma o método só foi avaliado em aqueles locais dos trechos de rio cujas sub-bacias incrementais se encontram a montante dos locais monitorados e cujos dados foram utilizados para assimilação. Utilizando os critérios mencionados anteriormente, na Figura 14 é apresentada a distribuição espacial de 30 postos (Primeiro Grupo) selecionados para calibração e assimilação (cor laranja) e 77 postos (Segundo Grupo) localizados a montante deles (cor verde), onde o método é avaliado e que são chamados de LPNM. Seguidamente na Figura 15.

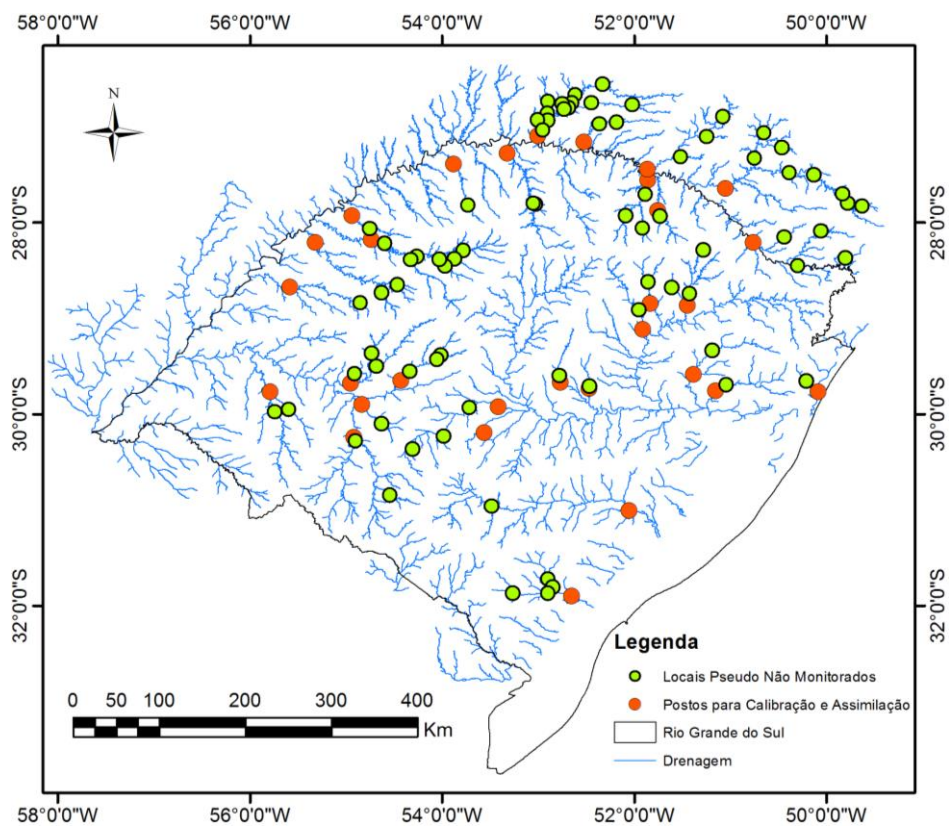


Figura 14– Locais de Calibração e LPNM

Figura 16, Tabela 1 e Tabela 2 são apresentados com maior detalhe estes mesmos Postos.

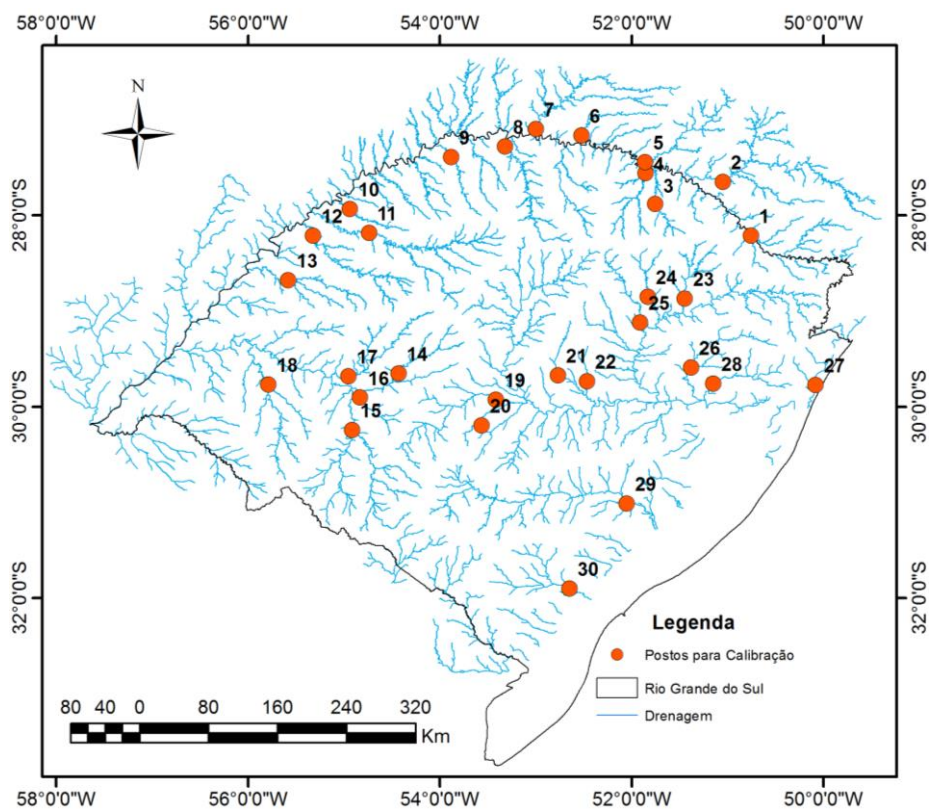


Figura 15– Locais de Calibração

Tabela 1 – Detalhe dos locais escolhidos para a calibração

N° na Figura	Código	Posto	Río	Área (km ²)
1	70700000	Passo Socorro	Rio Pelotas	8440
2	71800000	Colônia Santana	Rio Canoas	13200
3	72430000	Passo do Granzotto	Rio Forquilha ou Inhanduva	1620
4	72680000	Passo Colombelli	Rio Apue ou Ligeiro	3660
5	72980000	Rio Uruguai	Rio do Peixe	5170
6	73350000	Barca Irani	Rio Irani	1500
7	73970000	Barra do Chapecó	Rio Chapecó	8300
8	74270000	Passo Rio da Várzea	Rio da Várzea	5340
9	74470000	Três Passos	Rio Turvo	1540
10	74900000	Linha União	Rio Comandai	1260
11	75320000	Ponte Mística	Rio Ijuí	9450
12	75500000	Passo do Sarmiento	Rio Piratinim	5230
13	75700000	Passo do Novo	Rio Icamagua	3710
14	76120000	Ponte Toropi	Rio Toropi	3050
15	76310000	Rosário do Sul	Rio Santa Maria	12100
16	76380000	Cacequi	Rio Cacequi	1810
17	76490000	Passo do Loreto	Rio Jaguarí	4600
18	76750000	Alegrete	Rio Ibirapuitã	5940
19	85600000	Passo das Tunas	Rio Vacacaí	6780

Tabela 1: continuação

N° na Figura	Código	Posto	Rio	Área (km ²)
20	85623000	São Sepé - Montante	Rio São Sepé	690
21	85740000	Candelária	Rio Pardo	1370
22	85850000	Santa Cruz	Rio Pardinho	909
23	86440000	Passo do Prata	Rio Prata	3600
24	86500000	Passo Carreiro	Rio Carreiro	1820
25	86580000	Santa Lúcia	Rio Guaporé	2470
26	87170000	Barca do Caí	Rio Caí	3030
27	87317060	Barra do João Pedro - Montante	Rio João Pedro	1720
28	87382000	São Leopoldo	Rio dos Sinos	3130
29	87905000	Passo do Mendonça	Rio Camaquã	15600
30	88680000	Passo do Ricardo	Rio Piratini	5410

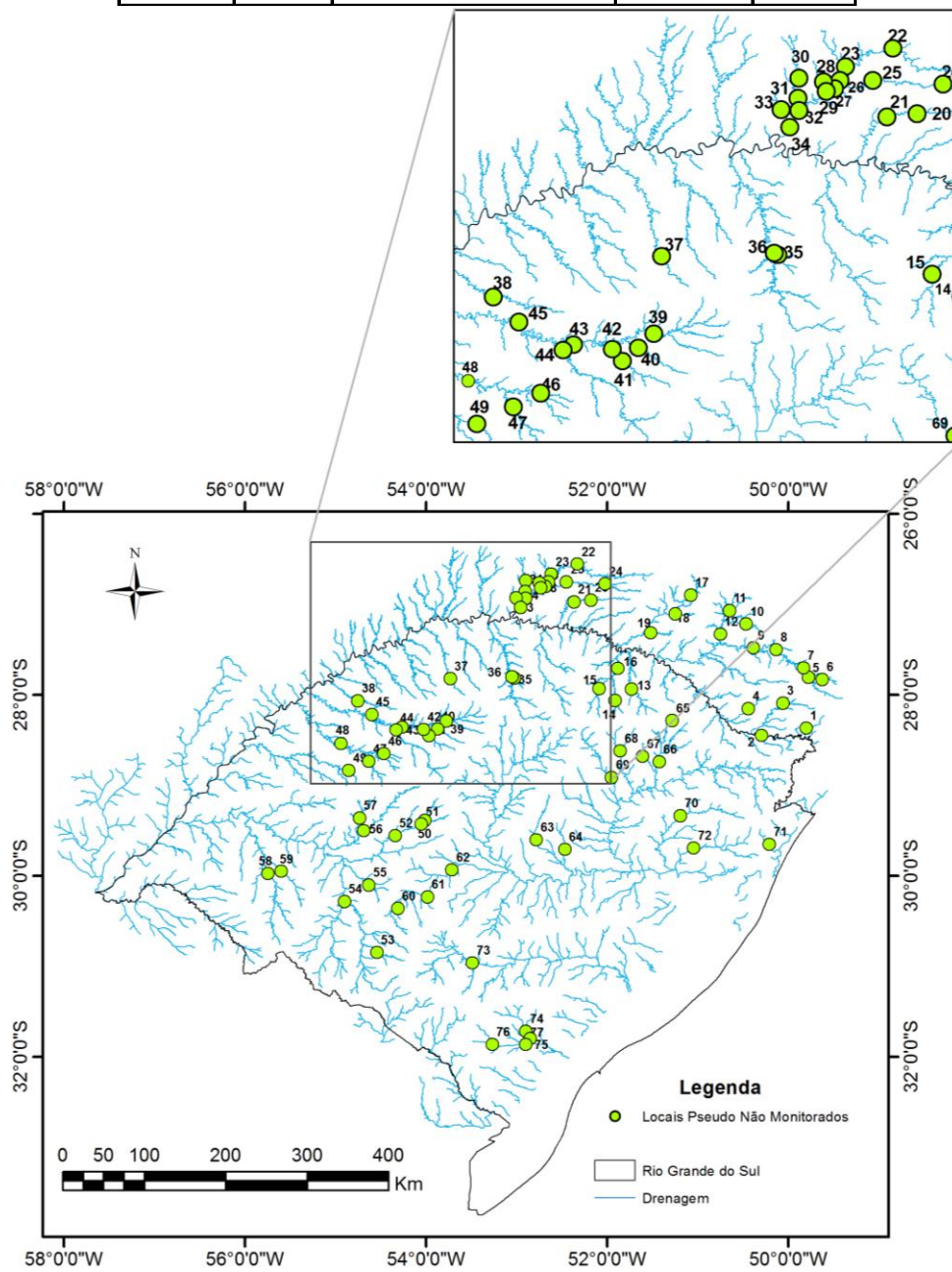


Figura 16– Locais Pseudo-Não Monitorados

Tabela 2 – Detalhe dos locais escolhidos como LPNM

Nº na Figura	Código	Posto	Río	Área (km2)
1	70100000	Despraiado	Rio Pelotas	528
2	70200000	Invernada Velha	Rio Pelotas	2841
3	70300000	Fazenda Mineira	Rio Lava Tudo	1119
4	70500000	Coxilha Rica	Rio Pelotinhas	550
5	71200000	Vila Canoas	Rio Canoas	989
6	71250000	Ponte do Rio João Paulo	Rio João Paulo	512
7	71300000	Rio Bonito	Rio Canoas	1984
8	71350000	Encruzilhada	Rio Canoas	3230
9	71383000	Ponte Alta Do Sul	Rio Canoas	4631
10	71490000	Ponte Marombas	Rio das Marombas	354
11	71496000	Ponte do Rio Correntes	Rio Correntes	539
12	71498000	Passo Marombas	Rio das Marombas	3654
13	72400000	Passo São Geraldo	Rio Forquilha ou Inhanduva	1470
14	72530000	Passo do Ligeiro	Rio Apue ou Ligeiro	460
15	72580000	Ponte do Rio Tapejara	Rio Tapejara	1080
16	72630000	Passo Santa Tereza	Rio Apue ou Ligeiro	2775
17	72715000	Rio das Antas	Rio do Peixe	791
18	72810000	Tangara	Rio do Peixe	1995
19	72870000	Barra do Rio Pardo	Rio Leão	414
20	73300000	Bonito	Rio Irani	630
21	73330000	Passo Alto Irani	Rio Irani	900
22	73600000	Abelardo Luz	Rio Chapecó	1850
23	73610000	Ponte Saudades	Rio Saudades	691
24	73690001	Coronel Passos Maia	Rio Chapecozinho	740
25	73705000	Chapecozinho - Jusante	Rio Chapecozinho	1430
26	73730000	Porto Elvino	Rio Chapecó	3550
27	73750000	Porto Fae	Rio Chapecó	5330
28	73765000	Passo Quilombo	Rio do Ouro	282
29	73770000	Porto Fae Novo	Rio Chapecó	5880
30	73780000	Jardinópolis	Rio Três Voltas	626
31	73820000	Passo Pio X	Rio Burro Branco	992
32	73850000	Passo Nova Erechim	Rio Chapecó	7550
33	73900000	Saudades	Rio Saudades	418
34	73960000	Barra do Chapecó Aux.	Rio Chapecó	8267
35	74205000	Linha Cescon	Arroio Caturete	454
36	74210000	Potreiro Bonito	Rio da Várzea	2560
37	74460000	Ponte do Rio Turvo	Rio Turvo	505
38	74880000	Passo São João	Rio Comandai	816
39	75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	2003
40	75185000	Ponte Nova do Potiribu	Rio Potiribu	609
41	75200000	Conceição	Rio Conceição	805
42	75205000	Ponte Nova do Conceição	Rio Conceição	966
43	75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	5414
44	75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	2131
45	75300000	Passo Viola	Rio Ijuí	8910
46	75400000	Passo do Dias	Rio Piratinim	936
47	75430000	Passo Major Zeferino	Arroio Inhacapetum	871
48	75450000	Passo Santa Maria	Rio Piratinim	3277
49	75600000	Passo das Turmas	Rio Icamaqua	388
50	76077000	Usina Quebra Dente	Rio Toropi	864
51	76085000	Cachoeira 5 Veados	Rio Toropi	1635
52	76100000	Vila Clara	Rio Toropi	2783
53	76260000	Passo do Guterres	Arroio Taquarembó	576
54	76300000	Ponte Ibicui da Armada	Rio Ibicui da Armada	6005
55	76360001	Azevedo Sodré	Rio Cacequi	1230

Tabela 2– Continuação

Nº na Figura	Código	Posto	Rio	Área (km ²)
56	76440000	Jaguari	Rio Jaguarí	2296
57	76460000	Ernesto Alves	Rio Jaquarizinho	933
58	76700000	Passo dos Britos	Rio Ibirapuitã	3200
59	76742000	Passo do Osório	Arroio Cavera	1163
60	85470000	Ponte São Gabriel	Rio Vacacaí	973
61	85480000	Passo do Rocha	Rio Vacacaí	2968
62	85580000	Passo do Verde	Rio Vacacaí	5340
63	85730000	Passo Linha Do Rio	Rio Pardo	1220
64	85830000	Santa Cruz- Montante	Rio Pardinho	784
65	86340000	Ponte Santa Rita	Rio Santa Rita	317
66	86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio Turvo	2839
67	86420000	Ponte do Prata	Rio Prata	319
68	86480000	Passo Migliavaca	Rio Carreiro	1250
69	86560000	Linha Colombo	Rio Guaporé	1980
70	87160000	Nova Palmira	Rio Caí	2017
71	87317030	Maquiné	Rio Maquiné	444
72	87380000	Campo Bom	Rio Dos Sinos	2864
73	87590000	Passo do Caçõo	Rio Camaquã	4080
74	88550000	Ponte do Império	Rio Piratini	1870
75	88560001	Picada Nova	Rio Piratini	2240
76	88575000	Cerro Chato	Arroio Basílio	1043
77	88600001	Contrato	Arroio Basílio	2380

Calibração do modelo MGB-IPH na Região do Estado do Rio Grande do Sul.

A Região do estado de Rio Grande do Sul foi discretizada em 2340 minibacias com áreas a partir de 100 Km² aproximadamente, agrupadas em 198 sub-bacias de acordo com os postos fluviométricos com dados apresentados na Figura 12 e os exutórios das bacias na região de estudo. Na Figura 17 se observa a discretização em minibacias. Note-se que foram excluídas partes das bacias do Litoral Médio e da região litorânea do sistema São Gonçalo-Mangueira. O limiar de área 100km² que originou esse numero de minibacias foi escolhido visando uma boa representação dos rios mais importantes e seus principais afluentes na região de estudo. Foram testados outros valores de área mínima, porém áreas de valores maiores a 100km² excluía na discretização trechos de rios importantes dentro do Estado e áreas menores resultavam em uma discretização com muito detalhe o que aumentava a exigência de esforço computacional.

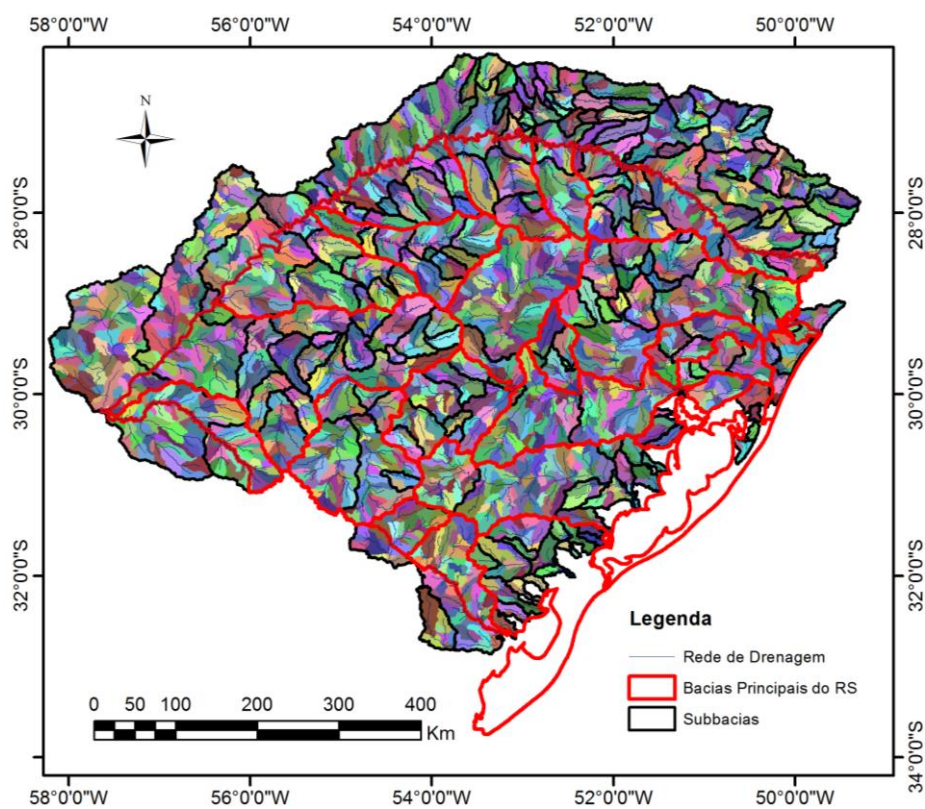


Figura 17—Discretização do estado do RS em minibacias

Para o caso das URH's, foram obtidas sete Unidades de Resposta, produto da composição entre tipos e usos do solo como já apresentado na Figura 13.

Nas simulações realizadas neste trabalho, foram desconsideradas possíveis alterações nas vazões produzidas por captações de água e empreendimentos hidrelétricos.

Na calibração do modelo MGB-IPH, procedeu-se a obter vários conjuntos de parâmetros que sejam cada um em media representativos de toda a região e que reproduzam valores coerentes de vazão procurando ter diferentes configurações dos mesmos, mas reproduzindo com eles um intervalo de valores de vazões que logo vão ser corrigidos ou atualizados a través da metodologia proposta, para finalmente avaliar se existe ou não um ganho da aplicação do método ou diminuição do erro associado em média.

Com esta finalidade foi utilizada a técnica de calibração automática multi-objetivo do modelo MGB-IPH.

Como já foi explicado anteriormente o MGB-IPH utiliza na sua calibração automática a técnica proposta por Yapo et al. (1998), a partir da qual é realizada a “hierarquização de Pareto” em que conjuntos de parâmetros ótimos são selecionados e

classificados pelo algoritmo segundo um ranking de melhores valores das funções objetivo. Estas funções objetivo dadas pelas equações 16, 17 e 18 foram calculadas dentro da calibração multi-objetivo num processo iterativo para os 30 locais com dados fluviométricos apresentados na Figura 15 y Tabela 1

$$F1 = 1 - \sum_{i=1}^{30} x_i \cdot R2_i$$

Equação 16

$$F2 = 1 - \sum_{i=1}^{30} x_i \cdot Rlog_i$$

Equação 17

$$F3 = \sum_{i=1}^{30} x_i \cdot |\Delta V_i|$$

Equação 18

Onde F1, F2 e F3 são as funções objetivo;

x_i é um ponderador aplicado a cada um dos postos fluviométricos sendo no nosso caso atribuído o mesmo peso aos 30 postos;

$R2_i$ é o coeficiente de Nash Sutcliffe das vazões para o posto i ;

$Rlog_i$ é o coeficiente de Nash Sutcliffe dos logaritmos das vazões para o posto i ; e,

ΔV_i é o erro de volumes para o posto i .

A calibração foi realizada utilizando os dados do período de 1970 a 1990 e foi atribuído o mesmo peso aos 30 postos na hora da ponderação na calibração, de tal forma que cada conjunto de parâmetro resultante seja um conjunto de valores médios representativos e apropriados para toda a região, sem priorizar ou dar preferência a nenhum posto específico.

A faixa em que foi permitido ao algoritmo variar os valores dos parâmetros no procedimento de calibração é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixa de valores em que se permitiu a variação dos parâmetros durante a calibração

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
b	0,015	0,2
Kint	1,5	9
Kbas	0,09	0,8
Cs	1	20
Ci	50	200
Wm URH 1	30	90
Wm URH 2	110	360
Wm URH 3	30	90
Wm URH 4	110	360
Wm URH 5	30	90
Wm URH 6	110	360

Logo de obter os melhores valores de parâmetros, ou seja, aqueles que originavam os melhores valores das funções objetivo (pontos da região de Pareto), foram selecionados 10 conjuntos de parâmetros que posteriormente seriam utilizados nas simulações Com e Sem assimilação de dados para a quantificação dos erros. Estes 10 conjuntos são:

- Conjunto de Parâmetros que originou melhor coeficiente Nash-Sutcliffe,
- Conjunto de Parâmetros que originou melhor coeficiente Nash-Sutcliffe dos Logaritmos
- Conjunto de Parâmetros que originou menor Erro de Volume
- Sete Conjuntos de Parâmetros escolhidos aleatoriamente e cujas funções objetivo originaram pontos que se encontravam na região de Pareto logo da calibração automática.

A Figura 18 apresenta os valores das funções objetivo F2 e F3 na região de Pareto (azul) e ressaltados em cores aqueles valores cujos conjuntos de parâmetros foram selecionados.

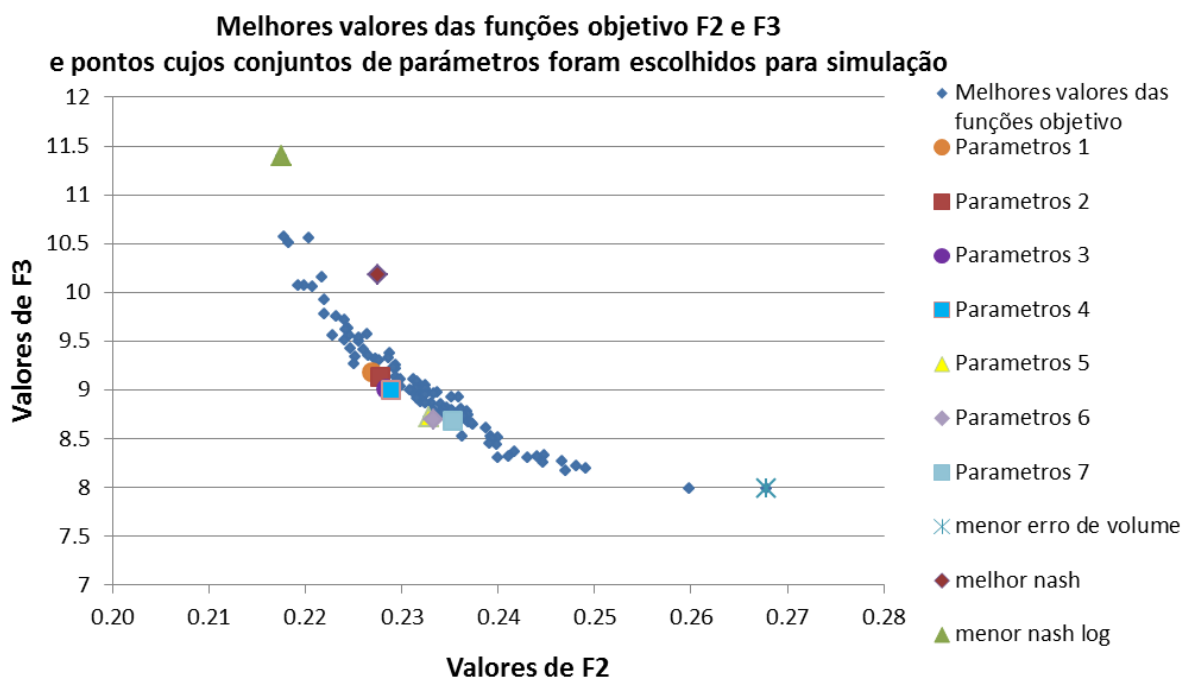


Figura 18–Pontos que refletem melhores valores de Nash Log e Erro de Volume

Os resultados da calibração para alguns locais (Figura 19) e para alguns conjuntos de parâmetros são apresentados na Tabela 4. Na Figura 20 à Figura 27 se encontram as comparações entre as vazões observadas e calculadas durante a calibração para os mesmos locais da Tabela 4.

No **Anexo B** encontram-se os valores dos dez conjuntos de parâmetros utilizados que resultaram da calibração e no **Anexo C** são apresentados hidrogramas correspondentes aos 30 postos utilizados na calibração, porém apenas para o conjunto de parâmetros que originou o menor erro de volume na calibração.

Tabela 4 – Alguns Resultados da calibração na região do RS

Rio	Codigo Posto ANA	Nome	Calibração			Conjunto de parametros
			NS	Nlog	$\Delta V(\%)$	
Forquilha	72430000	Passo do Granzotto	0.87	0.89	-0.70	Melhor Nash
Apue	72680000	Passo Colombelli	0.77	0.89	-7.8	Melhor NashLog
Da Várzea	74270000	Passo Rio da Várzea	0.72	0.88	-8.9	Menor $\Delta V(\%)$
Ijuí	75320000	Ponte Mistica	0.84	0.86	-13.30	Conjunto 1 Pareto
Piratinim	75500000	Passo do Sarmento	0.75	0.88	-7.20	Conjunto 3 Pareto
Sta. María	76310000	Rosario do Sul	0.75	0.79	-6.20	Conjunto 3 Pareto
Vacacaí	85600000	Passo das Tunas	0.56	0.74	7.60	Melhor NashLog
Piratini	88680000	Passo do Ricardo	0.73	0.82	1.30	Conjunto5 Pareto

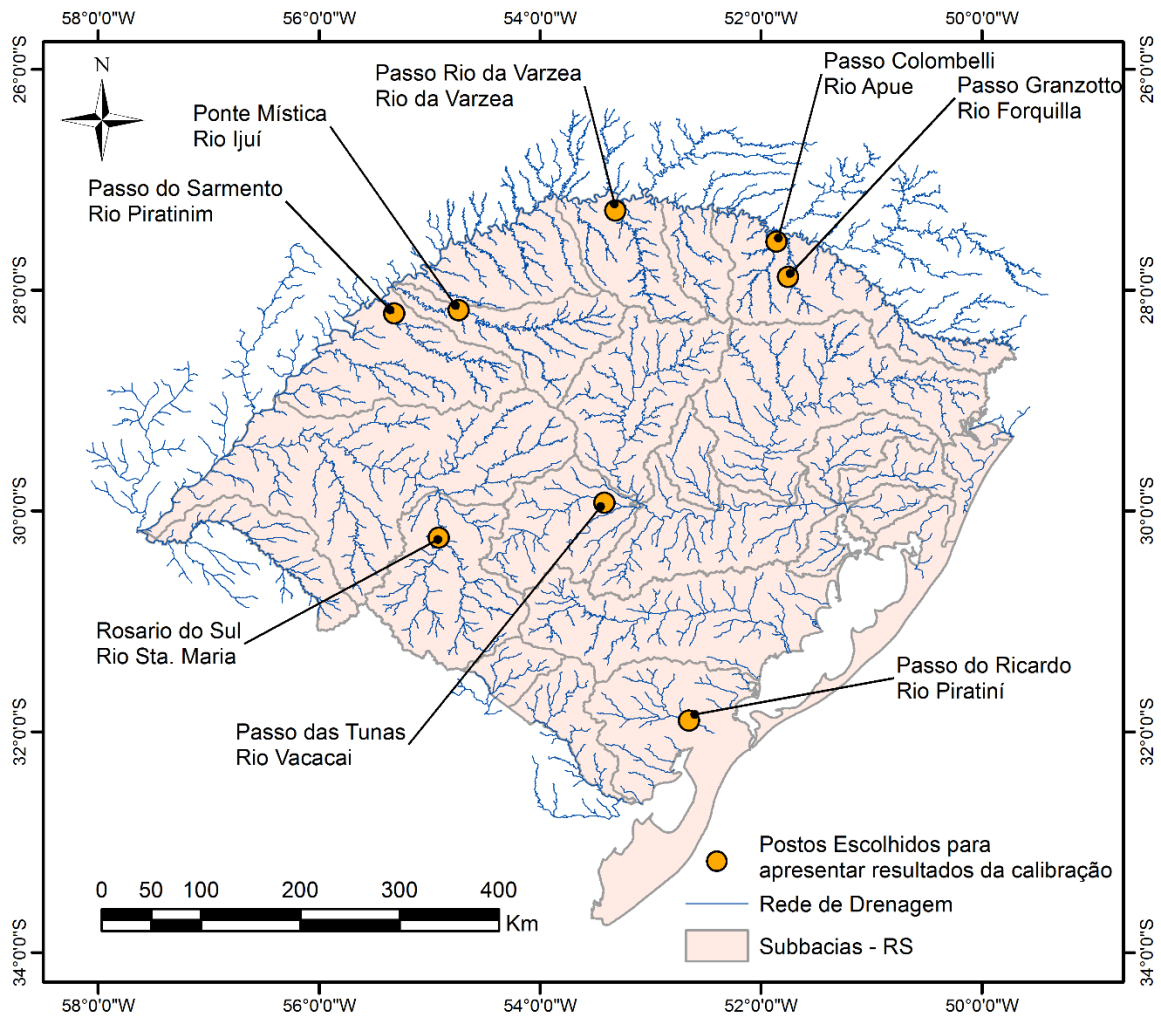


Figura 19– Alguns locais onde são apresentados resultados para alguns conjuntos de parâmetros

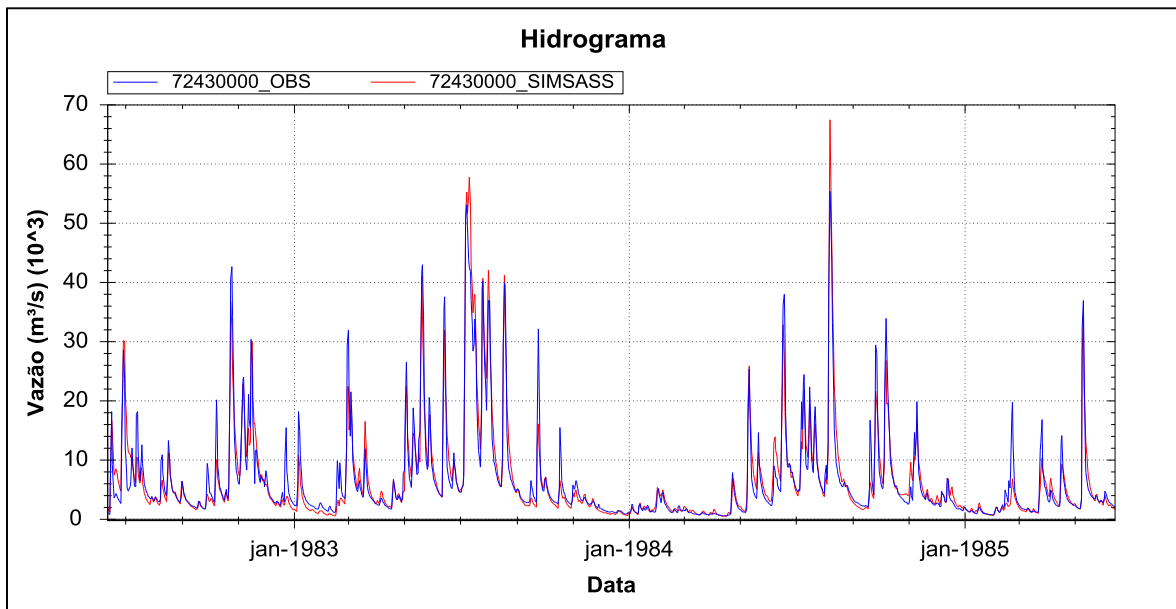


Figura 20– Vazões observadas e simuladas no posto fluviométrico Passo do Granzotto no rio Forquilha utilizando na simulação o conjunto de parâmetros com o melhor coeficiente de Nash Sutcliffe

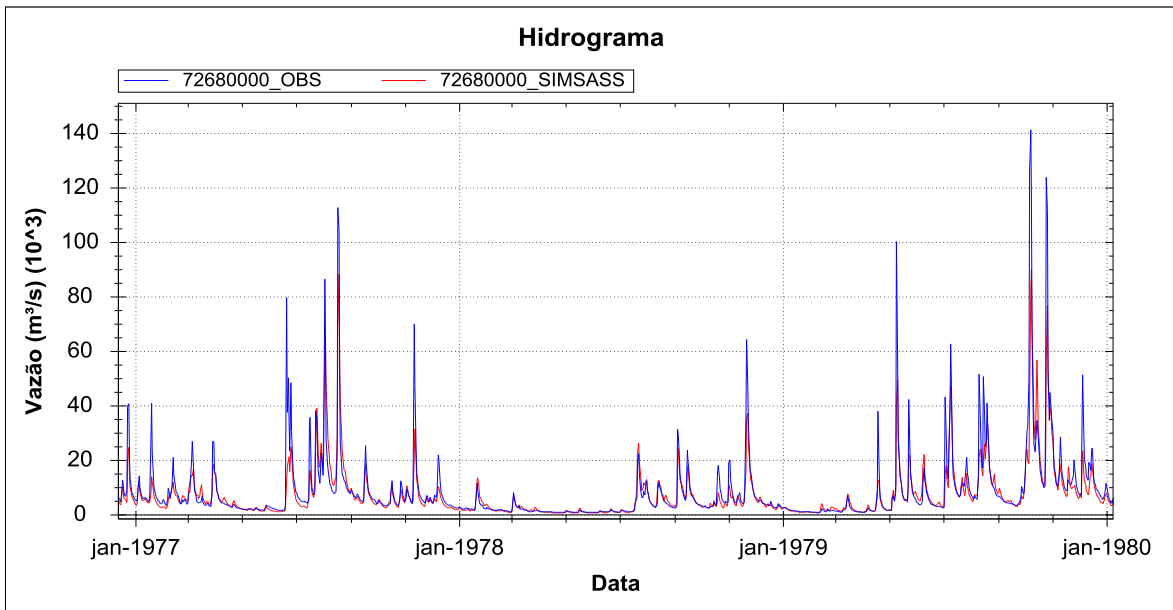


Figura 21– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo Colombelli no rio Apue utilizando na simulação o conjunto de parâmetros com o melhor coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos das Vazões.

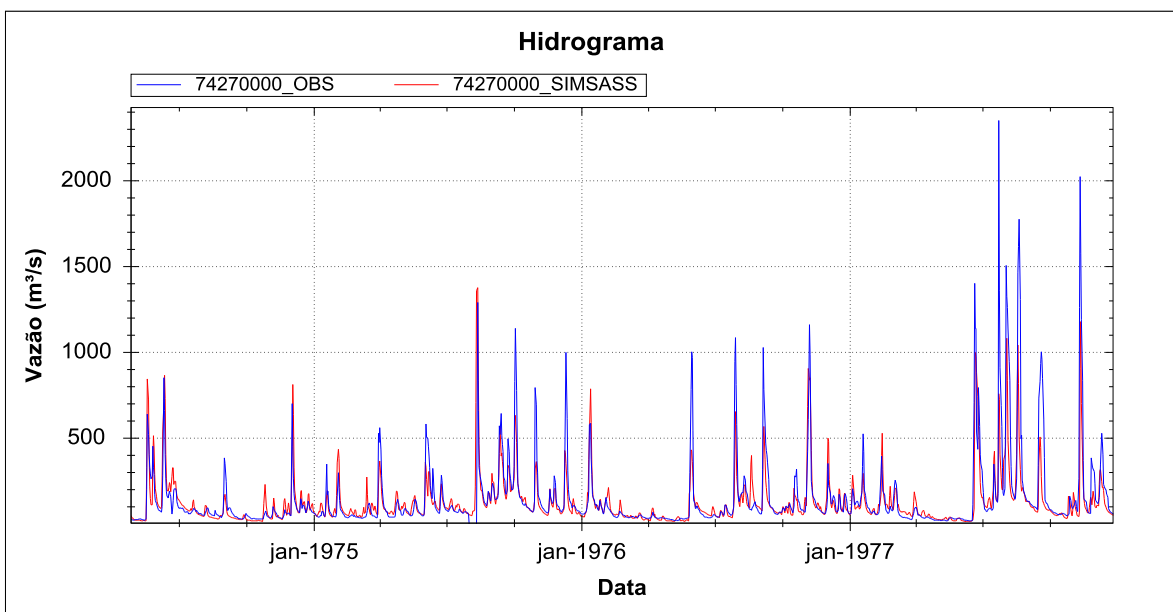


Figura 22– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo Rio da Várzea no rio da Várzea utilizando na simulação o conjunto de parâmetros com o menor erro de volume

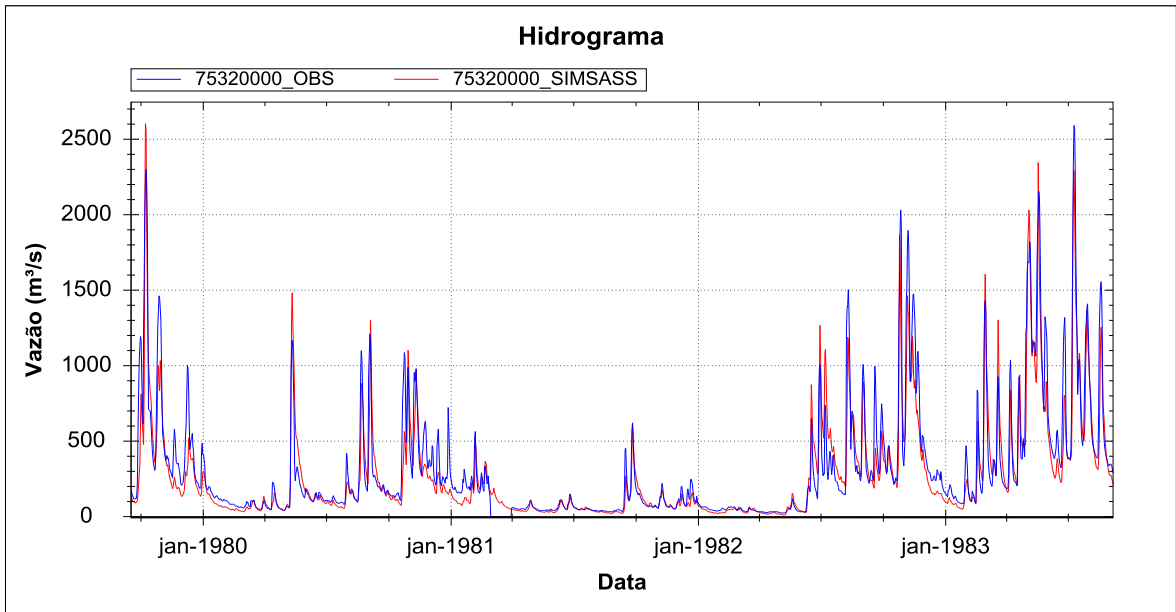


Figura 23– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Ponte Mística no rio Ijuí utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 1 selecionado aleatoriamente da região de Pareto

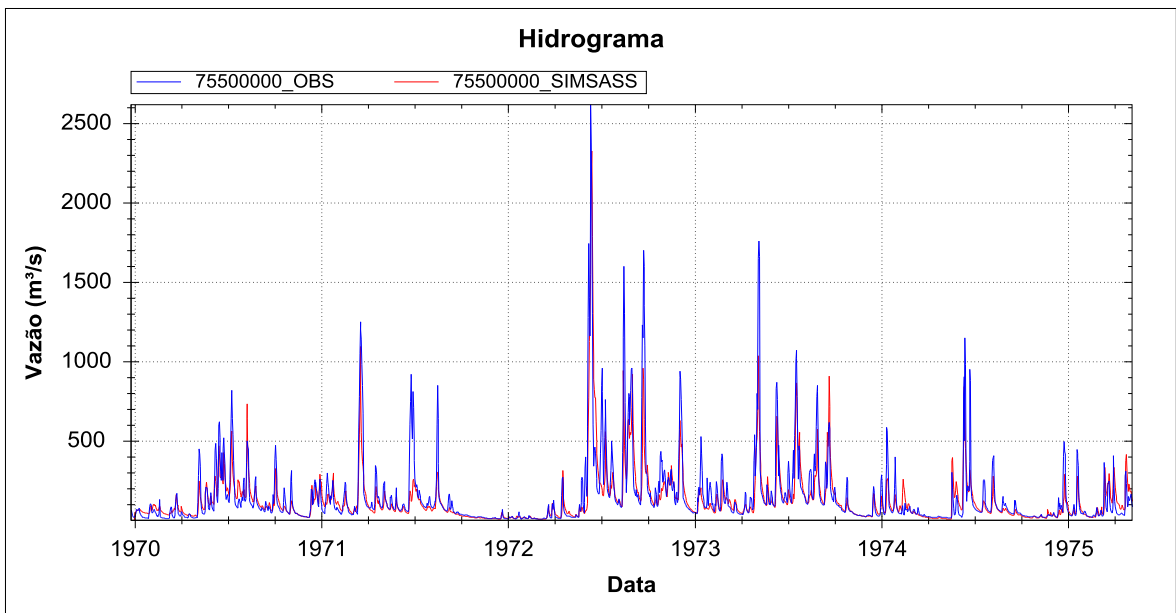


Figura 24– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo do Sarmento no rio Piratinim utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 3 selecionado aleatoriamente da região de Pareto

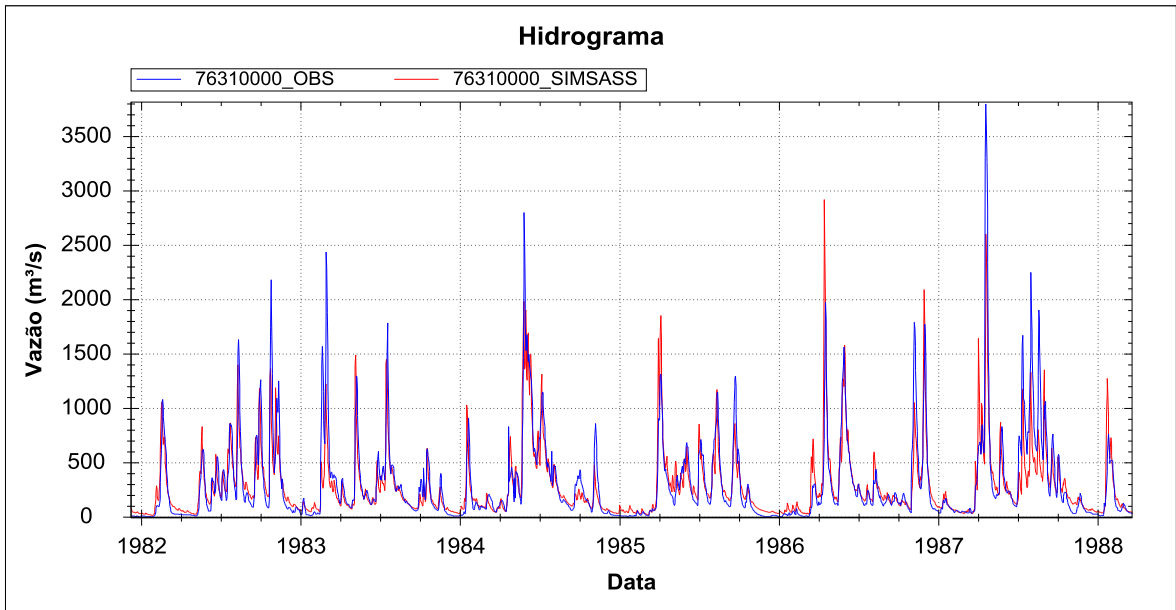


Figura 25– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Rosario do Sul no rio Santa Maria utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 3 selecionado aleatoriamente da região de Pareto

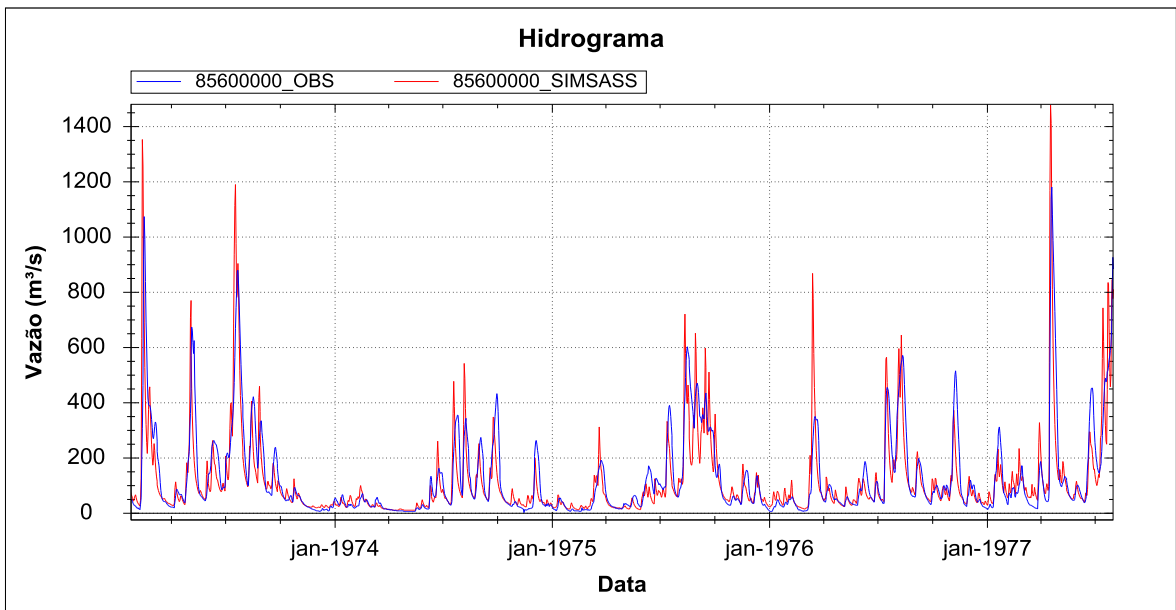


Figura 26– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo das Tunas no rio Vacacaí utilizando na simulação o melhor coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos das Vazões

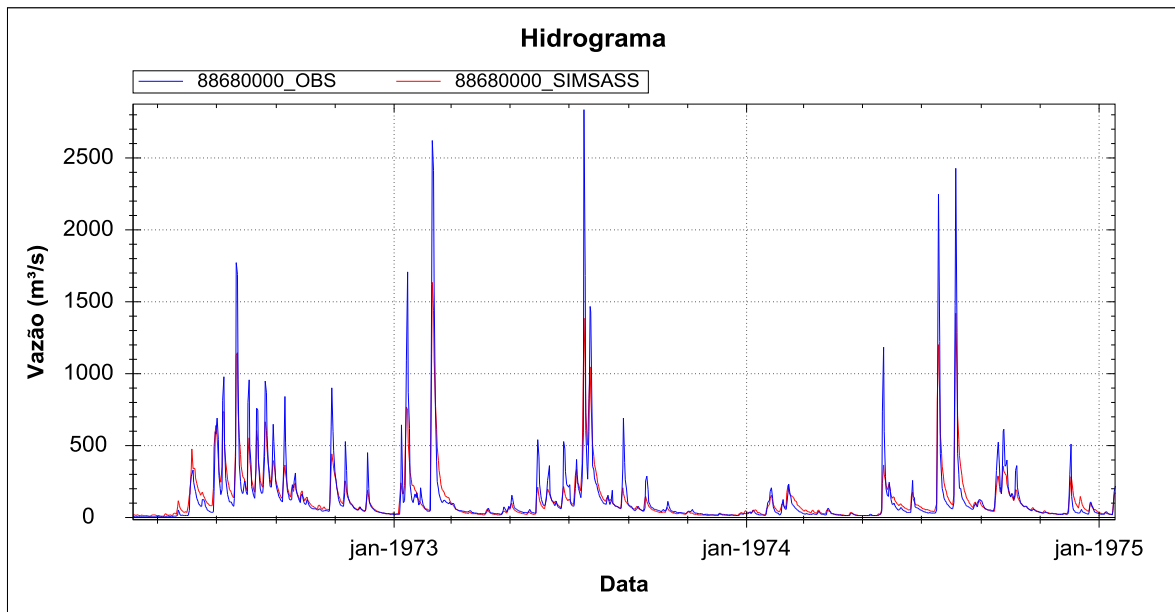


Figura 27– Vazões calculadas e observadas no local do posto fluviométrico Passo do Ricardo no rio Piratini utilizando na simulação o Conjunto de Parâmetros 5 selecionado aleatoriamente da região de Pareto

Simulação Sem Assimilação de Dados

Com os parâmetros obtidos a partir da calibração do modelo (Total 10 conjuntos) foram calculadas as series de vazões para o período 01/01/1970 a 31/12/1990 (mesmo período da calibração) nos 77 LPNM (Segundo Grupo) onde o método é avaliado (Figura 16), havendo feito 10 (dez) simulações, uma por cada conjunto de parâmetros escolhido. Isto aos efeitos de calcular posteriormente o erro relativo médio destas vazões calculadas com relação aos dados observados. Neste caso o modelo é utilizado no seu modo de simulação sem nenhum método de atualização ou assimilação acoplado.

Escolha da melhor configuração para a aplicação do Método de Assimilação de Dados no modelo MGB-IPH.

Previamente à Simulação Com Assimilação de dados, varias configurações do método de assimilação foram testadas principalmente fazendo variar os valores dos parâmetros de atualização na Equação 11 e Equação 12, optando finalmente pela configuração apresentada na Tabela 5, sugerida por Paz et. al. (2007), obtendo-se com esta os melhores resultados.

Com estes valores dos parâmetros, as correções foram feitas no rio e apenas para o reservatório conceitual do armazenamento subterrâneo observando-se assim melhoria nos resultados.

Tabela 5 – Configuração de parâmetros do método de atualização que apresentou melhores resultados

Parâmetros do método de assimilação		
<i>e_{bas}</i>	<i>b_x</i>	<i>P_{blm}</i>
0.2	0.2	0.1

Simulação Com Assimilação de Dados

Com os parâmetros do modelo obtidos na fase de calibração (dez conjuntos) e aqueles escolhidos dentro do método de atualização foram realizadas as simulações com assimilação de dados para o mesmo período 01/01/1970 a 31/12/1990.

Nesta etapa foram utilizados os dados daqueles 30 postos (Primeiro Grupo) apresentados na Figura 15 para corrigir ou atualizar as vazões nos 77 locais (Segundo Grupo) apresentados na Figura 16 chamados de Pseudo-Não-Monitorado LPNM.

Então, por exemplo, na Figura 28, deseja-se avaliar o efeito da assimilação nos locais diferenciados pela cor verde e numerados de 39 a 45 na bacia do rio Ijuí. Logo a assimilação é realizada em cada minibacia localizada dentro da sub-bacia colorida em amarelo, utilizando para a correção ou atualização respectivamente, os dados do posto 11 diferenciado pela cor laranja.

Da mesma forma na bacia do rio Comandai deseja-se avaliar o efeito da assimilação no local representado pela cor verde com numeração 38. Logo a assimilação é realizada utilizando dados do posto 10 representado pela cor laranja e cuja sub-bacia se encontra ressaltada na cor Rosa.

Como já foi exposto anteriormente nesta etapa estabeleceu-se uma configuração de assimilação em toda a região de estudo de tal forma que os postos escolhidos para serem utilizados na assimilação de dados foram aqueles mais próximos das confluências ou exutórios e que por sua vez tivessem águas acima ou a montante dos mesmos, outros postos que seriam considerados como LPNM.

Dessa forma o método só foi avaliado em aqueles locais dos trechos de rio cujas sub-bacias incrementais se encontram a montante dos locais monitorados, cujos dados foram utilizados para assimilação.

Assim cuidou-se de ter sobre os LPNM o efeito direto da atualização ou assimilação de dados de um posto localizado jusante deles evitando assim efeitos

cumulativos ou sobrepostos de assimilação de dados de mais de um posto na mesma sub-bacia.

Um total de dez simulações, com assimilação de dados foram realizadas, uma por cada conjunto de parâmetros escolhido utilizando em todas, a mesma configuração de assimilação. No **Anexo D** são apresentado os Hidrogramas resultantes do teste para o conjunto de parâmetros correspondente ao menor erro de volume na calibração do modelo.

Na Tabela 6 apresenta-se esquema de assimilação para todos os LPNM.

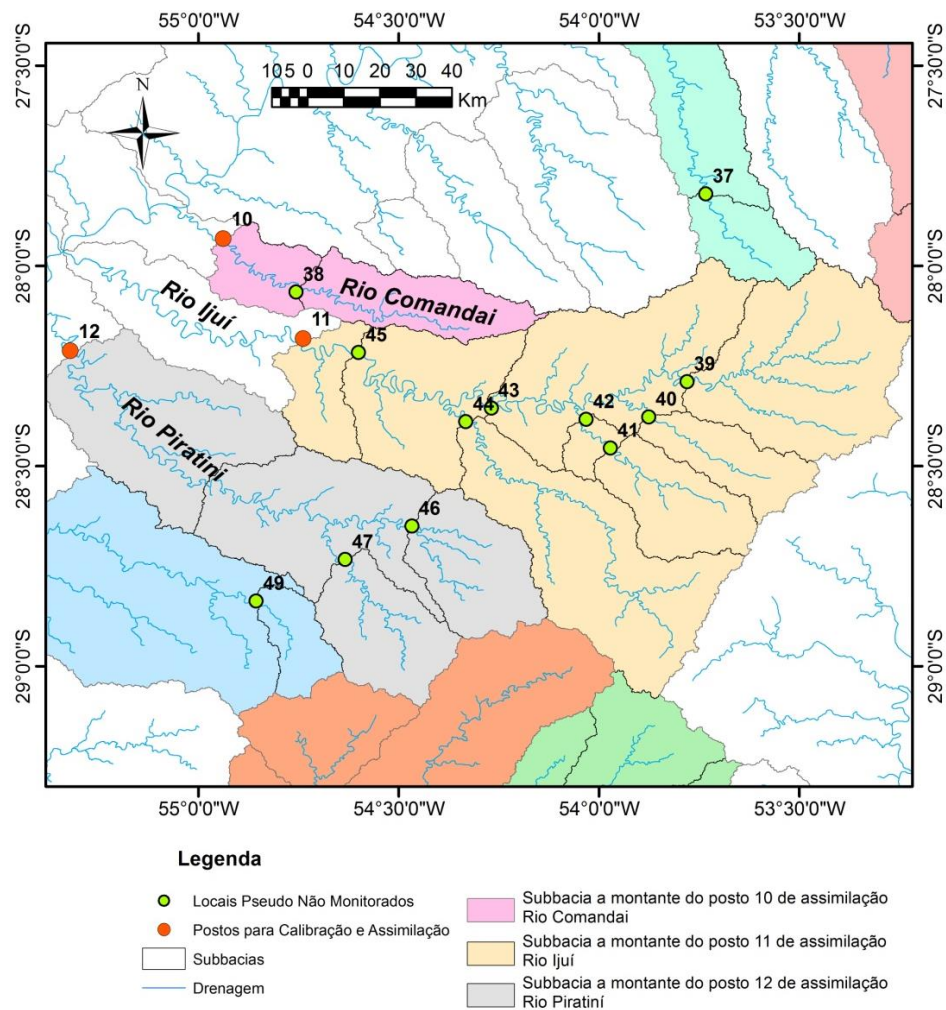


Figura 28– Mapa esquemático exemplo de assimilação de dados

Tabela 6 – Esquema de Assimilação para todos os LPNM

Configurações de Assimilação de dados para obter vazões nos LPNM:					
O posto de Assimilação 1(laranja) - 70700000 - Passo Socorro Rio Pelotas		O posto de Assimilação 2(laranja) - 71800000 - Colônia Santana Rio Canoas		O posto de Assimilação 3(laranja) - 72430000 - Passo do Granzotto Rio Forquilha	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
1	70100000 Despraiado	5	71200000 Vila Canoas	13	72400000 Passo São Geraldo
2	70200000 Invernada Velha	6	71250000 Ponte do R. João Paulo		
3	70300000 Fazenda Mineira	7	71300000 Rio Bonito		
4	70500000 Coxilha Rica	8	71350000 Encruzilhada		
		9	71383000 Ponte Alta Do Sul		
		10	71490000 Ponte Marombas		
		11	71496000 Ponte do Rio Correntes		
		12	71498000 Passo Marombas		

Tabela 6 – Esquema de Assimilação para todos os LPNM (Continuação)

Configurações de Assimilação de dados para obter vazões nos LPNM:					
O posto de Assimilação 4(laranja) - 72680000 - Passo Colombelli Rio Apue		O posto de Assimilação 5(laranja) - 72980000 - Rio Uruguai Rio do Peixe		O posto de Assimilação 6(laranja) - 73350000 - Barca Irani Rio Irani	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:	
14	72530000 Passo do Ligeiro	17	72715000 Rio das Antas	20	73300000 Bonito
15	72580000 Ponte do Rio Tapejara	18	72810000 Tangara	21	73330000 Passo Alto Irani
16	72630000 Passo Santa Tereza	19	72870000 Barra do Rio Pardo		
O posto de Assimilação 7(laranja) - 73970000 - Barra do Chapecó Rio Chapecó		O posto de Assimilação 8(laranja) - 74270000 - Passo Rio da Várzea Rio da Várzea		O posto de Assimilação 9(laranja) - 74470000 - Três Passos Rio Turvo	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM:	
22	73600000 Abelardo Luz	35	74205000 Linha Cescon	37	74460000 Ponte do Rio Turvo
23	73610000 Ponte Saudades	36	74210000 Potreiro Bonito		
24	73690001 Coronel Passos Maia				
25	73705000 Chapecozinho -				
26	73730000 Porto Elvino				
27	73750000 Porto Fae				
28	73765000 Passo Quilombo				
29	73770000 Porto Fae Novo				
30	73780000 Jardinópolis				
31	73820000 Passo Pio X				
32	73850000 Passo Nova Erechim				
33	73900000 Saudades				
34	73960000 Barra do Chapecó Aux.				

Tabela 6 – Esquema de Assimilação para todos os LPNM (Continuação)

Configurações de Assimilação de dados para obter vazões nos LPNM:					
O posto de Assimilação 10(laranja) - 74900000 - Linha União Rio Comandai		O posto de Assimilação 11(laranja) - 75320000 - Ponte Mística Rio Ijuí		O posto de Assimilação 12(laranja) - 75500000 - Passo do Sarmento Rio Piratinim	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
38	74880000 Passo São João	39	75155000 Passo Faxinal	46	75400000 Passo do Dias
		40	75185000 Ponte Nova do Potiribu	47	75430000 Passo Major Zeferino
		41	75200000 Conceição	48	75450000 Passo Santa Maria
		42	75205000 Ponte Nova do		
		43	75230000 Santo Angelo		
		44	75295000 Colônia Mousquer		
		45	75300000 Passo Viola		
O posto de Assimilação 13(laranja) - 75700000 - Passo do Novo Rio Icamagua		O posto de Assimilação 14(laranja) - 76120000 - Ponte Toropi Rio Toropi		O posto de Assimilação 15(laranja) - 76310000 - Rosário do Sul Rio Santa Maria	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
49	75600000 Passo das Turmas	50	76077000 Usina Quebra Dente	53	76260000 Passo do Guterres
		51	76085000 Cachoeira 5 Veados	54	76300000 Ponte Ibicui da Armada
		52	76100000 Vila Clara		
O posto de Assimilação 16(laranja) - 76380000 - Cacequi Rio Cacequi		O posto de Assimilação 17(laranja) - 76490000 -Passo do Loreto Rio Jaguarí		O posto de Assimilação 18(laranja) - 76750000 - Alegrete Rio Ibirapuitã	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
55	76360001 Azevedo Sodré	56	76440000 Jaguari	58	76700000 Passo dos Britos
		57	76460000 Ernesto Alves	59	76742000 Passo do Osório
O posto de Assimilação 19(laranja) - 85600000 - Passo das Tunas Rio Vacacaí		O posto de Assimilação 20(laranja) - 85623000 - São Sepé - Montante Rio São Sepé		O posto de Assimilação 21(laranja) - 85740000- Candelária Rio Pardo	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatórios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
60	85470000 Ponte São Gabriel	62	85580000 Passo do Verde	63	85730000 Passo Linha Do Rio
61	85480000 Passo do Rocha				

Tabela 6 – Esquema de Assimilação para todos os LPNM (Continuação)

Configurações de Assimilação de dados para obter vazões nos LPNM:					
O posto de Assimilação 22(laranja) - 85850000 - Santa Cruz Rio Pardinho		O posto de Assimilação 23(laranja) - 86440000 - Passo do Prata Rio Prata		O posto de Assimilação 24(laranja) - 86500000 -Passo Carreiro Rio Carreiro	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
64	85830000 Santa Cruz - Montante	65	86340000 Ponte Santa Rita	68	86480000 Passo Migliavaca
		66	86410000 Passo Barra do Guaiaveira		
		67	86420000 Ponte do Prata		
O posto de Assimilação 25(laranja) - 86580000 - Santa Lúcia Rio Guaporé		O posto de Assimilação 26(laranja) - 87170000 - Barca do Cai Rio Cai		O posto de Assimilação 27(laranja) - 87317060-Barra do João Pedro - M Rio Maquiné	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
69	86560000 Linha Colombo	70	87160000 Nova Palmira	71	87317030 Maquiné
O posto de Assimilação 28(laranja) - 87382000 - São Leopoldo Rio dos Sinos		O posto de Assimilação 29(laranja) - 87905000 - Passo do Mendonça Rio Camaquã		O posto de Assimilação 30(laranja) - 88680000 - Passo do Ricardo Rio Piratini	
Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM		Corrige as Vazões no Rio e Volumes nos Reservatorios Subterrâneos nas Sub-bacias dos LPNM	
72	87380000 Campo Bom	73	87590000 Passo do Cação	74	88550000 Ponte do Império
				75	88560001 Picada Nova
				76	88575000 Cerro Chato
				77	88600001 Contrato

Estimativa de vazões de referencia Q_{10} , Q_{50} , Q_{90} , Q_{95} , $Q_{maxTr25(\%)}$, $Q_{maxTr50(\%)}$ para as séries de vazão geradas nas simulações Sem e Com Assimilação de dados.

Aos efeitos de realizar comparações entre os métodos testados foram calculadas algumas vazões de referencia utilizando as séries de vazão geradas nas simulações Sem e Com Assimilação de dados obtida nos passos anteriores.

Estas vazões de referencia são a Q_{10} , Q_{50} , Q_{90} , Q_{95} , $Q_{maxTr25(\%)}$, e a $Q_{maxTr50(\%)}$. Cada uma das n vazões calculadas a partir das simulações com e sem assimilação de dados respectivamente (uma para cada LPNM), são representadas pelo valor médio de

cada vazão de referencia, obtidas através das 10 simulações (uma por cada conjunto de parâmetros).

Estimativa de vazões de referencia Q_{90} , Q_{95} , Q_{50} , Q_{10} , $Q_{max_{Tr25}}$ e $Q_{max_{Tr50}}$ através do método tradicional de regionalização de vazões

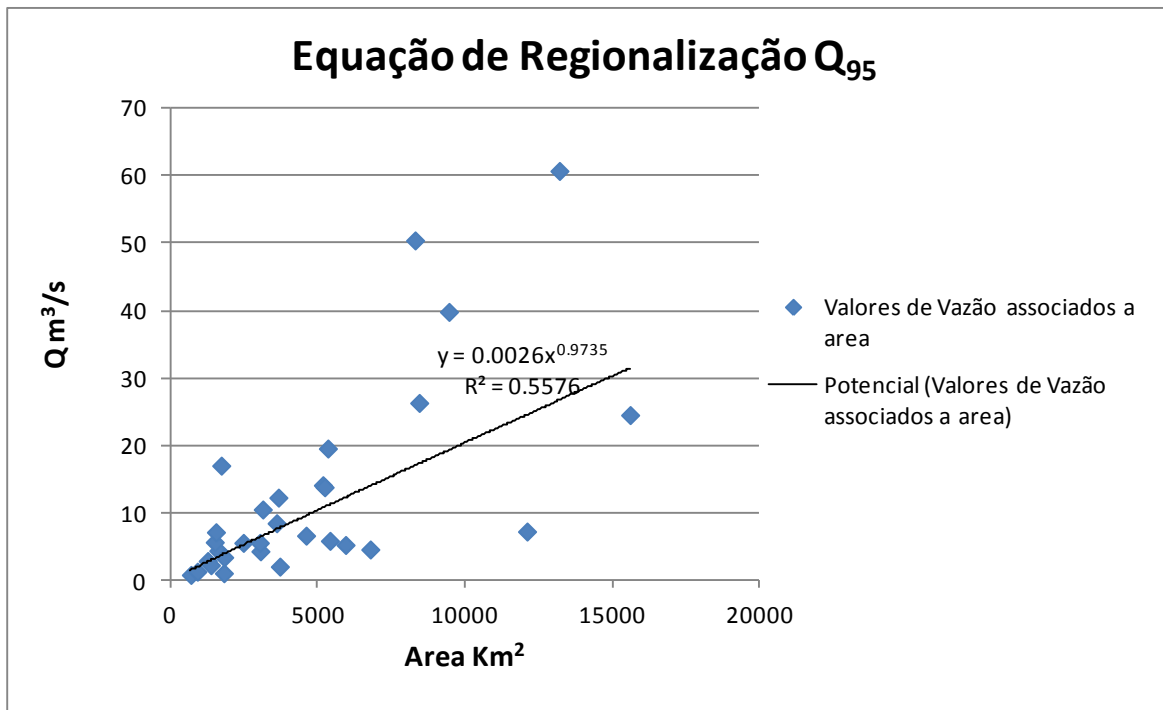
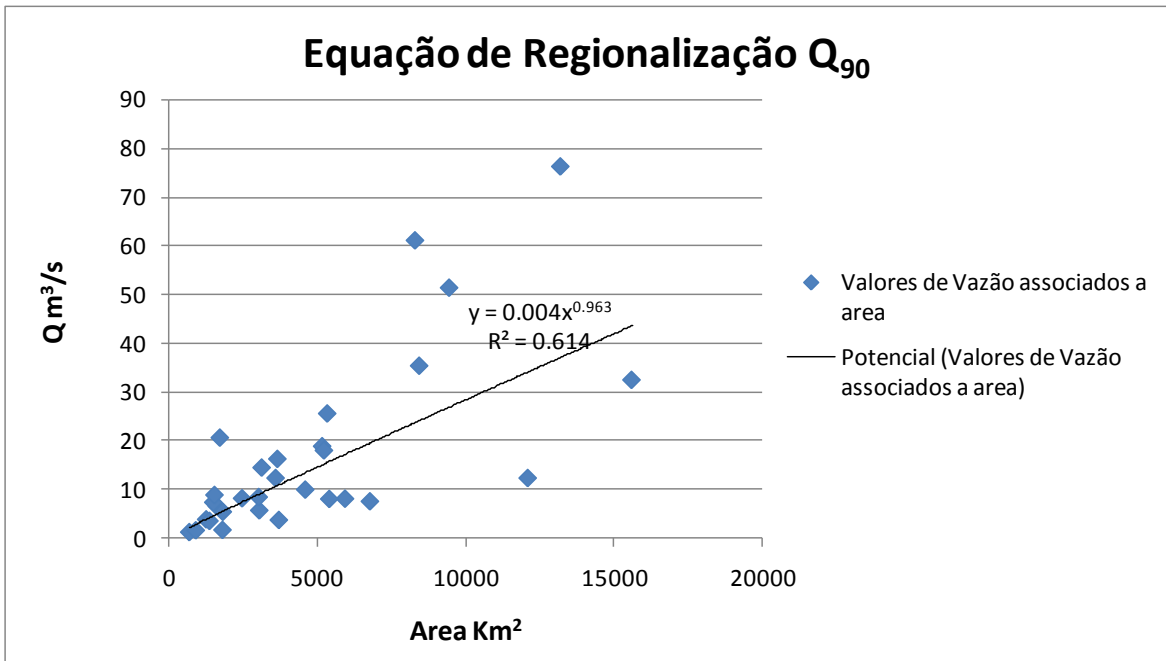
Neste trabalho além de medir se existe ou não melhoria nas vazões calculadas através da aplicação do modelo hidrológico com assimilação de dados, também foi realizada a comparação dos resultados da metodologia proposta, com os originados a partir do método tradicional de regionalização mais simples, que é aquele que leva em consideração apenas a área de drenagem.

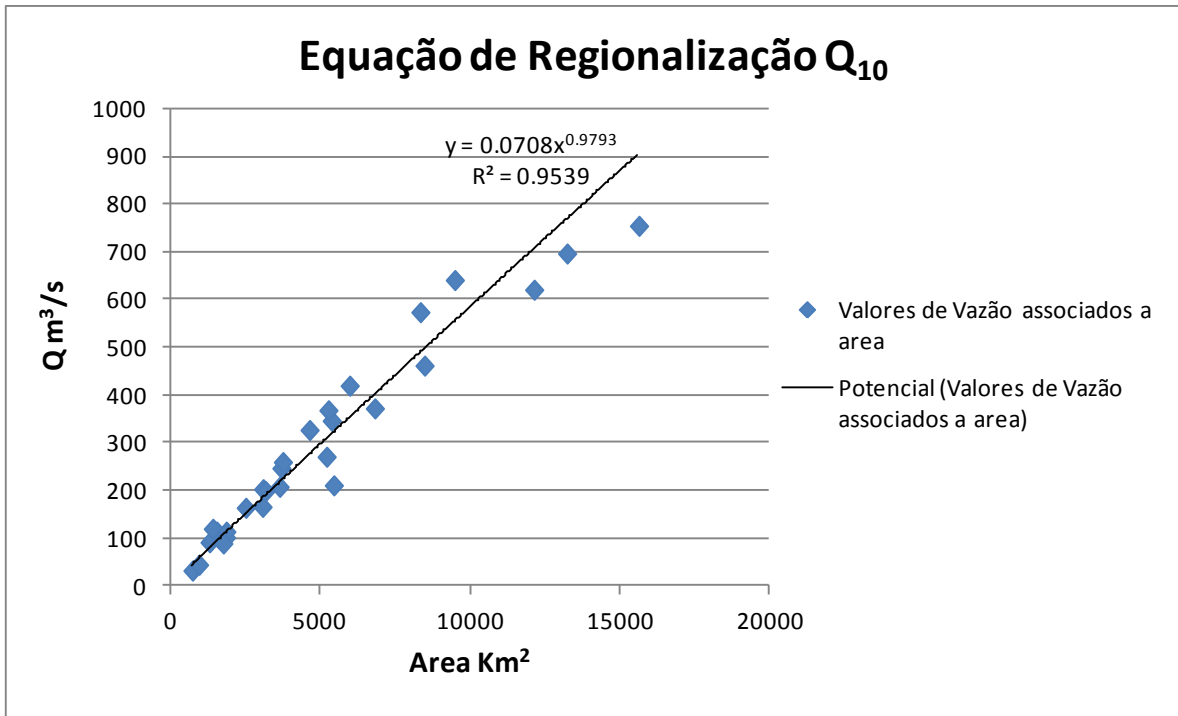
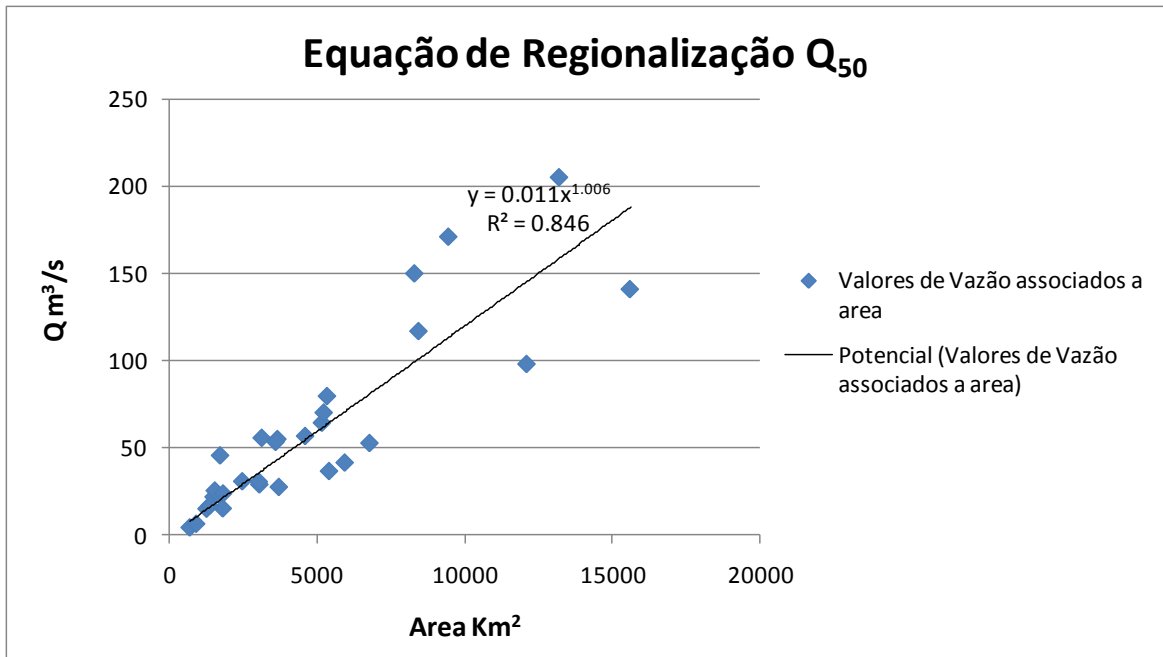
Métodos de regionalização podem levar em consideração outras características das bacias como ser a precipitação, a geologia, etc. Neste trabalho apenas foi considerada a área de drenagem tentando reproduzir o cenário de condição mínima de dados onde o responsável pela tomada de decisão normalmente deve, através de uma metodologia rápida, verificar a disponibilidade de água no rio num trecho determinado.

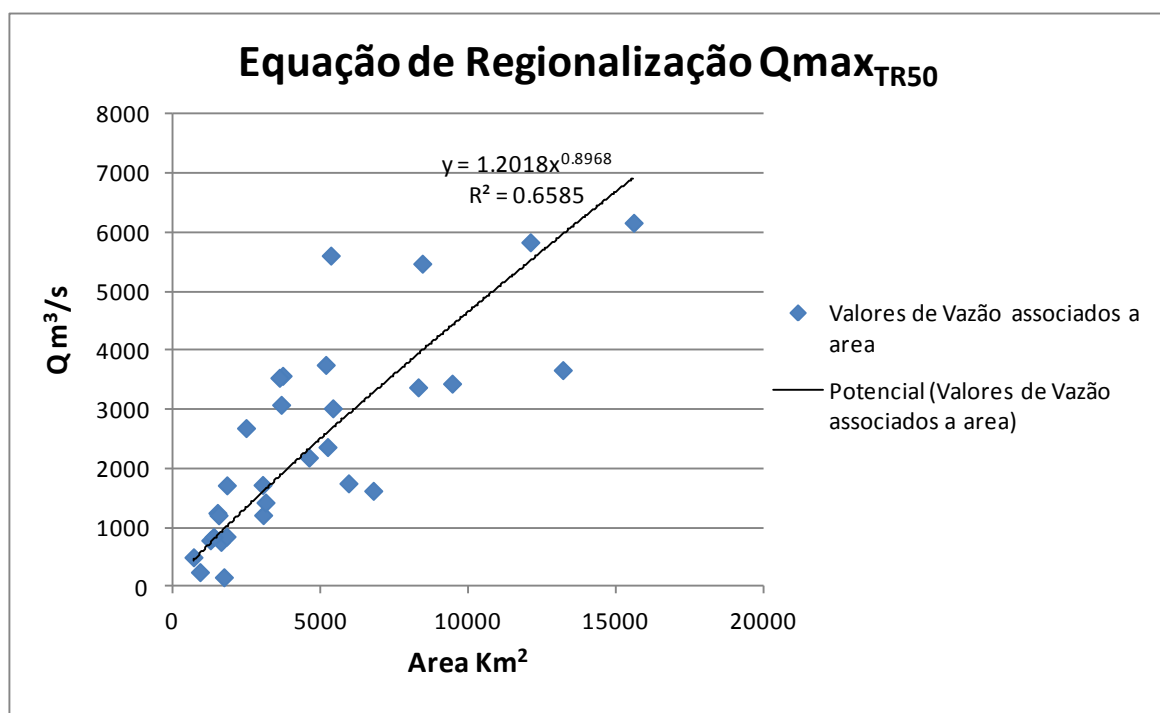
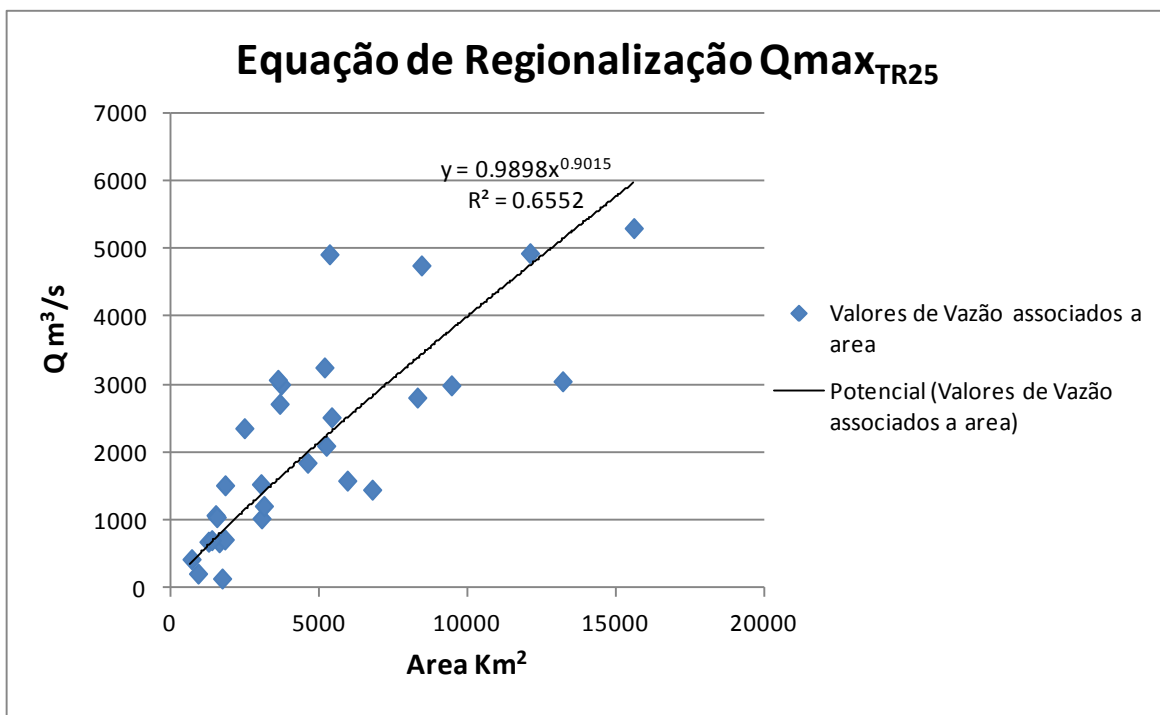
Por outro lado, caso se verifique melhorias na obtenção de vazões com a metodologia estudada sobre o método mais simples de regionalização isto encorajaria a avançar nas pesquisas, por que não, adicionando também outras variáveis na regionalização.

Foram estabelecidas então, para todo o estado de Rio Grande do Sul, equações simples que relacionam a vazão com a área de drenagem utilizando dados dos 30 postos (Primeiro Grupo) da Figura 15 e considerando o mesmo período de dados que aquele que é utilizado nas simulações com o modelo hidrológico (1970 a 1990).

O resultado é apresentado em forma gráfica a seguir:







Com ajuda das equações estabelecidas foram calculadas as vazões de referencia nos LPNM .

Estimativa de vazões de referencia Q_{90} , Q_{95} , Q_{50} , Q_{10} , $Q_{maxTr25}$ e $Q_{maxTr50}$ nos locais correspondentes aos postos fluviométricos do segundo grupo, utilizando uma relação linear com a área de drenagem com auxilio dos postos do primeiro grupo.

Por último e para completar os testes e ter mais uma metodologia simples a ser comparada com aquela proposta neste trabalho, foram calculadas as vazões Q_{90} , Q_{95} , Q_{50} , Q_{10} , $Q_{maxTr25}$ e $Q_{maxTr50}$, para cada um dos 77 LPNM, utilizando um método básico de Interpolação de vazões que leva em consideração as relações de área de drenagem de bacias aninhadas.

A equação utilizada no calculo foi explicada no apartado 3 d.1. e é apresentada novamente a seguir

$$Q_y = \frac{A_y}{A_x} Q_x$$

Equação 19

Onde Q_y é a vazão no local sem dados, Q_x é a vazão no local com dados localizado aguas abaixo do ponto de interesse, A_y a área de drenagem do local sem dados de vazão e A_x a área de drenagem do local com dados.

Logo no nosso caso as áreas e vazões de referencia são conhecidas para os 30 locais monitorados da Figura 15 e também é conhecida a área de drenagem dos LPNM da Figura 16, logo se procede a calcular as 6 (seis) vazões de referencia para cada um dos 77 LPNM.

Estimativa de vazões de referencia Q_{90} , Q_{95} , Q_{50} , Q_{10} , $Q_{maxTr25}$ e $Q_{maxTr50}$ nos locais correspondentes aos postos fluviométricos do segundo grupo ou LPNM, utilizando dados observados do segundo grupo .

Com base nas series de vazões observadas que foram reservados para realizar as avaliações nos postos fluviométricos do segundo grupo, foram calculadas as vazões de referencia Q_{10} , Q_{50} , Q_{90} , Q_{95} , $Q_{maxTr25}(\%)$, $Q_{maxTr50}(\%)$ observadas.

Cálculo do Erro Relativo Médio as vazões de referencia Q_{90} , Q_{95} , Q_{50} , Q_{10} , $Q_{max_{Tr25}}$ e $Q_{max_{Tr50}}$.

Finalmente com os resultados das vazões calculadas através dos 4 (quatro) métodos testados e com os dados de vazões observadas reservados para o teste nos LPNM, foram calculados os Erros Relativos Médios associados a cada uma das 6 (seis) vazões de referencia para cada um dos 77 (setenta e sete) LPNM.

Para determinar se existe uma melhoria nas estimativas das vazões em locais sem dados a partir da aplicação do modelo com assimilação de dados, foi calculado o Erro Relativo Médio (Equação 20)

$$ERM = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{calc_i} - Q_{obs_i}}{Q_{obs_i}} \right|}{n}$$

Equação 20

Onde n é o numero de LPNM; Q_{calc_i} é a vazão calculada em cada local e Q_{obs_i} é a vazão observada em cada local LPNM.

Observa-se que cada valor de erro é considerado em valor absoluto. Isto a efeitos de evitar que erros de diferente sinal se anulem entre si dando uma ideia falsa de precisão.

O ERM foi calculado para as vazões:

Q_{90} : Vazão com 90% de permanência no tempo

Q_{95} : Vazão com 95% de permanência no tempo

Q_{50} : Vazão com 50% de permanência no tempo

Q_{10} : Vazão com 10% de permanência no tempo

$Q_{max_{TR25}}$: Vazão máxima de 25 anos de tempo de retorno

$Q_{max_{TR50}}$: Vazão máxima de 50 anos de tempo de retorno

E as vazões foram obtidas a partir:

- do modelo MGB-IPH Sem Assimilação de dados,
- do modelo MGB-IPH Com Assimilação de dados, e,
- das equações de Regionalização de Vazões obtidas
- do método de interpolação simples testado.

Posteriormente foram comparados os valores dos erros gerados pelas diferentes metodologias.

Para o caso dos erros gerados a partir da metodologia proposta, estes foram plotados em função da área de drenagem de cada um dos 77 LPNM e para cada vazão de referencia. Logo com o intuito de obter uma função conhecida que relacione erro e área de drenagem foram calculadas as medianas dos erros fazendo um agrupamento por valores de área de drenagem de 0 a 2000 Km², de 2000 a 4000km² e maiores a 4000km². Isto devido à grande dispersão dos valores dos erros para áreas menores o que faz impossível ajustar a uma única curva de relação erro – área todos os dados.

Esta agrupação por áreas e posterior cálculo da mediana por grupos, permite obter um bom ajuste dos dados a uma curva do tipo potencial que deixa o 50% dos dados acima e abaixo dela dando uma boa representatividade na variação dos erros em função da área. Estes resultados são apresentados no item seguinte.

4.4 Resultados e Discussão para o Estudo de Caso

A Figura 29 e a Tabela 7 apresentam resumidamente as comparações dos erros relativos médios que avaliam se existe ou não melhoria nas estimativas das vazões em locais sem monitoramento, a partir da aplicação do modelo com assimilação de dados.

Pode-se observar uma diminuição do erro com a aplicação do método de assimilação de dados acoplado ao modelo MGB-IPH quando comparado com a simulação sem assimilação para todas as vazões sendo no caso das vazões mínimas Q90 e Q95 as melhoras respectivamente de 22% e 31% de diminuição nos erros.

Da mesma forma quando comparado o método de assimilação com o método de regionalização tradicional, a metodologia proposta teve melhores resultados para todas as vazões tendo os melhores ganhos também nas vazões mínimas Q90 e Q95 com 20% e 31% de redução nos erros, porém para o caso da Q10 essa diferença foi praticamente nula tendo em ambos casos um erro de 14% sem redução nos erros com a aplicação da assimilação de dados.

Já para as vazões máximas analisadas o efeito da assimilação de dados foi mínimo quando comparado com os outros métodos tendo os melhores ganhos na comparação com a regionalização tradicional com melhoras de 5%. Este resultado pode sugerir que o método traz um benefício mínimo no caso da obtenção de vazões máximas o que poderia

ter relação com o intervalo de tempo diário ser insuficiente na hora de corrigir vazões em bacias de rápida resposta.

Um resultado interessante é a estimativa dos erros com o método de interpolação simples. Estes resultados apontam uma redução muito baixa dos erros com a aplicação da metodologia proposta de assimilação de dados. Especificamente estas melhoras foram de 5% e 14% para as vazões mínimas Q90 e Q95 respectivamente e para as outras vazões o ganho não foi superior aos 3% tendo até pioras de 2% no caso da Q10 com a aplicação do método de assimilação de dados.

Da Figura 30 a Figura 35 é apresentada a variação do erro que resulta da metodologia proposta de assimilação de dados em função das áreas de drenagem de cada um dos 77 LPNM. Estes gráficos sugerem que o erro tende a diminuir conforme a área acumulada aumenta. Estes pontos de Erro em função da área foram ajustados a uma curva do tipo potencial utilizando à mediana e agrupando eles por intervalo de área. Com a função resultante para cada gráfico tem-se a capacidade de associar para cada trecho de rio, segundo a área acumulada, um valor de erro estimado.

Finalmente a Figura 36 e Figura 37 expõem respectivamente um dos produtos que a metodologia proposta pode oferecer; no caso são apresentadas, a vazão de referência Q90 por trecho de rio e o ERM associado respectivamente para todo o estado do Rio Grande do Sul. Este produto pode ser replicado para cada vazão de referência desejada ou para qualquer indicador que possa ser obtido a partir das series geradas.

Estas informações podem ser lidas desde o próprio software de Sistema de Informação Geográfica ou também podem ser transferidas para uma interfase gráfica onde o tomador de decisão pode realizar as análises que considere necessárias.

Erros Relativos Médios Com e Sem Assimilação, com de Regionalização de vazões e com Interpolação simples

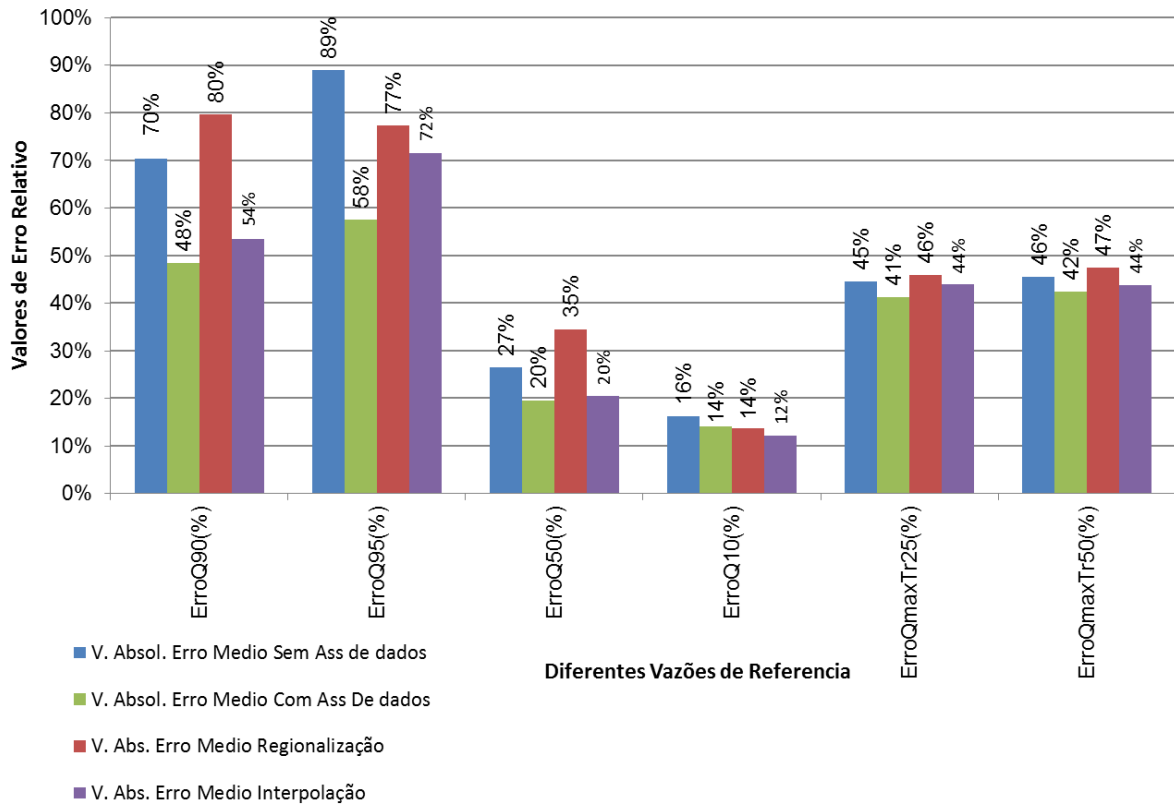


Figura 29– Comparação do erro relativo médio das vazões por 4 metodologias

Tabela 7 – ERM dos LPNM e percentagem de diminuição comparando métodos

Erro Relativo Medio de 77 LPNM comparando quatro metodologias						
Método/Vazão de Referência	ErroQ90(%)	ErroQ95(%)	ErroQ50(%)	ErroQ10(%)	ErroQmax Tr25(%)	ErroQmax Tr50(%)
ERM MGB-IPH Sem Assimilação	70%	89%	27%	16%	45%	46%
ERM MGB-IPH Com Assimilação	48%	58%	20%	14%	41%	42%
ERM Regionalização	80%	77%	35%	14%	46%	47%
ERM Interpolação	54%	72%	20%	12%	44%	44%
Diminuição do ERM Com ASS vs. Sem ASS	22%	31%	7%	2%	3%	3%
Diminuição do ERM Com ASS vs. Com Reg.	31%	20%	15%	0%	5%	5%
Diminuição do ERM Com ASS vs. Com Intrp	5%	14%	1%	-2%	3%	1%

Variação do ERM da Q₉₀ em função da área

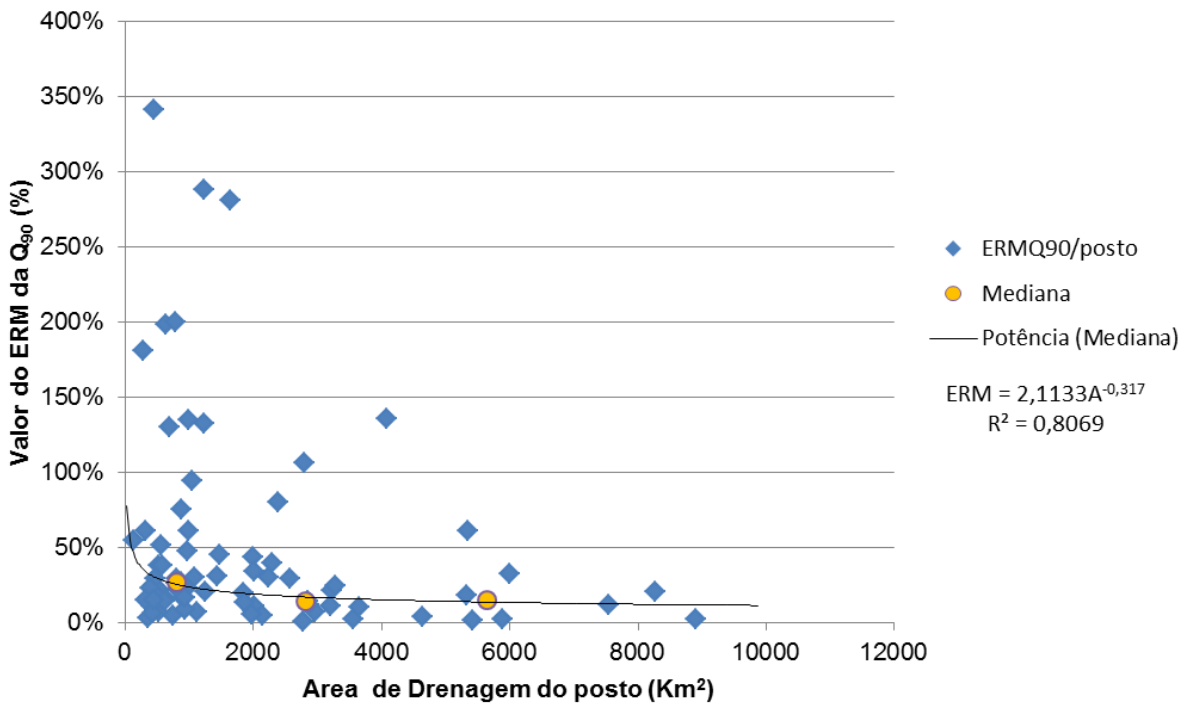


Figura 30– Variação da Q₉₀ em função da área

Variação do ERM da Q₉₅ em função da área

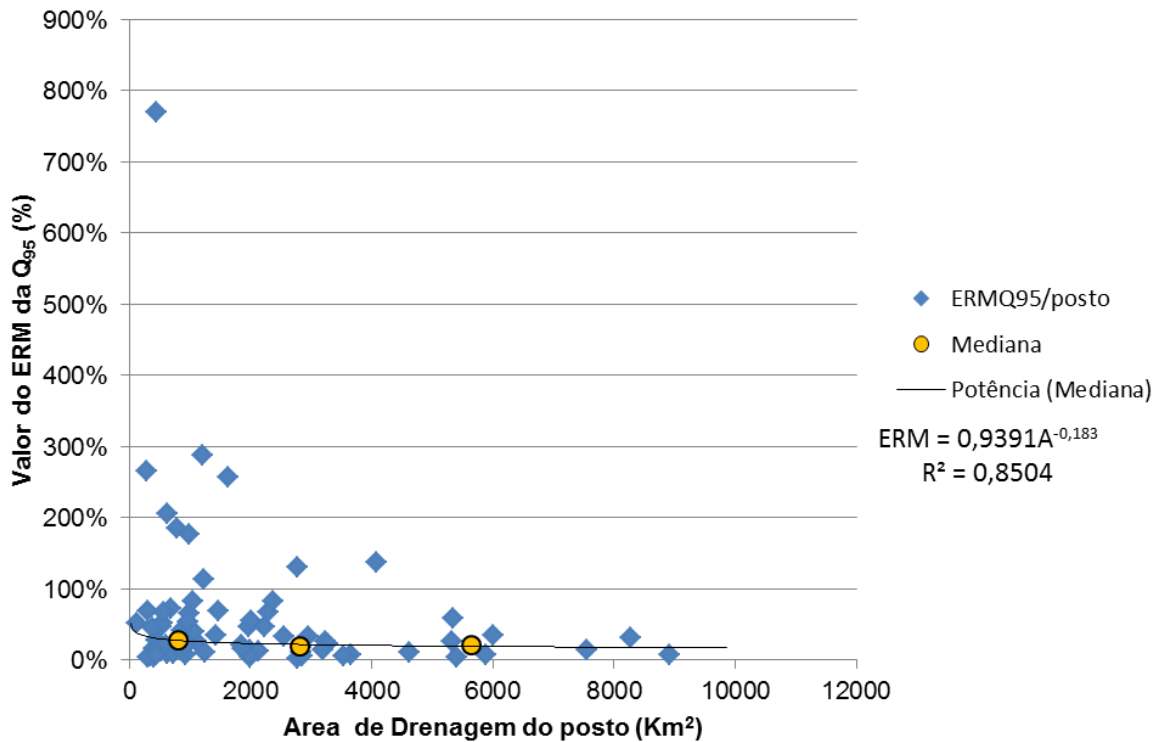


Figura 31– Variação da Q₉₅ em função da área

Variação do ERM da Q₅₀ em função da área

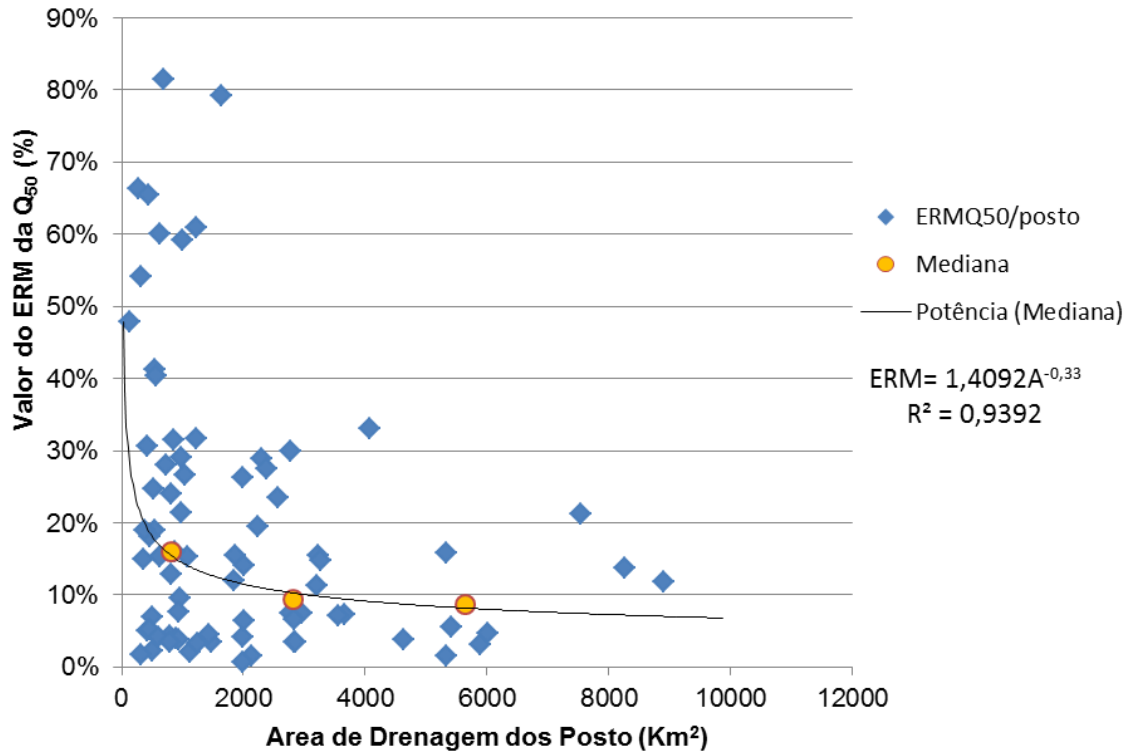


Figura 32– Variação da Q₅₀ em função da área

Variação do ERM da Q₁₀ em função da área

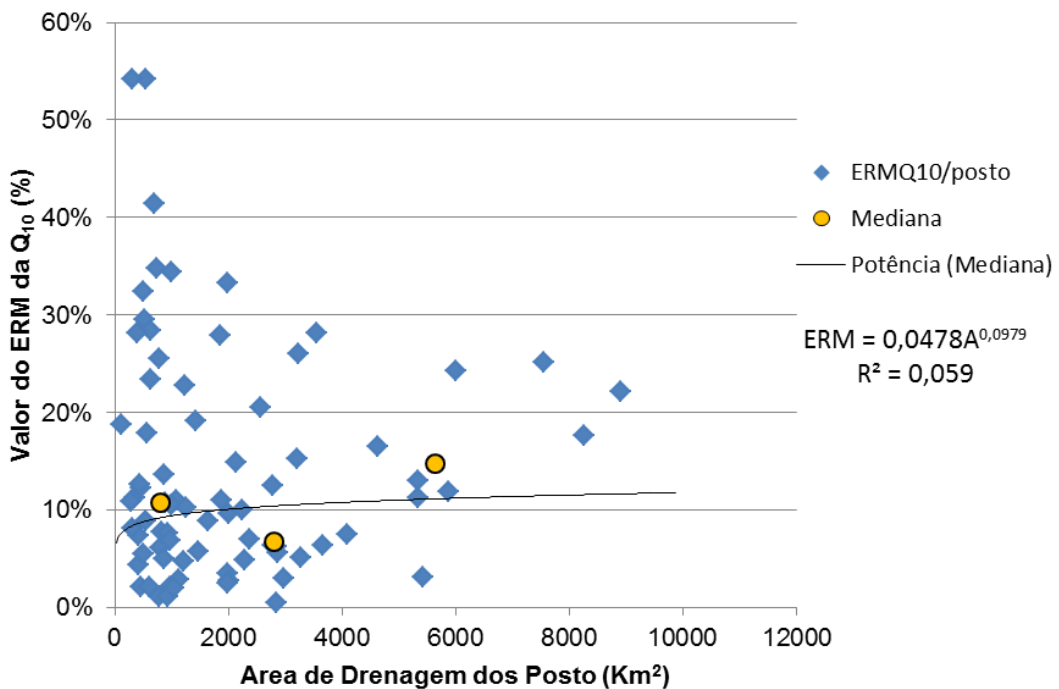


Figura 33– Variação da Q₁₀ em função da área

Variação do ERM da $Q_{\max TR25}$ em função da área

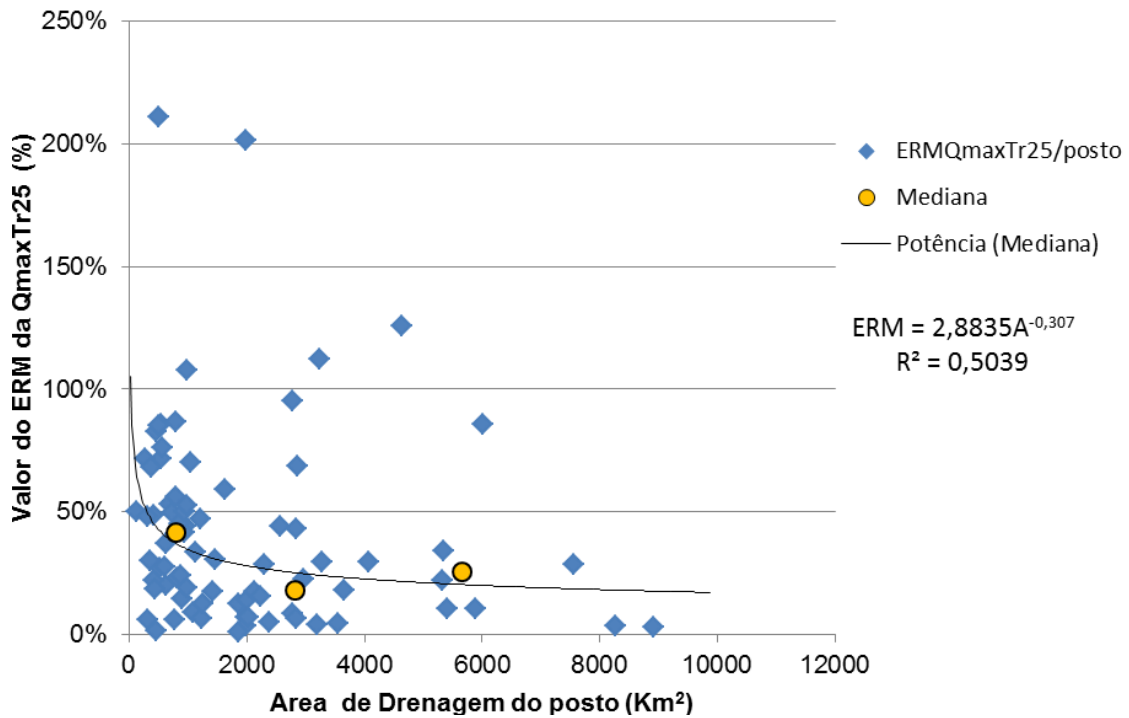


Figura 34– Variação da $Q_{\max TR25}$ em função da área

Variação do ERM da $Q_{\max TR50}$ em função da área

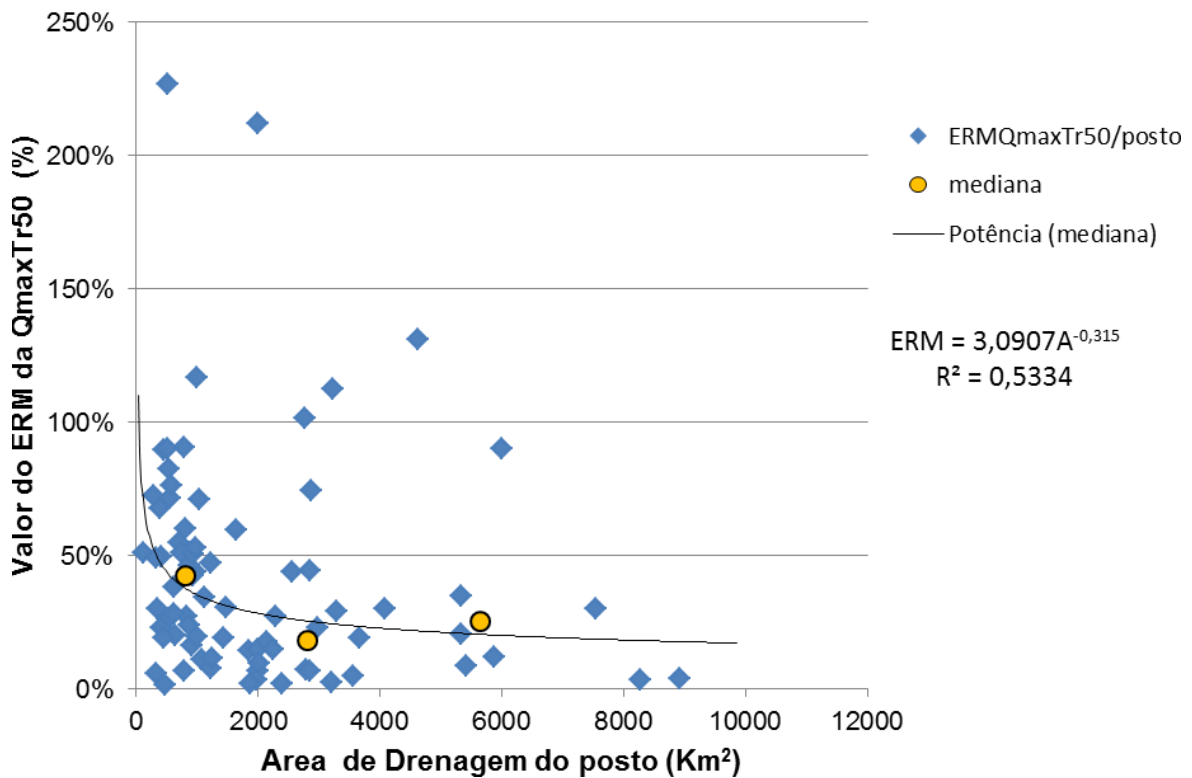


Figura 35– Variação da $Q_{\max TR25}$ em função da área

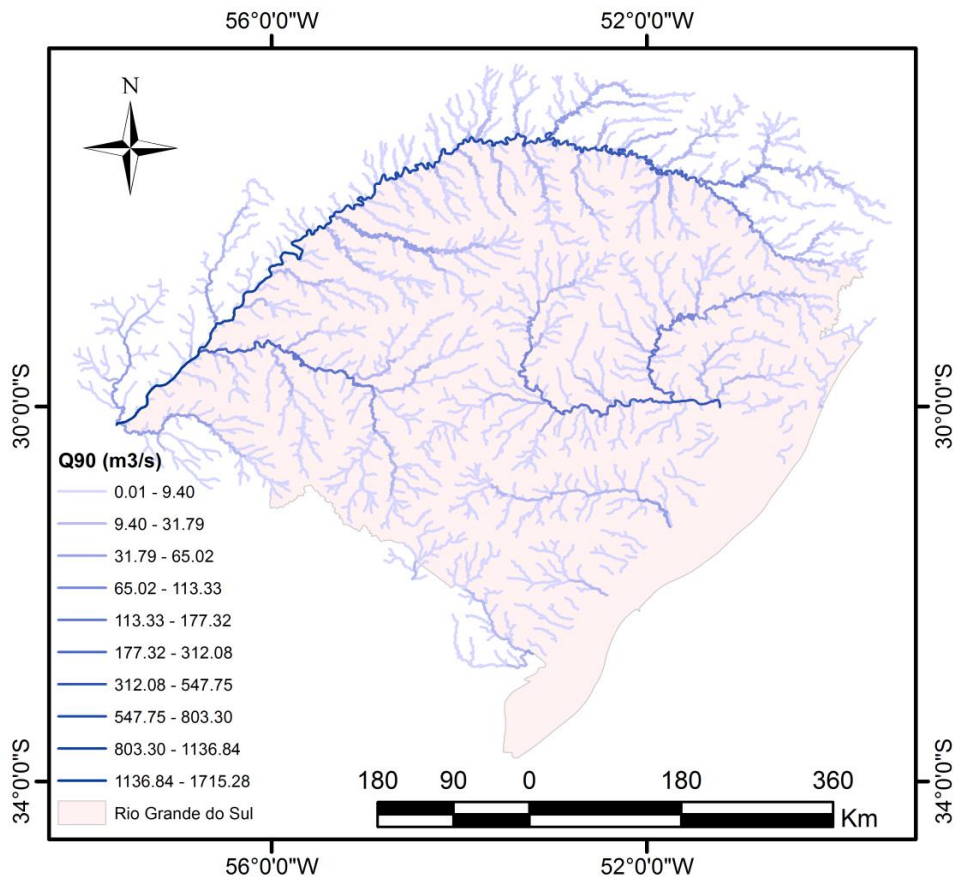


Figura 36– Q90 para cada trecho de rio do Estado do Rio Grande do Sul.

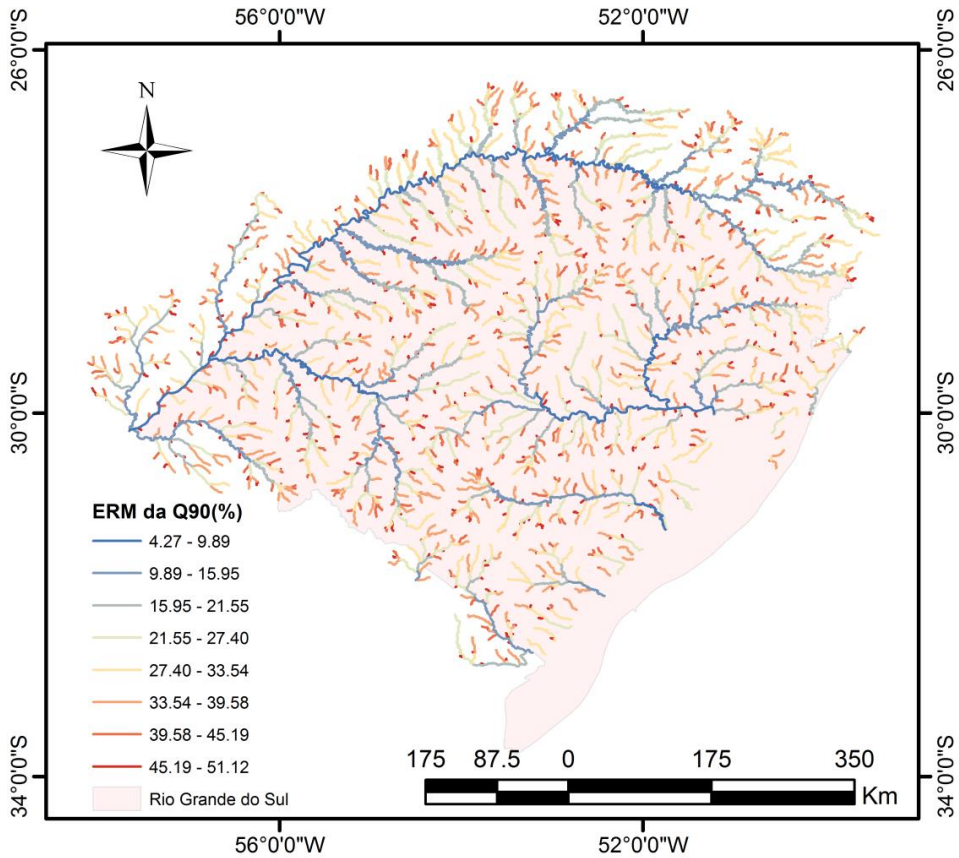


Figura 37– ERM's associados aos valores de Q90 obtidos para cada trecho de rio do Estado do Rio Grande do Sul.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

Neste trabalho foi testada a utilização de um método de Assimilação de Dados acoplado ao Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH, para obtenção de vazões em locais sem dados visando a diminuição dos erros relativos médios no cálculo das mesmas com o objetivo de oferecer um subsídio na gestão eficiente dos recursos hídricos conhecendo com maior precisão os valores de vazão em cada trecho de rio.

Através dos resultados apresentados pode-se concluir que existe um ganho na aplicação da metodologia proposta no que se refere à diminuição de erros nas estimativas de vazões em locais sem dados. Esta diminuição dos erros é maior para as vazões mínimas de referencia e quando a comparação é feita com o método de simulação sem assimilação de dados e com o método de regionalização tradicional.

No entanto o ganho é mínimo quando se fala das vazões máximas o que sugeriria que os dados de frequência diária podem ser insuficientes para realizar as correções ou atualizações.

Outra conclusão importante é que os resultados do método de interpolação simples podem induzir a pensar que ele é uma alternativa vantajosa na obtenção de vazões em locais sem dados, quando comparado com o custo computacional e de tempo que a implementação de um modelo hidrológico com assimilação de dados pode ter. Porém quando precisarmos de uma análise mais complexa de cenários futuros ou de alterações nos regimes hidrológicos por efeito de obras hidráulicas ou outros, a modelagem que permite a introdução de estas variantes no próprio esquema de simulação pode abreviar passos que tanto a interpolação quanto outro método de regionalização não poderia além de ter a capacidade de reduzir erros de qualquer origem através do acoplamento de métodos de assimilação de dados observados.

Por outra parte os modelos hidrológicos são uma grande ferramenta no auxílio à estimativa de disponibilidade hídrica devido a sua inegável versatilidade especialmente nos casos de modelos hidrológicos distribuídos.

Finalizando, o modelo MGB-IPH calibrado em todo o estado de RS complementado pelo método de assimilação de dados utilizado aqui, se mostrou adequado para gerar séries de vazão com o objetivo de obter series de vazões em locais sem monitoramento, como método alternativo aos de regionalização tradicional e interpolação simples. No entanto podem ser estudados outros métodos e configurações diferentes tanto no modelo como no método de assimilação de dados para aprimorar os resultados e diminuir os erros gerados no calculo das vazões.

Embora os métodos alternativos aplicados no presente trabalho se apresentam competitivos pela magnitude dos erros semelhante e pela facilidade de aplicação dos mesmos quando se precisam de respostas rápidas para tomadas de decisão; é necessário lembrar que no contexto futuro algumas dessas técnicas poderão não ser mais aplicáveis, em função da ausência quase total de séries de vazão natural observada.

Os resultados obtidos aqui se referem apenas à região do RS e parte de SC. Recomenda-se que análises semelhantes sejam realizadas em outras regiões. É possível que diferenças regionais, devidas ao clima ou a características físicas das bacias hidrográficas levem a resultados diferentes. Recomenda-se também testar outros métodos de assimilação acoplados ao mesmo modelo MGB-IPH u outros modelos distribuídos.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRA, S. G.; SOUZA, V. C.; NEVES, M. G. F.; CRUZ, M. A. S. Metodologias de Regionalização De Vazões: Estudo Comparativo na Bacia do Rio Carreiro – RS. In: **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2003. Curitiba-PR.
- ANDREOLLI, I.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. HAAS, R.; REGINA, J. V. M. 2006. Previsão de Vazão Afluente a um Reservatório Utilizando Previsão Quantitativa de Chuva. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** - v.11. n. 3 - JUN/SET - 2006
- AUBERT, D.; LOUMAGNE, C.; OUDIN, L. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 280, p. 145 – 161. 2003
- BARMA, D.; VARLEY, I. **Hydrological modelling practices for estimating low flows – guidelines**. National Water Commission. Canberra. 2012b.
- BERGSTRÖM, S., 1995. The HBV model. In: Singh, V. (Ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. **Water Resources Pub.**, pp. 443–476.
- BEVEN, K.; KIRKBY, M. A. Physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, p. 43-69. 1979.
- BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. TOPMODEL. In: Singh V. P. (editor). **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications. Highlands Ranch, 1130pp. 1995.
- BIANCAMARIA, S.; LETTENMAIER, D. P.; PAVELSKY, T. M. **The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology**. **Surveys in Geophysics**, 37, 2015. 307-337.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. 2013. **Runoff Prediction in Ungauged Basins**. Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge University Press. Cambridge-UK.
- BREMICKER, M. 1998. **Aufbau eines Wasserhaushalts modells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären – Hydrologie - Modells**. Dissertation (Doktorgrad) - Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert- Ludwigs-Universität. Freiburg. Germany..
- BROCCA L, MELONE F and MORAMARCO T. Distributed Rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. **Hydrological. Processes**. V.25, n.18, p. 2801–2813. 2011
- BUARQUE, D. C.; FAN, F.M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. RBRH — **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n.2, p.91-103. Abr/Jun 2009.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford. . 1998
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN,W.;TUCCI,C.E.M.;PILAR,J.V.;SILVA,M.C. Avaliação dos Benefícios de Previsões de Vazão na Operação de Reservatórios”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.1, p. 197-216, 2008.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. Oficina de Textos. P.302. 2005
- CASTIGLIONI, S.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A.; SKØIEN, J.O.; LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. Smooth regional estimation of low-flow indices: physiographical space based interpolation and top-kriging. **Hydrology and Earth Systems Science**. V.15, p.715–727. 2011.

- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.7, n.3, p.43-51, 2002.
- CHEBANA, F.; OUARDA, T. B. M. J.: Depth and homogeneity in regional Flood frequency analysis, **Water Resources Research**, doi:10.1029/2007WR006771, 2008.
- CHETTY, K.; SMITHERS, J. C. Continuous simulation modelling for design flood estimation in South Africa: Preliminary investigations in the Thukela catchment. **Physics and Chemistry of the Earth** v.30, p.634–638. 2005.
- CLARK, M. P.; RUPP D. E.; WOODS, R. A.; ZHENG, X. IBBITT, R. P.; SLATER, A. G.; SCHMIDT, J.; UDDSTROM, M. J. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. **Advanced in Water resources**. v. 31, n. 10, p. 1309-1324, 2008.
- CLARKE, R.T.; BUARQUE D.C. Maximizing the predictive value of information from different sources: An Amazon Case study. In: POMEROY, J.W.; WHITFIELD, P.H.; SPENCE, C. (eds.). **Putting Prediction in Ungauged Basins into Practice**. Canadian Water Resources Association. p. 23-40. 2013
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. 2012. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**. Online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/hyp.9391.
- COLLISCHONN, B.; CAUDURO R.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F.; SCHETINI, E.; MAINARDI, F. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, n.4, P.119-133, Out/Dez 2011.
- COLLISCHONN, W. **Manual de Discretização de Bacias para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2**. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2009
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, 52, 878-895 pp.
- COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 305, n. 1-4, p. 87-98, Apr 2005.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CHOU, S. C.; GUILHON, L. G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. Mediumrange reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 344, n. 1, p. 112-122, 2007.
- COLLISCHONN, W. 2001. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese de doutorado, IPH-UFRGS. 277p.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M.; SILVA, B. C. da; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; PAZ, A. R. Modelo Hidrológico distribuído para Previsão de Vazões Incrementais na Bacia do Rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 43-55, Jul/Set 2007.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1992 Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research** Vol. 28 No. 4. pp. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1994 Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Vol 158 pp. 265-284.
- DINIZ, L. da S. 2008. **Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-Vazão usando Redes Neurais**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 197p.
- ELETRONBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985b.
- ELETRONBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985a. 202p.
- EVENSEN, G. 2003. "The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation". **Ocean Dynamics**, 53, 343 – 367 pp.

- 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.
- FALKENMARK, M.; CHAPMAN, T. 1889. Comparative Hydrology, Paris: UNESCO. 333(2-4), 517-531.
- FLÜGEL, W.A. 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, **Germany. Hydrological Processes**, Vol. 9 pp. 423-436.
- GOSWAMI, M., O'CONNOR, K. M., AND BHATTARAI, K. P. (2007). Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. **J. Hydrol.**, 333(2-4), 517-531.
- GÖTZINGER, J., AND BÁRDOSSY, A. (2007). Comparison of four regionalization methods for a distributed hydrological model. **J. Hydrol.**, 333(2-4), 374-384.
- GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SEMA. **Instrução Normativa nº. 001, de 08 de abril de 2009.**
- HASENACK, H; WEBER, E. (org.) **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio grande do Sul – Escala 1:250.000.** Porto Alegre, UFRGS – IB – Centro de Ecología. 2006. 1CD-ROM (Serie geoprocessamento, 1)
- HE, Y., BÁRDOSSY, A., AND ZEHE, E. 2011 A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 15, 3539-3553, doi:10.5194/hess-15-3539-2011.
- HELLWEGER, F.; MAIDMENT, D. R. 1997. **AGREE - DEM Surface Reconditioning** System. Disponível em: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>. Acesso: set. 2014.
- HIRSCH R. M.; A Comparison of Four Streamflow Record Extension Techniques. **Water Resources Research**, Vol. 18, No. 4, Pages 1081-1088, August 1982.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área Territorial Oficial e População** por Unidade da Federação. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm> Acesso: set. 2015.
- IAHS – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES. **PUB – Prediction on Ungauged Basins.** Disponível em <pub.iahs.info>. Acesso em 22/07/2012.
- JARVIS A.; REUTER, H.I.; NELSON, A.; GUEVARA, E. **Hole-filled seamless SRTM data V4.** International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). 2008 Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org>. Acesso em: janeiro de 2012.
- KOUWEN, N., SOULIS, E., PIETRONIRO, A., DONALD, J., AND HARRINGTON, R. 1993. Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, 119(3), 289-305.
- KURTZMAN D.; NAVON S.; MORIN E. Improving interpolation of daily precipitation for hydrologic modeling: spatial patterns of preferred interpolators. **Hydrological Processes**, v.23, p.3281-3291. 2009
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, Jul 1994.
- LIMA, C. H. R., AND LALL, U. (2010). Spatial scaling in a changing climate: A hierarchical bayesian model for non-stationary multi-site annual maximum and monthly streamflow. **J. Hydrol.**, 383(3-4), 307- 318.
- LITTLEWOOD, I.G. Regionalization of rainfall-streamflow models for estimating flows in ungauged basins: Towards reducing uncertainty. In: POMEROY, J.W.; WHITFIELD, P.H.; SPENCE, C. (eds.). **Putting Prediction in Ungauged Basins into Practice.** Canadian Water Resources Association. 2013. p. 213-220
- LIU, S.; MO, X.; LIU, C.; XIA, J.; ZHAO, W. How to maximize the predictive value of available data in ungauged basins? – Chinese lesson. In: POMEROY, J.W.; WHITFIELD, P.H.; SPENCE, C. (eds.). **Putting Prediction in Ungauged Basins into Practice.** Canadian Water Resources Association. 2013. p. 13-22
- LIU, S.; SHAO, Y.; YANG, C.; LIN, Z.; LI, M. Improved regional hydrologic modelling by assimilation of streamflow data into a regional hydrologic model. **Environmental Modelling & Software**. v. 31, p. 141-149, 2012.

- LIU, Y.; GUPTA, H. V.; Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resources research**, v. 43, n. 7, W07401, 2007.
- MAIDMENT D. R. **Arc Hydro: GIS for Water Resources**. Redlands, CA, ESRI Press. 2002.
- MAINARDI, F. F.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; CAUDURO, R.; KAYSER, R. **Manual do Prepro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH**. Versão 4.1. Projeto integrado de cooperação amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2010.
- MAINARDI, F. F.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; CAUDURO, R.; KAYSER, R. **Manual Arc-HYDRO para aplicação do modelo MGB-IPH**. Versão 1.2. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2009.
- MCLAUGHLIN, D. An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering. **Advances in Water Resources**, v. 25, n. 8-12, p. 1275–1286, 2002.
- 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, Jul/Set 2012.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. V.; HOUSER, P. R. Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. **Advances in Water Resources**, v. 28, n. 2, p. 135–147, 2005.
- MOORE, R.J.; BELL, V.A. & JONES, D.A. (2005). Forecasting for flood warning. **Comptes Rendus Geoscience**, v.337, issue 1, p.203-217.
- MORETTI G and MONTANARI A (2008) Inferring the flood frequency distribution for an ungauged basin using a spatially distributed rainfall-runoff model. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 12 (4) 1141–1152.
- MUNRO, D.S. Creating a runoff record for an ungauged basin: Peyto Glacier, 2002-2007. In: POMEROY, J.W.; WHITFIELD, P.H.; SPENCE, C. (eds.). **Putting Prediction in Ungauged Basins into Practice**. Canadian Water Resources Association. 2013. p. 197-204
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo horizonte: CRPM, 2007. 552p.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2011 Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. **Texas Water Resources Institute Technical Report** no. 406. 618pp.
- NOVAES, L. F.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. del G. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, MG, v.17, n.1, p.62-74, 2009.
- NOVAES, L. F.; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M. Avaliação do Desempenho de Cinco Metodologias de Regionalização de Vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 51-61, Abr/Jun 2007.
- OBREGON, E.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUND, J. A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: Bacias afluentes à lagoa Mirim, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.4, n. 1, p. 57-75. 1999.
- O'CONNELL, P. E. & CLARKE, R. T. (1981) Adaptive hydrological forecasting - a review. **Hydrol. Sci. Bull.** 26(2), p.179-205.
- OTSUKI, R. G.; REIS, D. S.; Análise Comparativa de Metodologias de Estimativa de Séries de Vazões Médias Mensais Aplicadas a Estudos Energéticos de Aproveitamentos Hidrelétricos. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Maceió : ABRH, 2011.
- PEREIRA, M. M. P. ; KAYSER, R. H. B. ; FRAGOSO JR., C. R. ; COLLISCHONN, W. . Protótipo de Sistema de Suporte à Decisão para gerenciamento de bacias hidrográficas integrado a um SIG: IPH-SISDEC. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande : ABRH, 2009.
- PAIVA R. C. 2009. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 168p.

- PAIVA, R. C. D., COLLISCHONN, W., BONNET, M.-P., DE GONÇALVES, L. G. G., CALMANT, S., GETIRANA, A., AND SANTOS DA SILVA, J. 2013 Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 17, 2929-2946, doi:10.5194/hess-17-2929-2013,.
- PAIVA, R. C. D.; DURAND, M. T.; HOSSAIN, F. Spatiotemporal interpolation of discharge across a river network by using synthetic SWOT satellite data. **Water Resources Research**. AGU PUBLICATIONS. 2015.
- PARIS, A.; GARAMBOIS, P.; CALMANT, S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Identifiability of altimetry-based rating curve parameters in function of river morphological parameters. Geophysical Research Abstracts. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**, Viena, Áustria. V.18. 2016.
- PAUWELS, V. R. N.; DELANNOY, G. J. M. 2006 Improvement of modeled soil wetness conditions and turbulent fluxes through the assimilation of observed discharge, **J. Hydrometeorol.**, 7, 458–477.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; ALLASIA, D. Data Assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts. In: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM HS2004 AT IUGG2007, 2007, Perugia. Perugia: IAHS, 2007. p. 471-478. **IAHS Publication**.
- PINHEIRO, V. B.; NAGHETTINI, M. 2010 Calibração de um Modelo Chuva-Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico a partir de Curvas de Permanência Sintéticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 15 n.2 Abr/Jun 2010, 143-156.
- POMEROY, J.W.; SPENCE, C.; WHITFIELD, P.H. Introduction to putting prediction in ungauged basins into practice. In: POMEROY, J.W.; WHITFIELD, P.H.; SPENCE, C. (eds.). **Putting Prediction in Ungauged Basins into Practice**. Canadian Water Resources Association. 2013. p. 1-12.
- PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D.; BUARQUE, D.C. (2015). Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões / Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing. **RBRH –Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n.4, p.888-904
- POST, D.A., JAKEMAN, A.J., 1999. Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in S.E. Australia by regionalizing the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model. **Ecological Modelling** 123, 91e104.
- POST, D.A., JONES, J.A., GRANT, G.E., 1998. An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. **Environmental Modelling and Software** 13, 395e403.
- PORTO, R. L. L. 1995 **Escoamento superficial direto** In: Tucci, C. E. M.; Porto R. L. L.; Barros, M. T. L. 1995 Drenagem Urbana. ABRH Editora da UFRGS.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. del G.; SOUZA, J. F.; SILVA, B. M. B. Da; SARAIVA, I. S. 2011. Conhecimento da Disponibilidade Hídrica Natural para a Gestão dos Recursos Hídricos. **Revista Engenharia Agrícola**. v.31, n.1, p.67-77, jan./fev. 2011
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. de A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. del G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**. v. 476, p. 52-71, Jan 2013.
- RADAMBRASIL. 1982. **Programa de Integração Nacional, Levantamento de Recursos Naturais**. Ministério das Minas e Energia, Secretaria-Geral.
- RAHMAN A., HOANG T. M. T.; WEINMANN P. E.; LAURENSEN E. M. 1998 **Joint Probability Approaches to Design Flood Estimation: A Review**. Report 98/8, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Monash University, Clayton, Victoria, Australia. 70 pp.
- RAHMAN A., WEINMANN, P. E.; HOANG T. M. T. LAURENSEN, E. M. 2002 Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall. **J. Hydrol.** 256 196–210.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. 2013 Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. **J. Hydrol. Eng.**, 18(8), 958–975.
- REFSGAARD, J.C. (1997). Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. **Nordic Hydrology**, v.28, p.65-84.

- RIO GRANDE DO SUL. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. **Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas e Rio Taquari**. Qualidade Ambiental-Região Hidrográfica do Guaíba publicado em 2010. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_taquari_antas/taquariantas.asp. Acesso em: março de 2014.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Departamento de Recursos Hídricos. **Descrição da bacia do rio Taquari-Antas** publicado em 2010..Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/>. Acesso em: março de 2014.
- QUIROZ, K. 2017. **Previsão de Vazão usando Estimativas de Precipitação por Satélite e Assimilação de Dados**. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 180p.
- SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. 2011 Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 16 n.1 Jan/Mar 2011, 115-125.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. (ed.). **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- SHU, CH.; OUARDA , T.B. Improved methods for daily streamflow estimates at ungauged sites. **Water Resources Research**, v. 48, W02523. 2012.
- SINGH, S.K., 2010. **Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins**. PhD Thesis. Nr. 198. University of Stuttgart, Germany.
- SILVA JÚNIOR, O.; BUENO, E. de O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** , Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2003.
- SILVEIRA, G.L. 1997 **Quantificação de vazão em pequenas bacias carentes de dados**. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 180f. Tese de Doutorado.
- SILVEIRA, G.L.; CRUZ, J.C.; SILVEIRA, A. L. L.; CRUZ, R. C. 2005. Regionalização da Depleção Regional com Dados Primários de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** V.10; n.3; Jul/Set 2005, p43-51
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S. W.; GUPTA, V. K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J. J.; MEDIONDO, E. M.; O'CONNELL, P. E.; OKI, T.; POMEROY, J. W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for de hydrological sciences. **Hydrological Sciences**. 48(6), p. 857-880. 2003.
- SMAKHTIN , V.Y. Generation Of Natural Daily Flow Time-Series In Regulated Rivers Using A Non-Linear Spatial Interpolation Technique. **Regulated Rivers: Research & Management**. v. 15, p. 311–323, 1999.
- SMITHERS, J. C.; CHETTY, K. T.; FREZGHI, M. S.; KNOESEN, D. M.; TEWOLDE, M. H. Development and assessment of a daily time-step continuous simulation modelling approach for design flood estimation at ungauged locations: ACRU model and Thukela Catchment case study. **Water SA (Online)**, Vol. 39 No. 4 July 2013
- SOUSA, F. A. S.; LIMEIRA, R. C. 2006 Uso de Análise Multivariada na Regionalização de Cheias do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 11 n.4 Out/Dez 2006, 15-24.
- SZOLLOSI-NAGY, A. (1976). Introductory remarks on the state space modeling of water resource systems. **Int. Inst. for Applied Systems Analysis**, RM-76-73, 81p.
- TAMIOSSO, M. F. 2012. **Avaliação do Método Silveira com Uso de dois Modelos Chuva-Vazão para Estimativa de Disponibilidade Hídrica em Pequenas Bacias com Pequena Amostragem de Vazão**. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. 97 p.
- TENG, J., VAZE, J., TUTEJA, N.K., GALLANT, J., 2008. A GIS based tool for spatial and distributed hydrological modelling: CLASS spatial analyst. **Trans. GIS**. v.12, n.2, p.209–225.

- TENG, J., CHIEW, F.H.S., VAZE, J., MARVANEK, S., KIRONO, D.G.C., 2012. Estimation of climate change impact on mean annual runoff across continental Australia using Budyko and Fu equations and hydrological models. **J. Hydrometeorol.** 13 (3), 1094–1106.
- TUCCI, C. E. M (2002). **Regionalização de Vazões**. UFRGS Porto Alegre - RS, 256p.
- TUCCI, C. E. M (2005). **Modelos Hidrológicos**. UFRGS Porto Alegre - RS, 678p.
- TUCCI, C.E.M. et al.; **Regionalização de Vazões do Rio Grande do Sul**. Relatório Técnico. v1. p 51-57. 1991.
- VENDRUSCOLO, J. 2005 **Regionalização dos parâmetros de um modelo chuva-vazão para estimativa de vazões em bacias sem monitoramento sistemático**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. 82pp.
- WAGENER, T.; WEATHER, H. S. 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. **Journal of Hydrology** v.320, p 132-154, 2006.
- WAGENER, T.; WEATHER, H. S.; GUPTA, H. V. 2004 Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. **Imperial College Press. Londres**. 306pp.
- WARRACH-SAGI, K.; WULFMEYER, V. 2010 STREAMFLOW data assimilation for soil moisture analysis. **Geosci. Model Dev.**, 3, 1-12, doi:10.5194/gmd-3-1-2010.
- WÖHLING, TH.; LENNARTZ, F. & ZAPPA, M. (2006). Technical Note: Real-time updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 10, p.783–788.
- XIE, X.; ZHANG, D. Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 6, p. 678-690, Mar 2010.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v.204 pp. 83-97. 1998
- YOUNG, A. R. Streamflow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v.320, n1–2, p. 155–172. 2006.
- ZHANG, Y.Q.; CHIEW, F.H.S. Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. **Water Resources Research**. V.45, W07412. 2009.
- ZHANG, Y.; VAZE, J.; CHIEW, F.; TENG, J.; LI, M. Predicting hydrological signatures in ungauged catchments using spatial interpolation, index model, and rainfall–runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v517, p 936–948, 2014.
- ZHANG, Y.; VAZE, J.; CHIEW, F.; TENG, J.; LI, M. Comparing flow duration curve and rainfall–runoff modelling for predicting daily runoff in ungauged catchments. **Journal of Hydrology**, v525, p 72–86, 2015.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

ANEXO A

VALORES DOS PARÂMETROS FIXOS USADOS NO MODELO

ALBEDO													
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FSR		0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
FSP		0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
CSR		0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
CSP		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ASR		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ASP		0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
AGUA		0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
IAF	INDICE DE ÁREA FOLIAR												
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FSR		6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
FSP		7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
CSR		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
CSP		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
ASR		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
ASP		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
AGUA		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Z	ALTURA DAS ARVORES												
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FSR		7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
FSP		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
CSR		0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
CSP		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
ASR		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
ASP		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AGUA		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
RS	RESISTENCIA SUPERFICIAL												
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FSR		80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
FSP		99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
CSR		50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
CSP		60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
ASR		60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
ASP		70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
AGUA		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ANEXO B

VALORES DOS PARÂMETROS CALIBRAVEIS ESCOLHIDOS PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES COM E SEM ASSIMILAÇÃO DE DADOS

Conjunto de Parâmetros que originou melhor coeficiente Nash-Sutcliffe

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	74,45	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
FSP	152,60	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
CSR	74,45	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
CSP	152,60	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
APSR	74,45	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
APSP	152,60	0,17	0,11	2,42	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	19,14						
CI	118,95						
CB	2204,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros que originou melhor coeficiente Nash-Sutcliffe dos Logaritmos

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	77,95	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
FSP	200,20	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
CSR	77,95	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
CSP	200,20	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
APSR	77,95	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
APSP	200,20	0,15	0,29	1,51	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	18,62						
CI	79,35						
CB	4168,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros que originou menor Erro de Volume

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	86,10	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
FSP	121,80	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
CSR	86,10	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
CSP	121,80	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
APSR	86,10	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
APSP	121,80	0,18	0,32	6,76	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	7,94						
CI	84,90						
CB	9884,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 1 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	68,70	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
FSP	138,60	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
CSR	68,70	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
CSP	138,60	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
APSR	68,70	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
APSP	138,60	0,16	0,30	3,07	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	16,77						
CI	90,30						
CB	1836,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 2 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	75,85	0,17	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
FSP	135,40	0,17	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
CSR	75,85	0,17	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
CSP	135,40	0,17	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
APSR	75,85	0,17	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
APSP	135,40	0,16	0,32	3,17	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	17,55						
CI	82,20						
CB	2420,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 3 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	86,55	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
FSP	130,80	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
CSR	86,55	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
CSP	130,80	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
APSR	86,55	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
APSP	130,80	0,19	0,27	4,00	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	15,23						
CI	98,25						
CB	2244,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 4 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	79,40	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
FSP	128,20	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
CSR	79,40	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
CSP	128,20	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
APSR	79,40	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
APSP	128,20	0,17	0,25	3,51	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	16,05						
CI	109,80						
CB	3392,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 5 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	75,55	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
FSP	125,00	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
CSR	75,55	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
CSP	125,00	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
APSR	75,55	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
APSP	125,00	0,17	0,36	3,08	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	16,02						
CI	70,20						
CB	2568,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

Conjunto de Parâmetros Nº 6 escolhido aleatoriamente na Região de Pareto

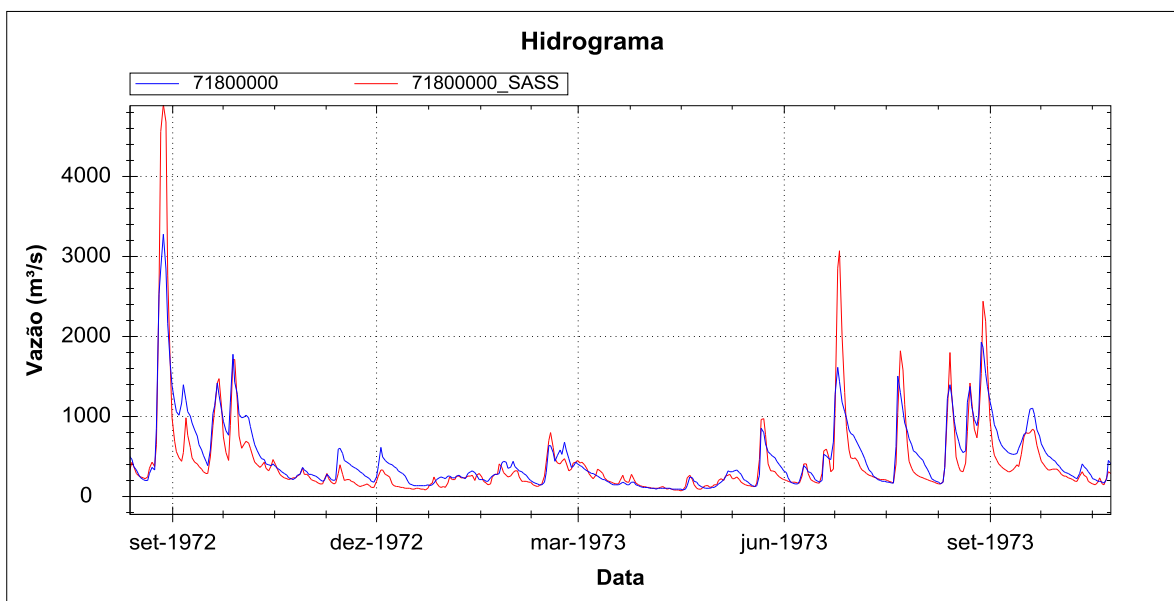
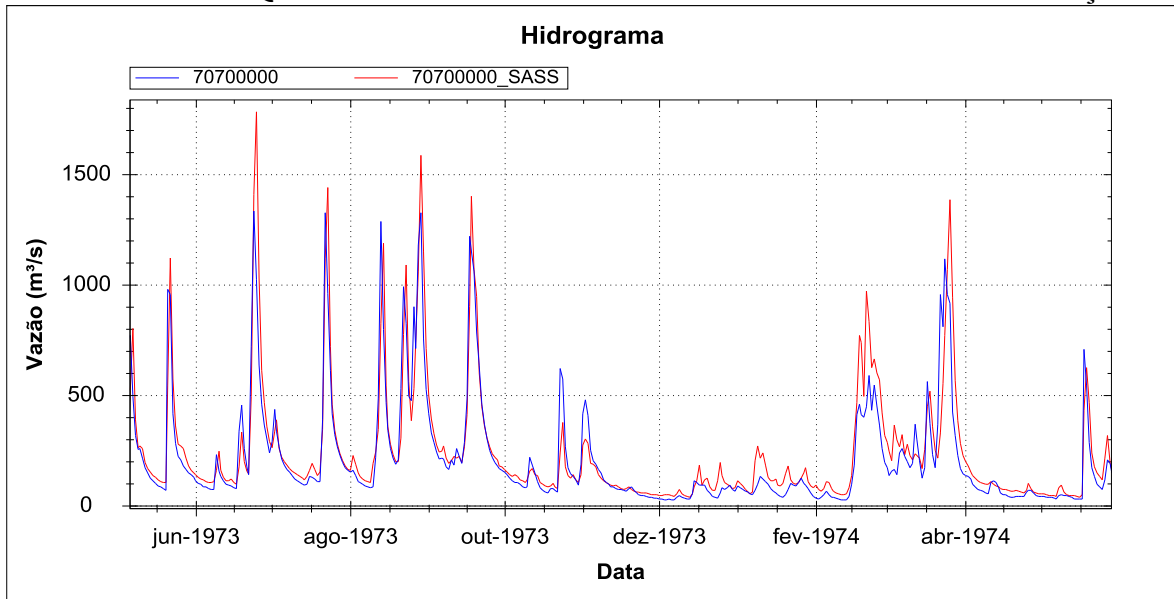
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	76,85	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
FSP	127,00	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
CSR	76,85	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
CSP	127,00	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
APSR	76,85	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
APSP	127,00	0,19	0,25	4,38	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	15,30						
CI	94,65						
CB	3448,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

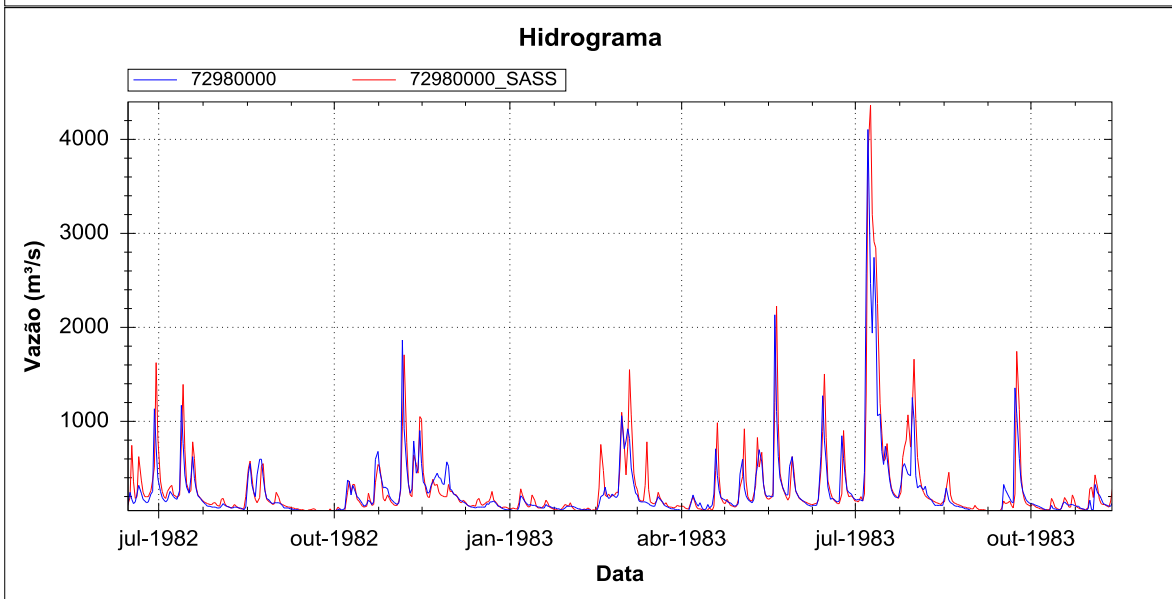
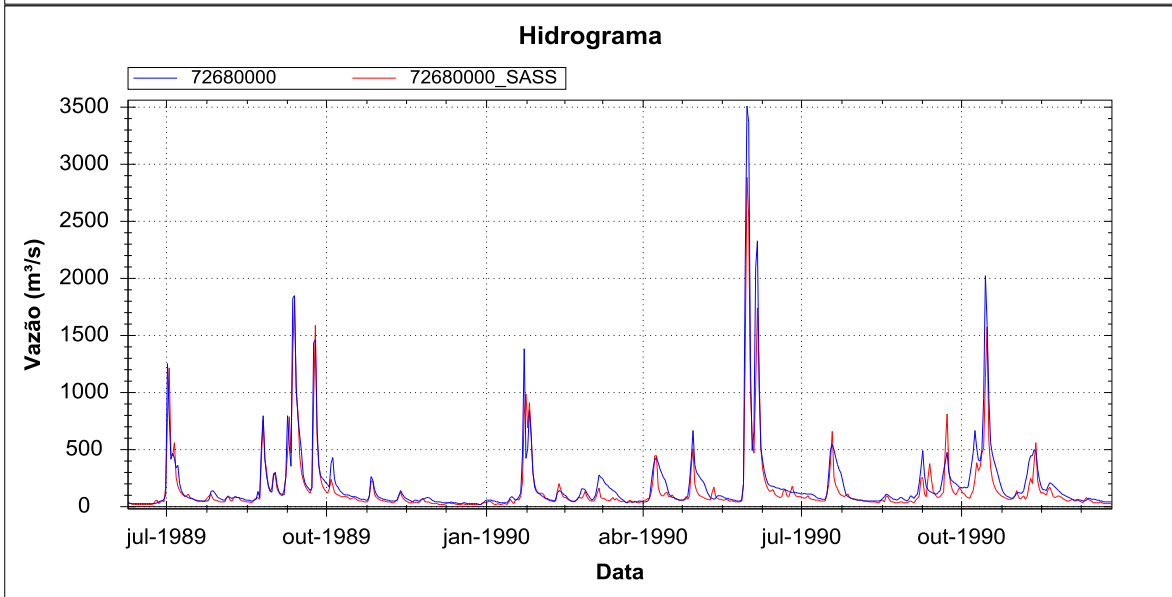
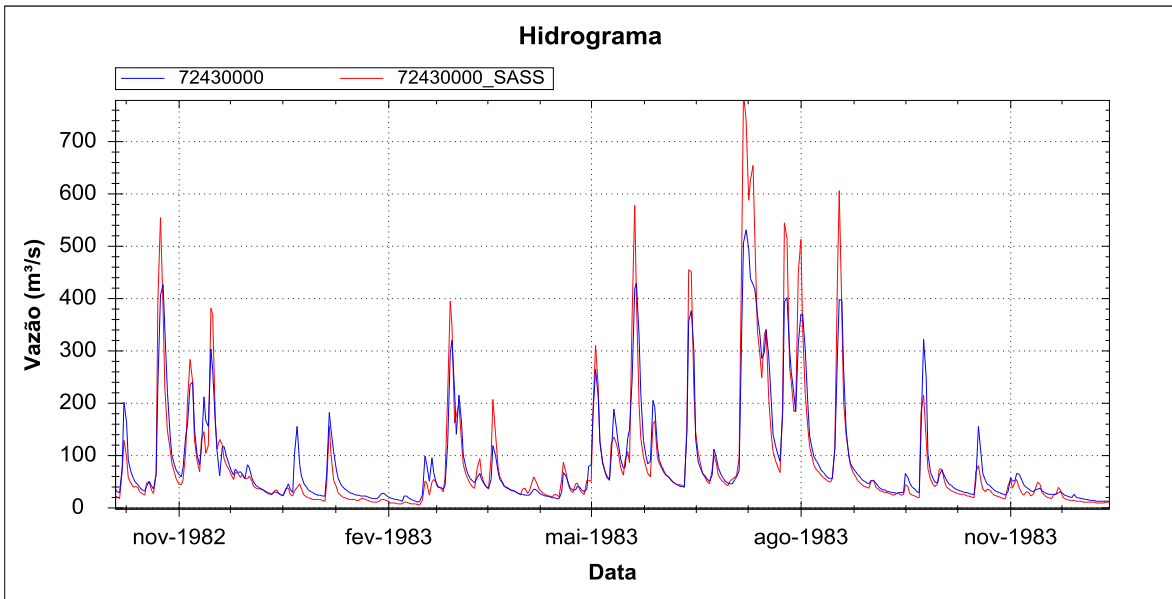
Conjunto de Parâmetros Nº 7 escolhidos aleatoriamente na Região de Pareto

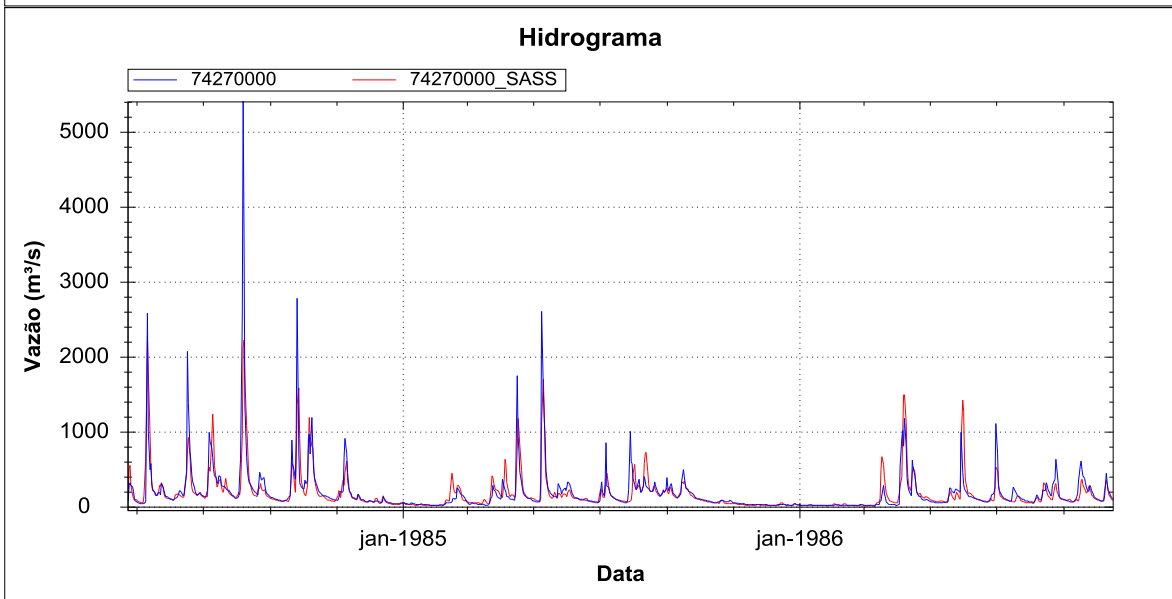
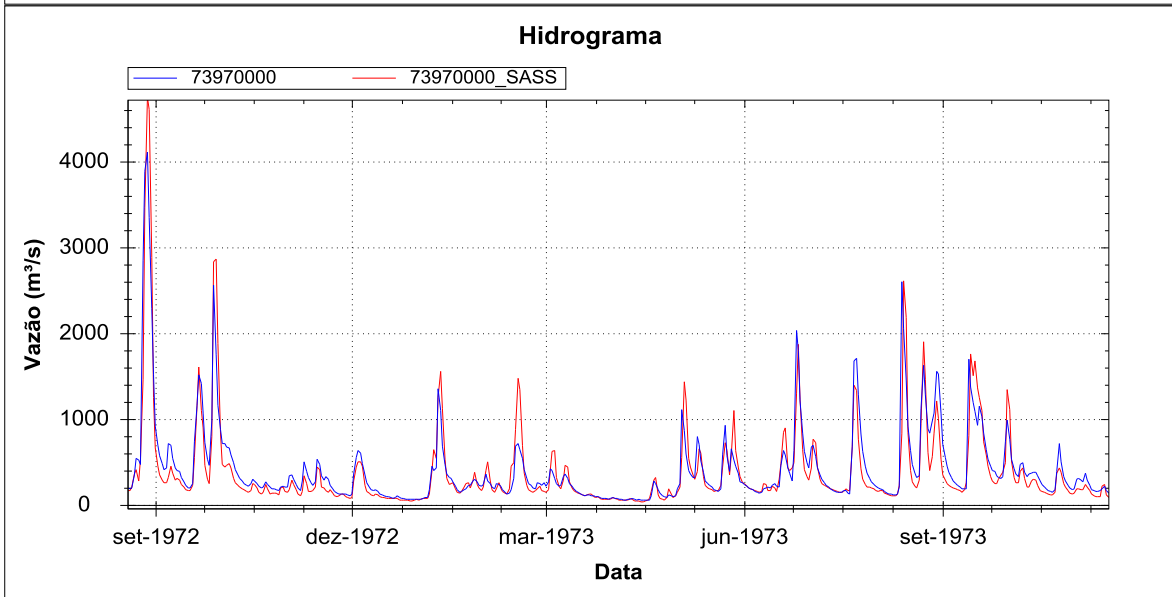
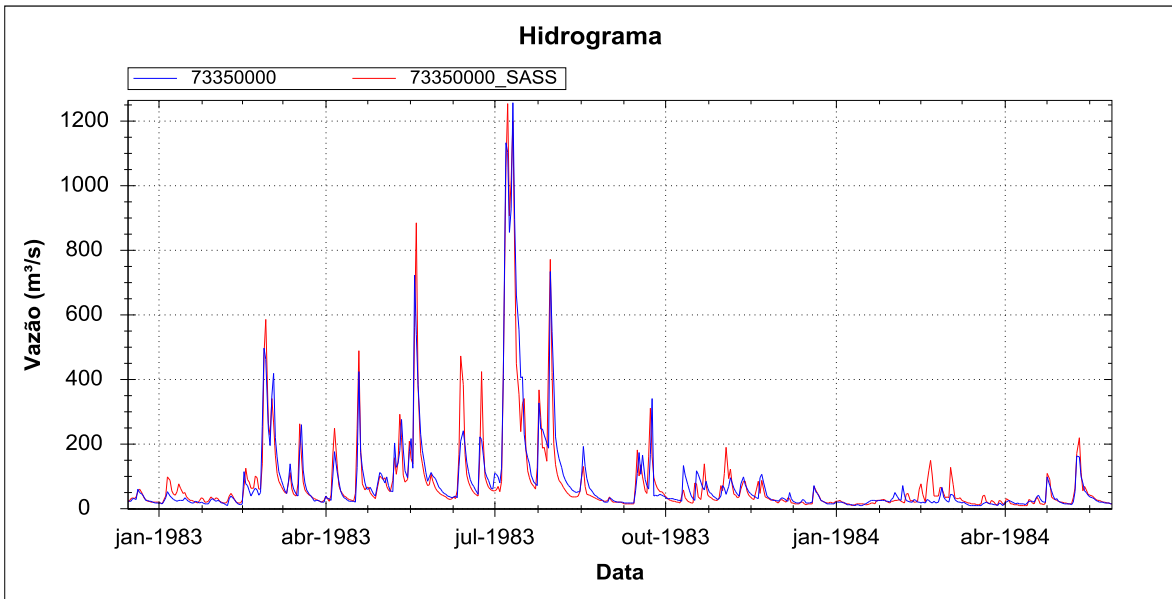
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FSR	71,65	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
FSP	130,60	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
CSR	71,65	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
CSP	130,60	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
APSR	71,65	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
APSP	130,60	0,17	0,26	5,06	0,67	0,0	0,10
AGUA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
CS	15,23						
CI	95,85						
CB	3924,00						
QB_M3/SKM2	0,015						

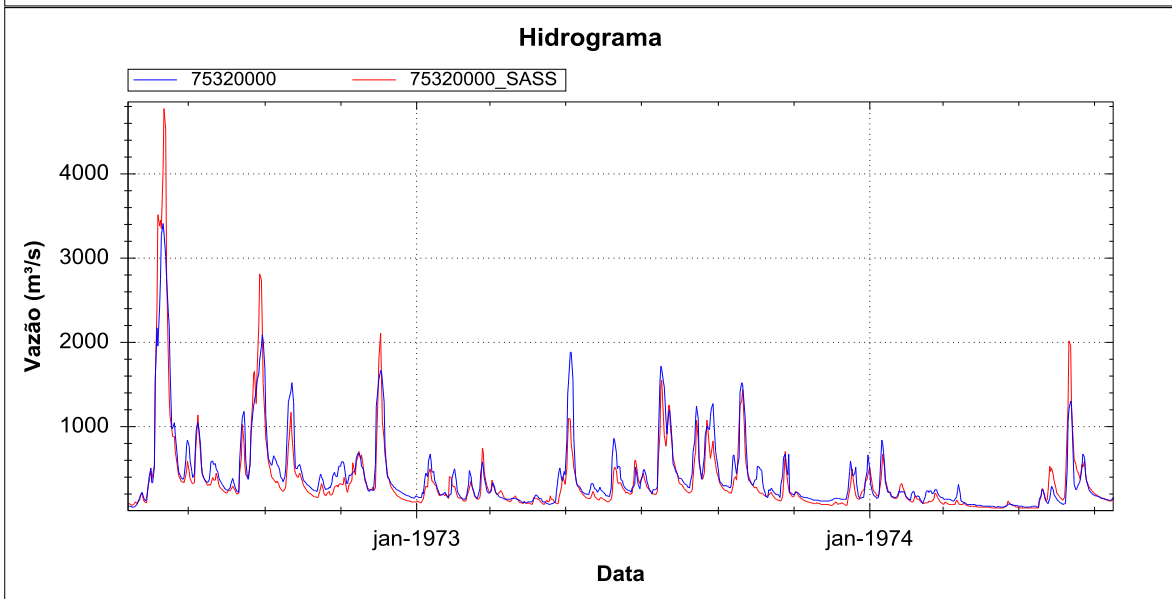
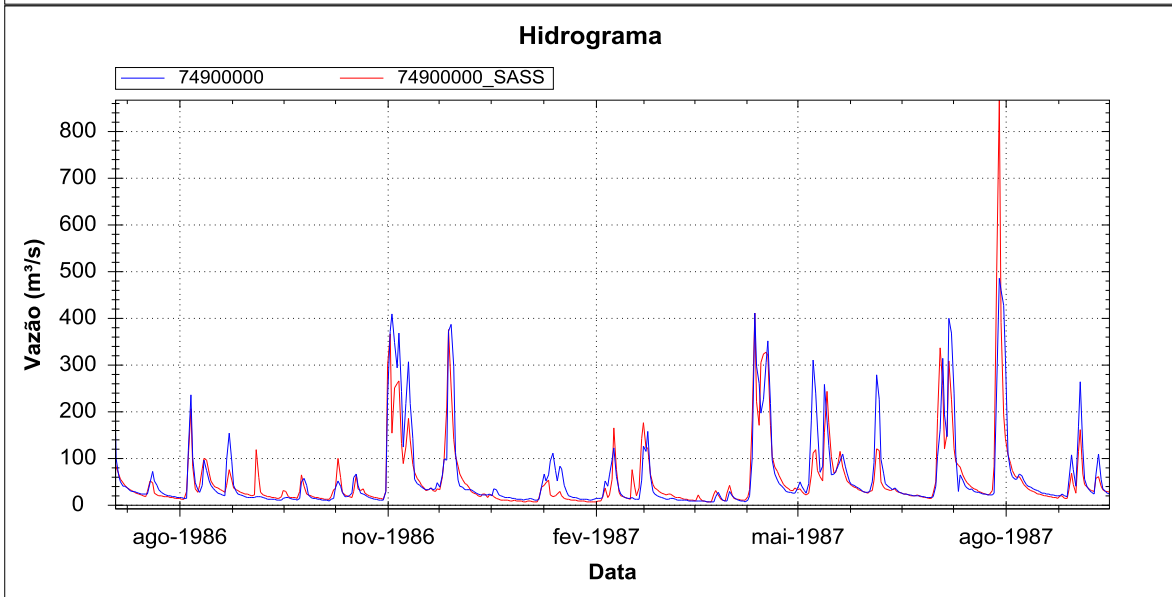
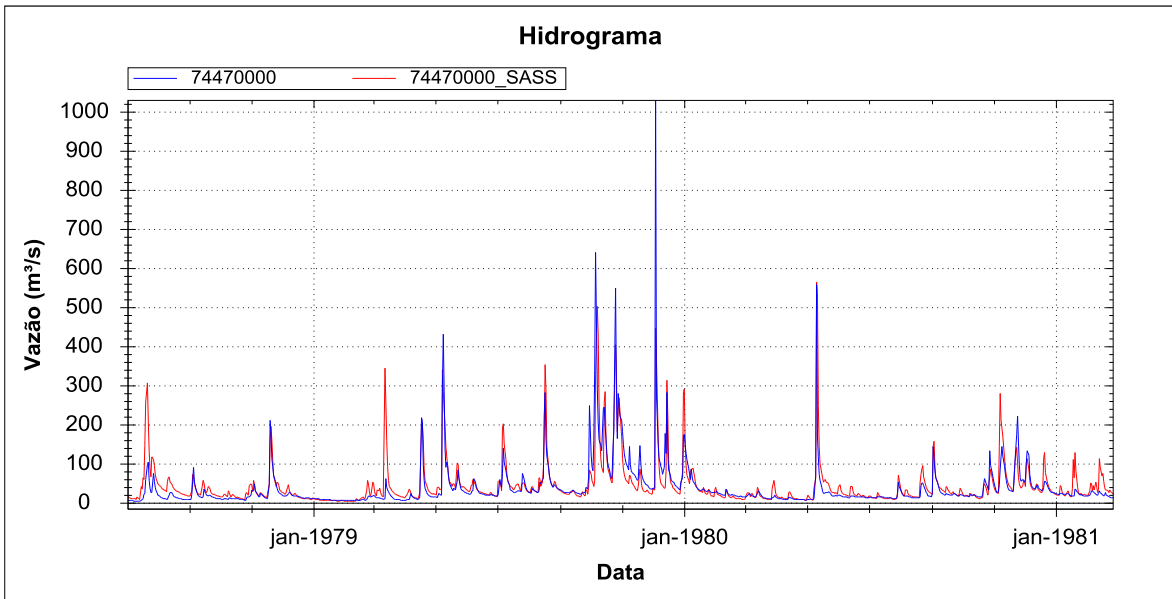
ANEXO C

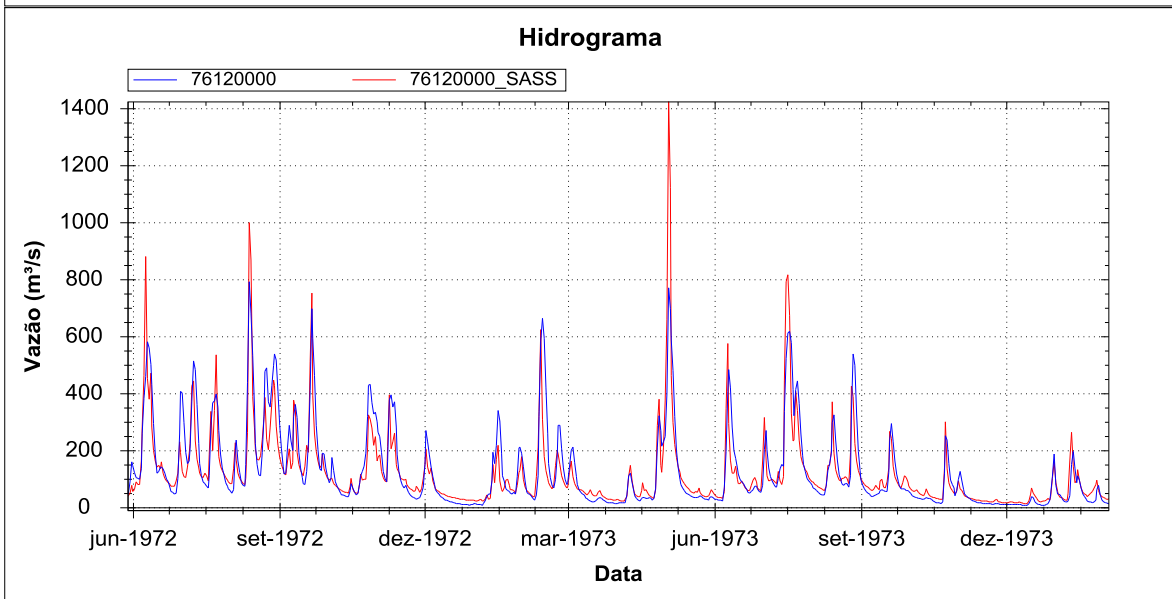
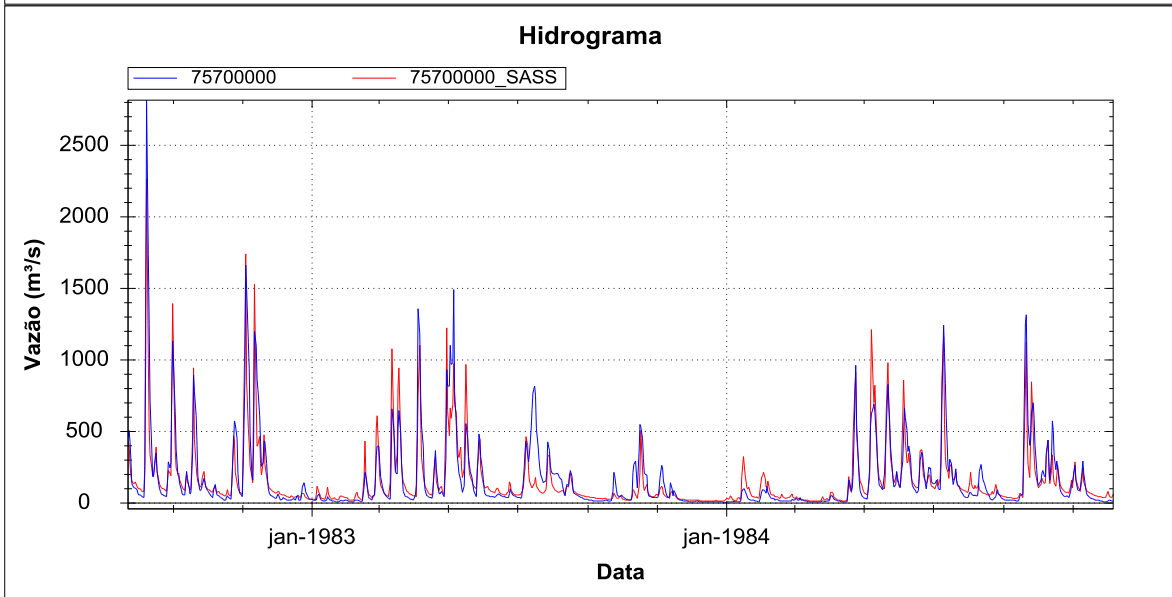
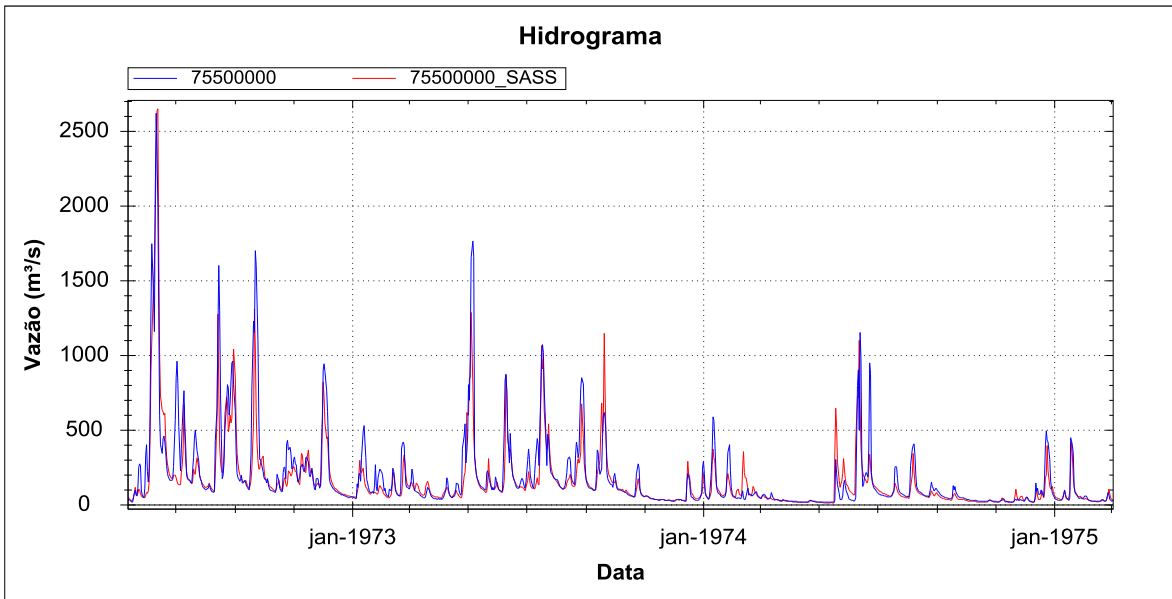
HIDROGRAMAS OBSERVADOS E CALCULADOS UTILIZANDO O CONJUNTO DE PARAMETROS QUE ORIGINA O MENOR ERRO DE VOLUME NA CALIBRAÇÃO

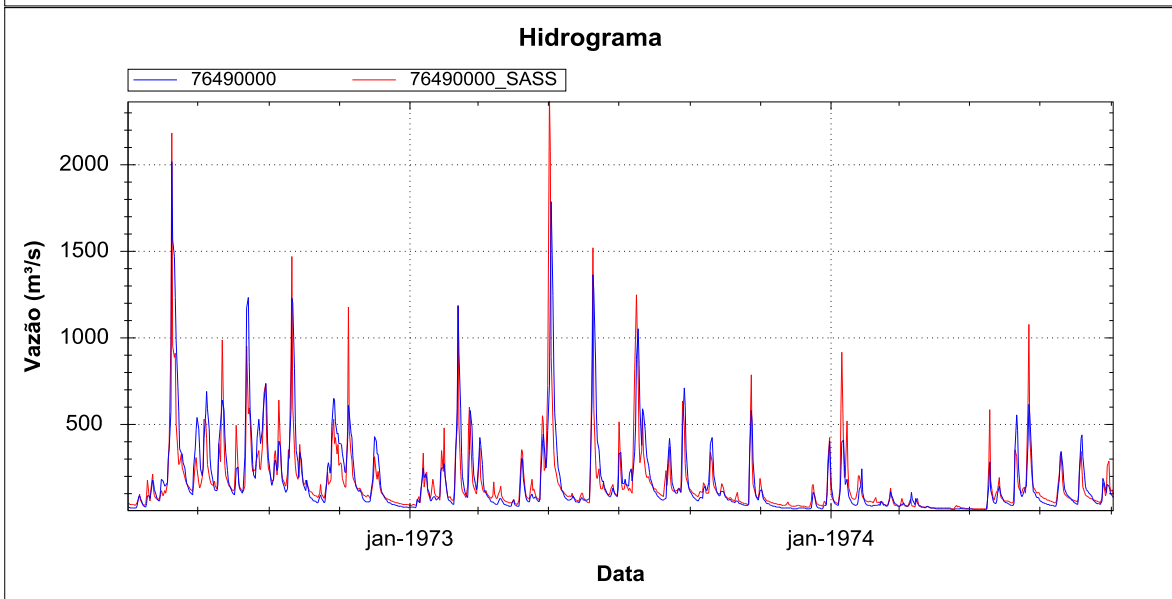
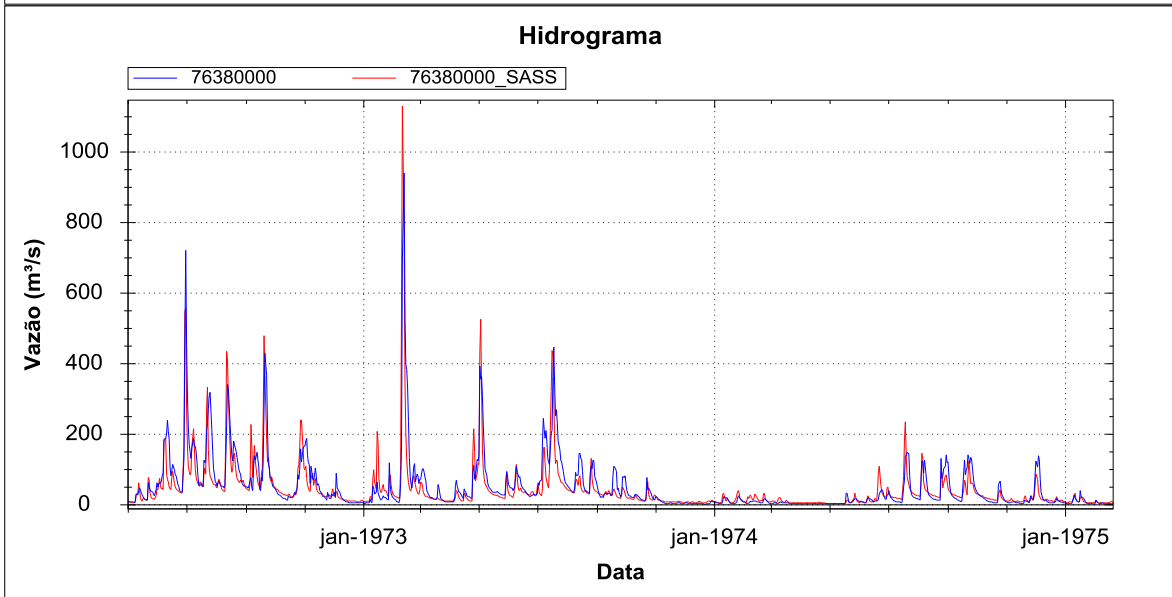
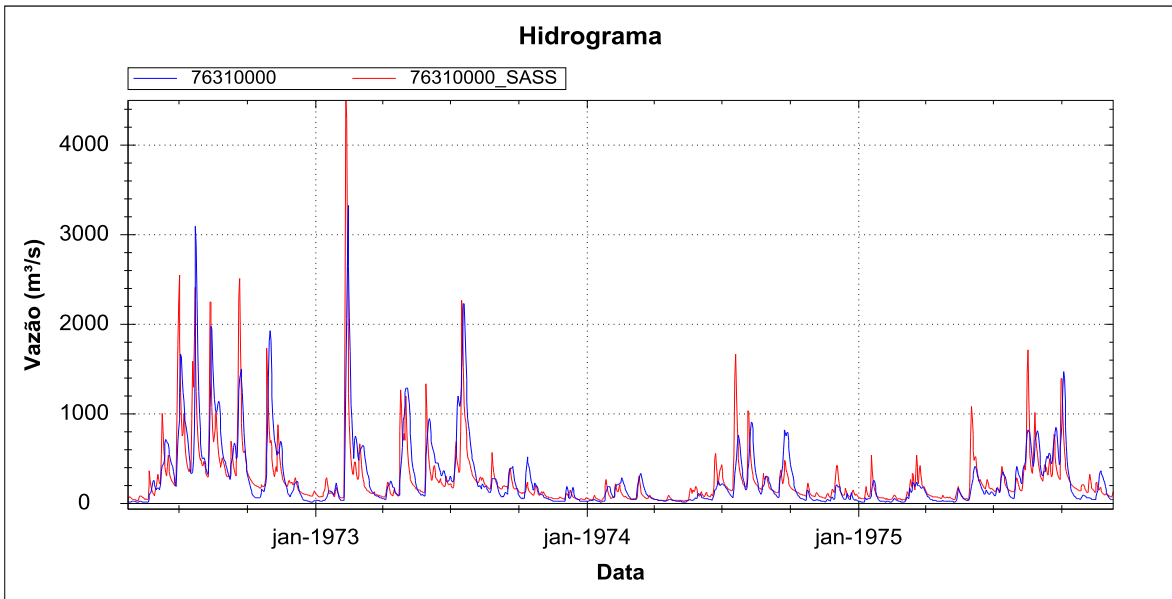


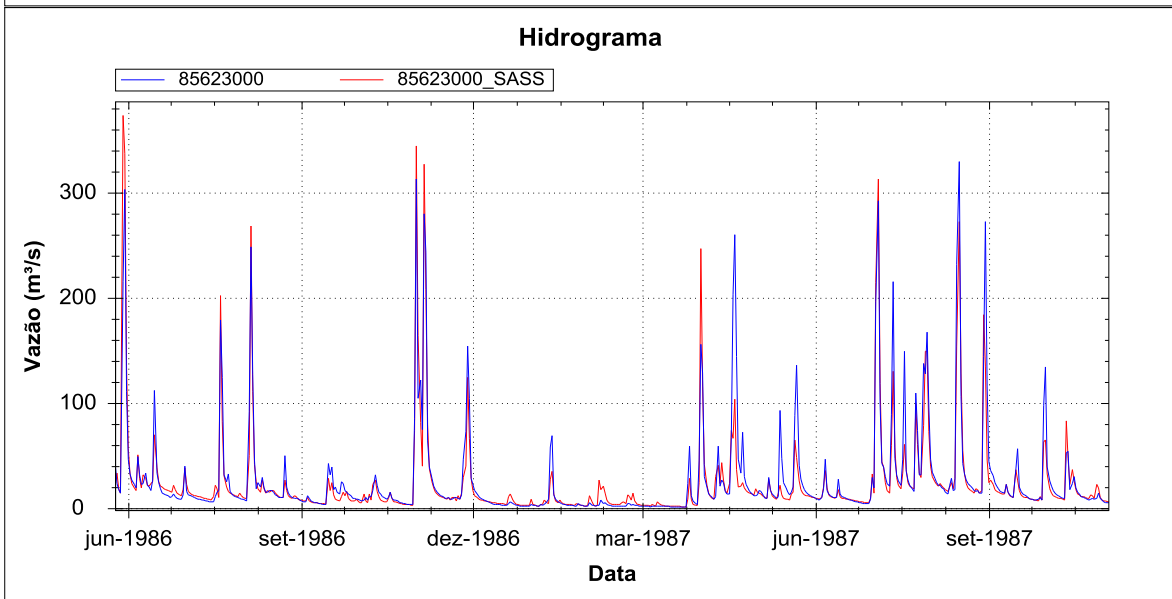
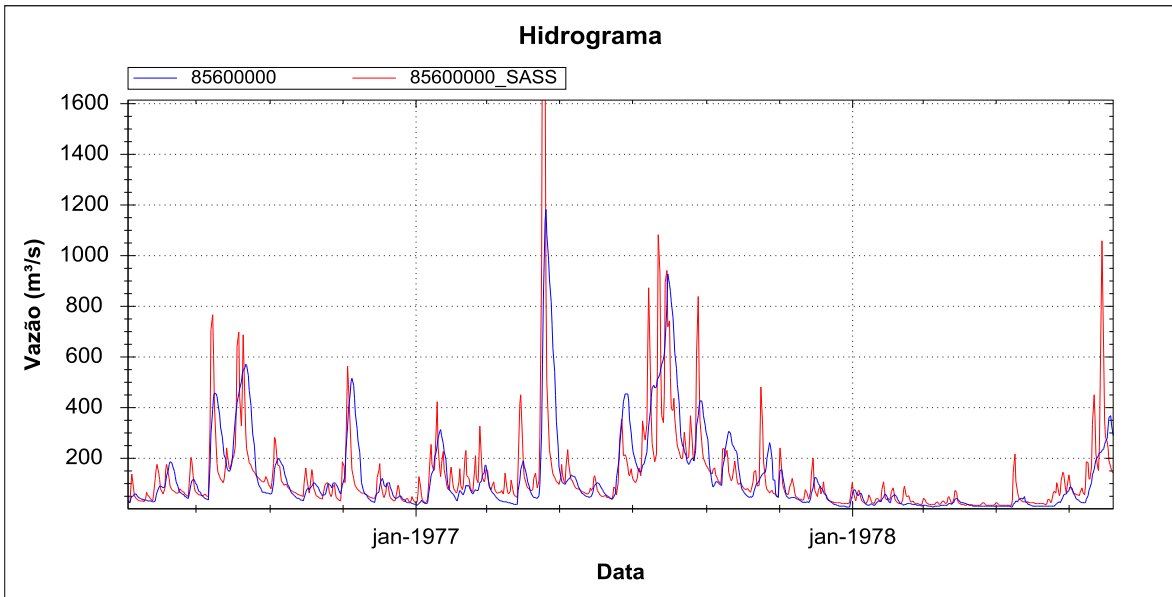
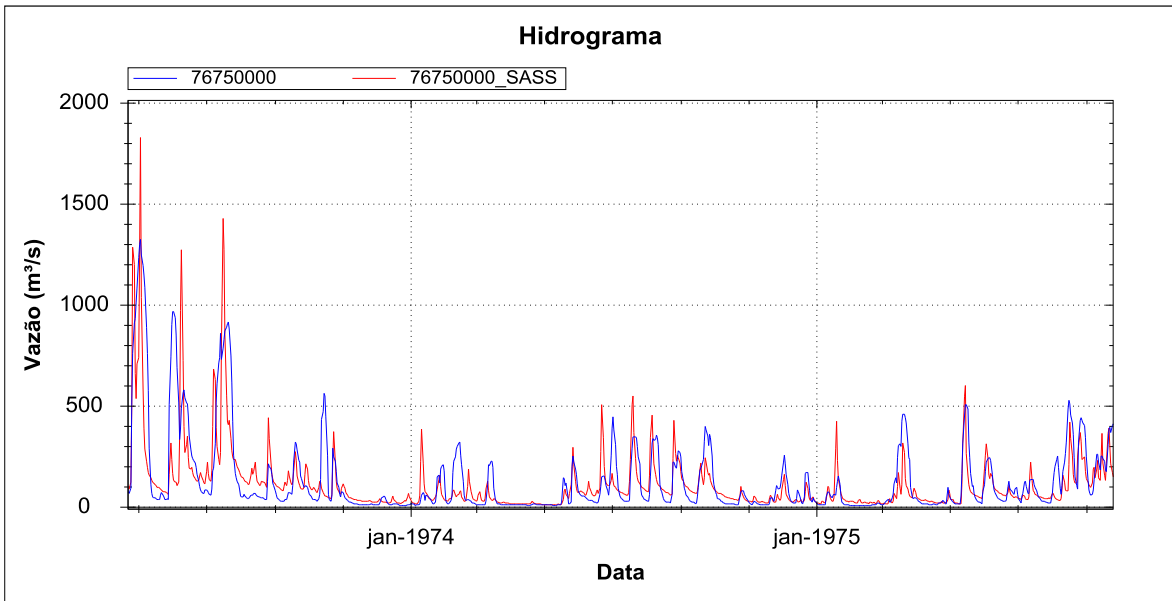


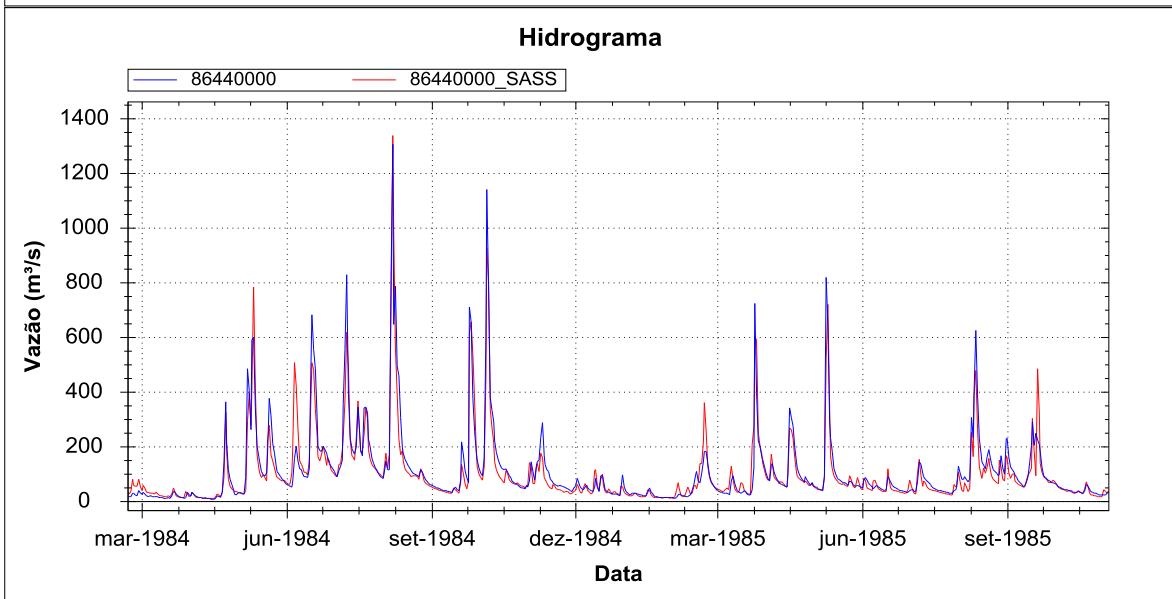
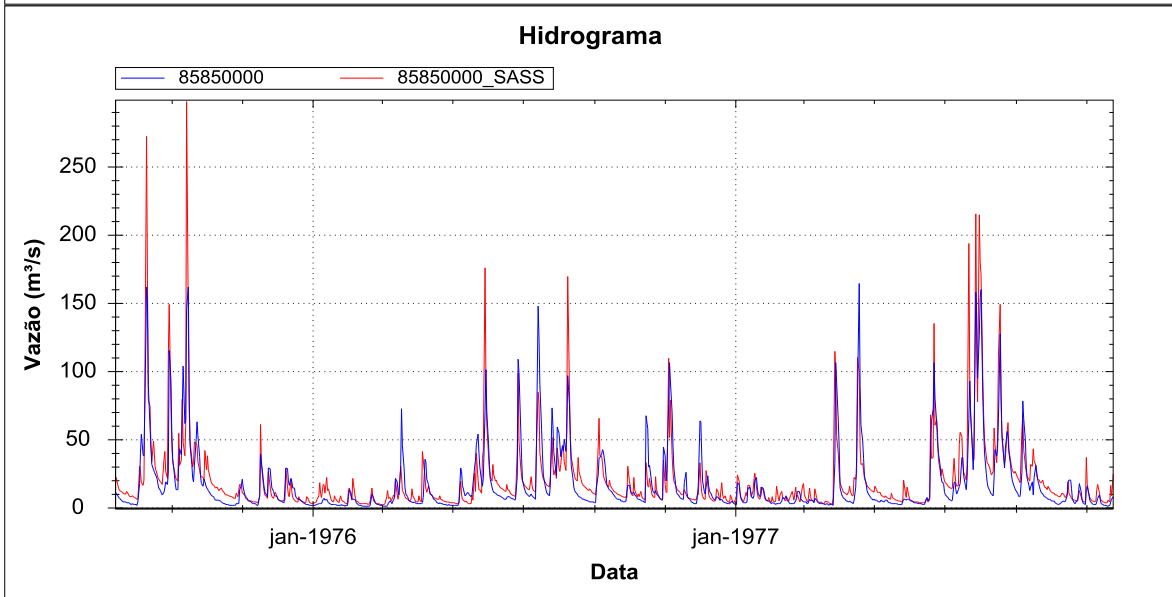
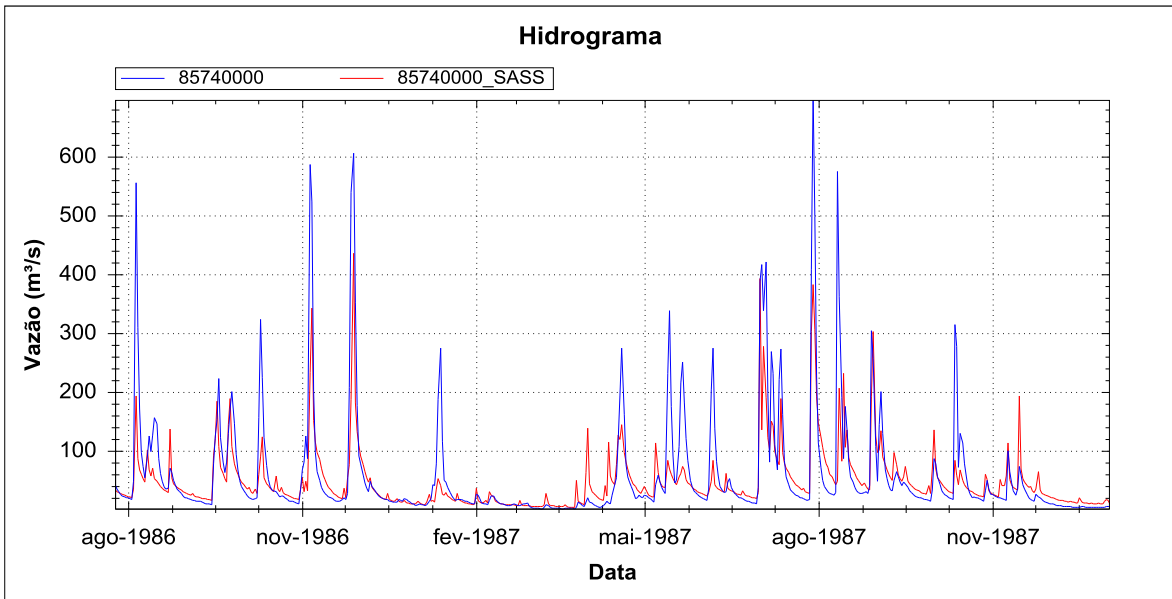


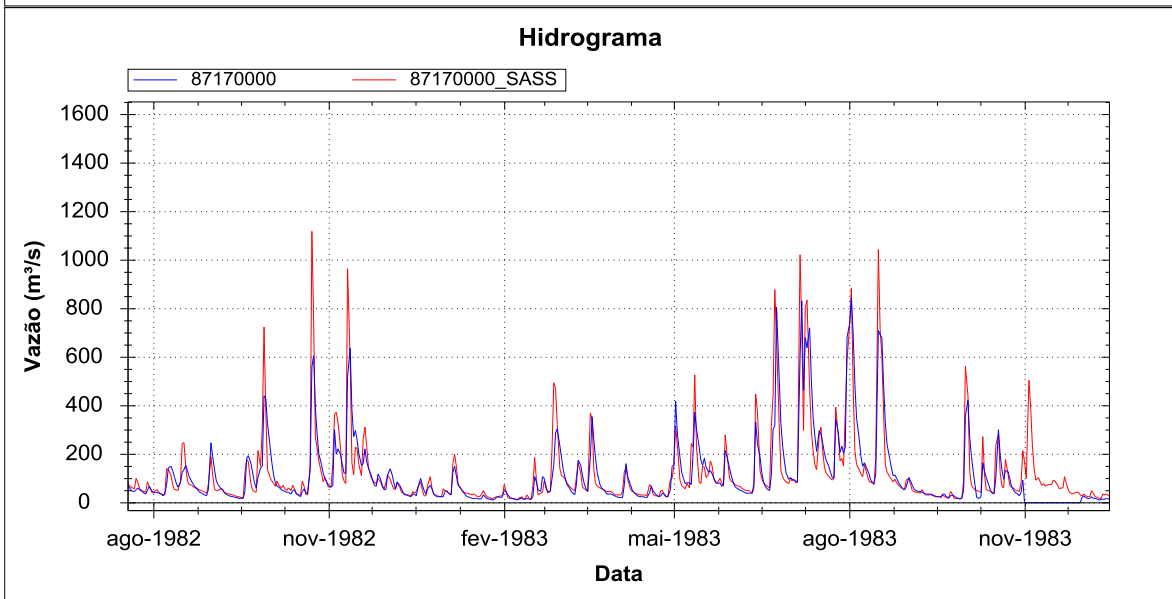
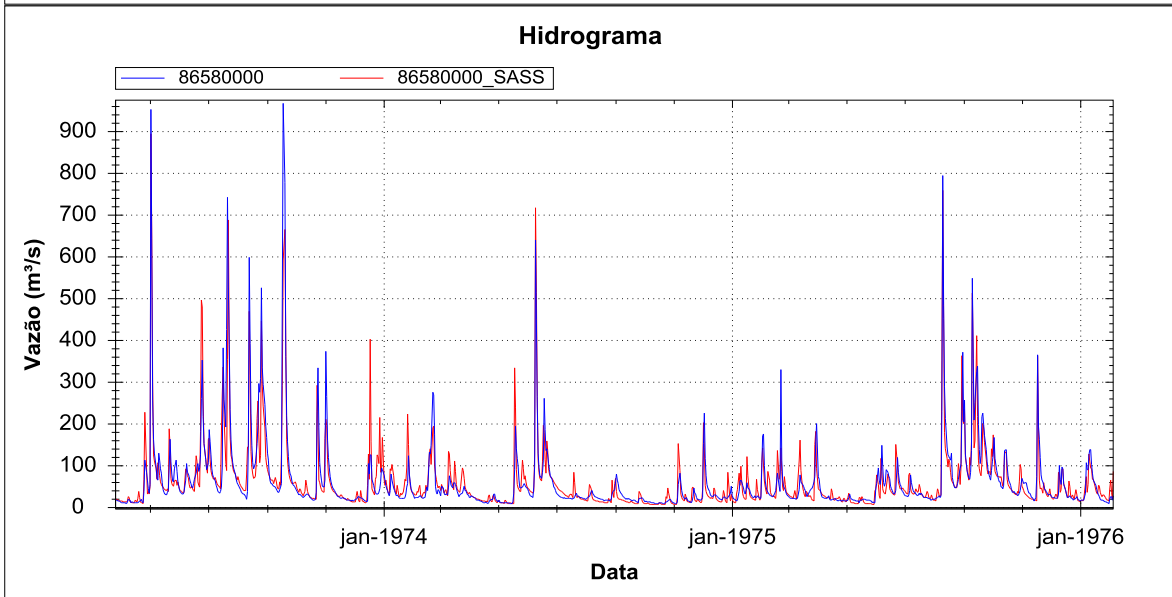
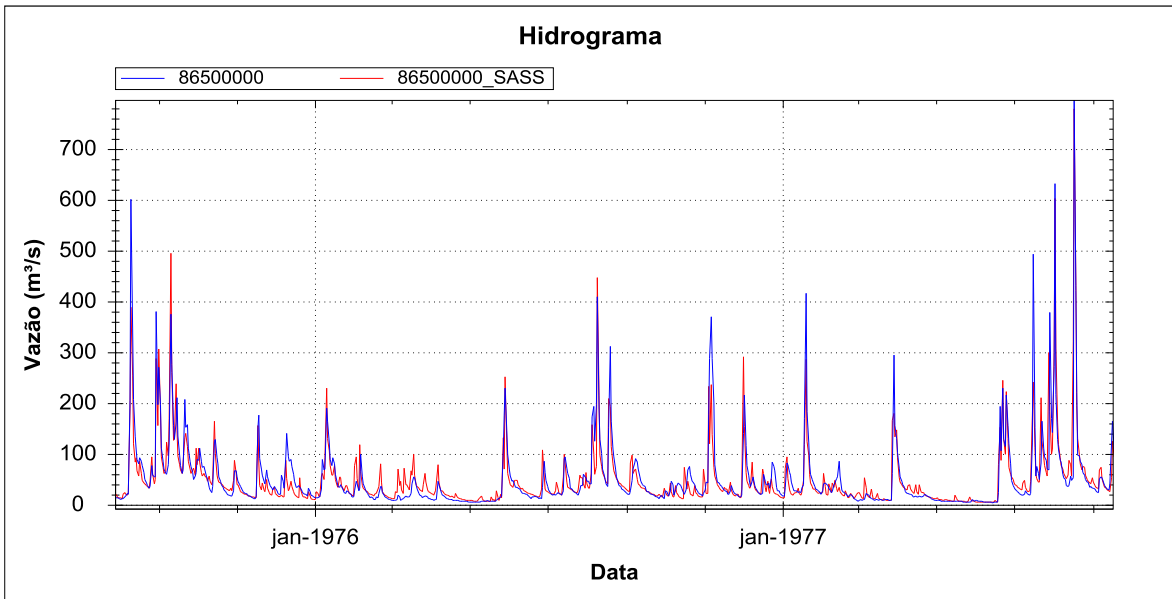


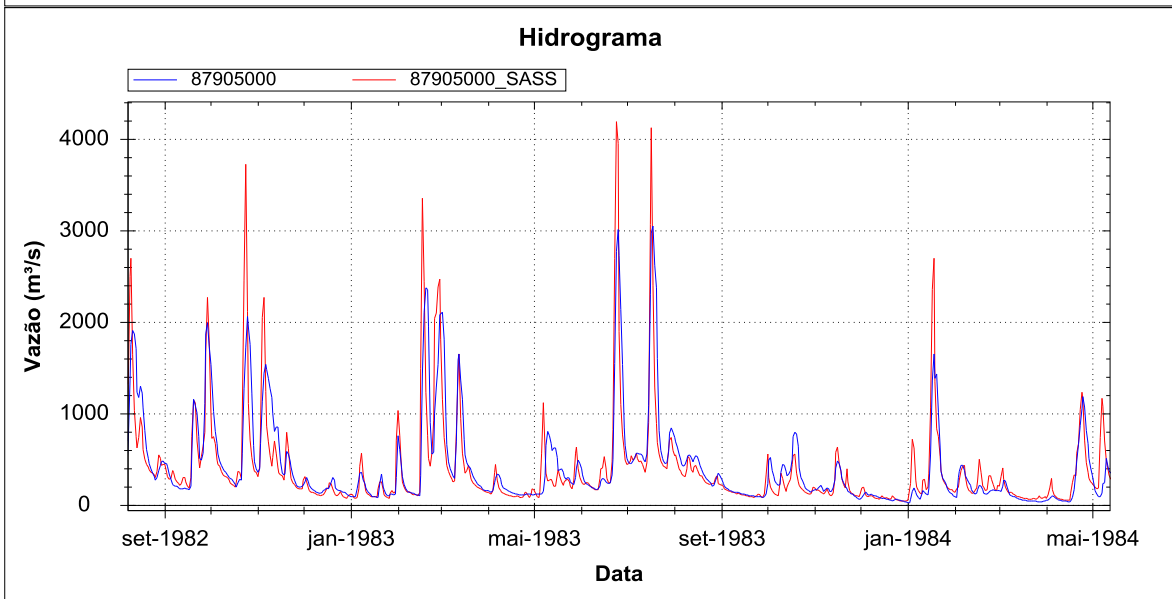
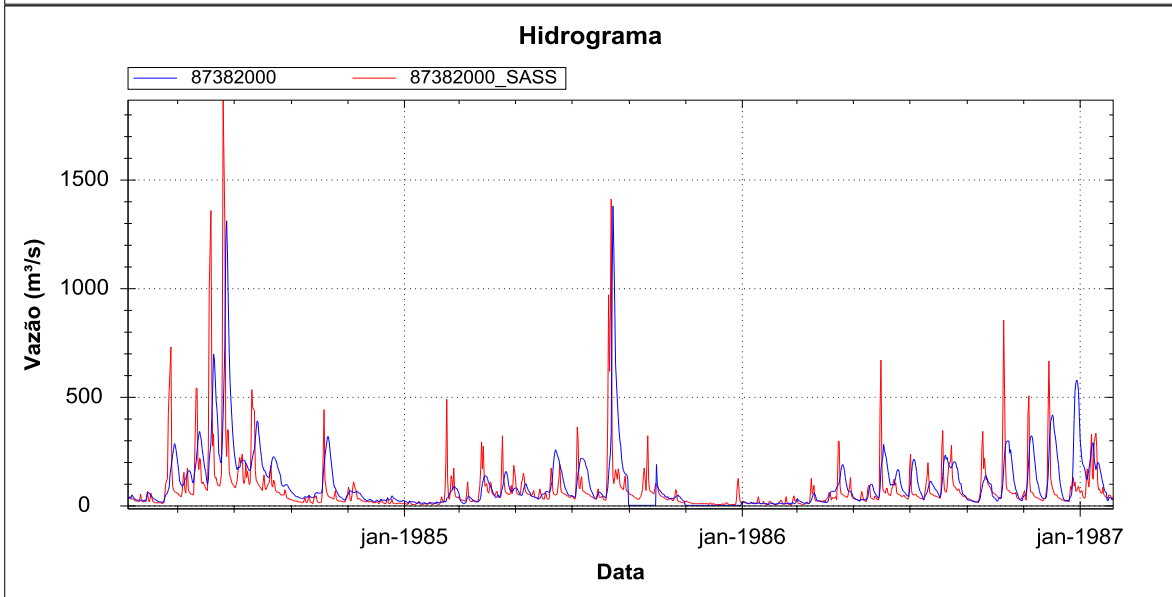
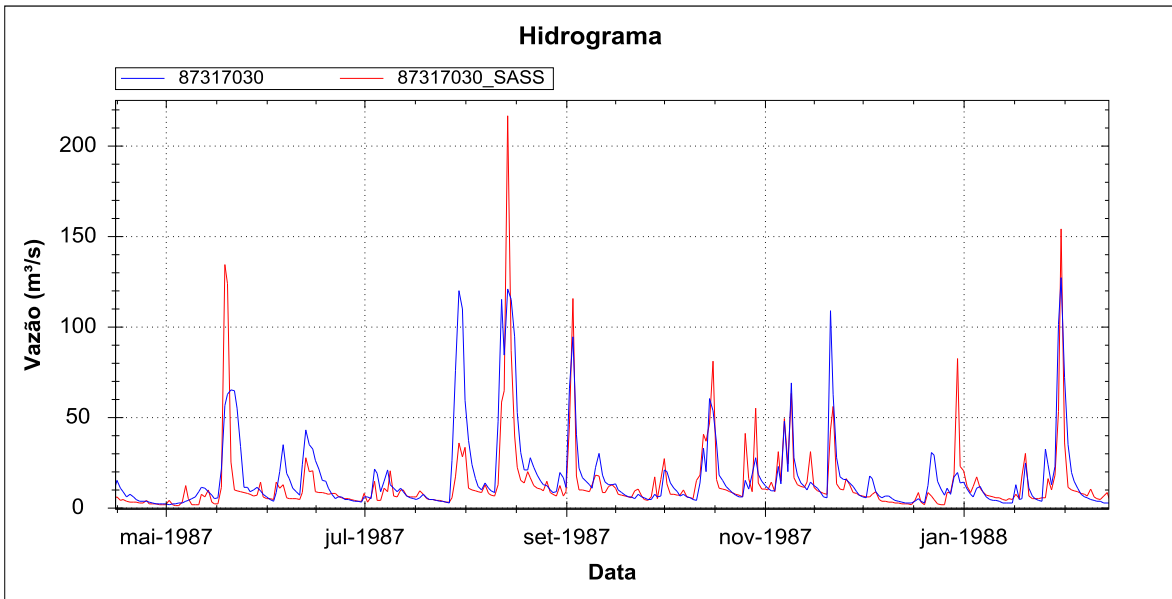


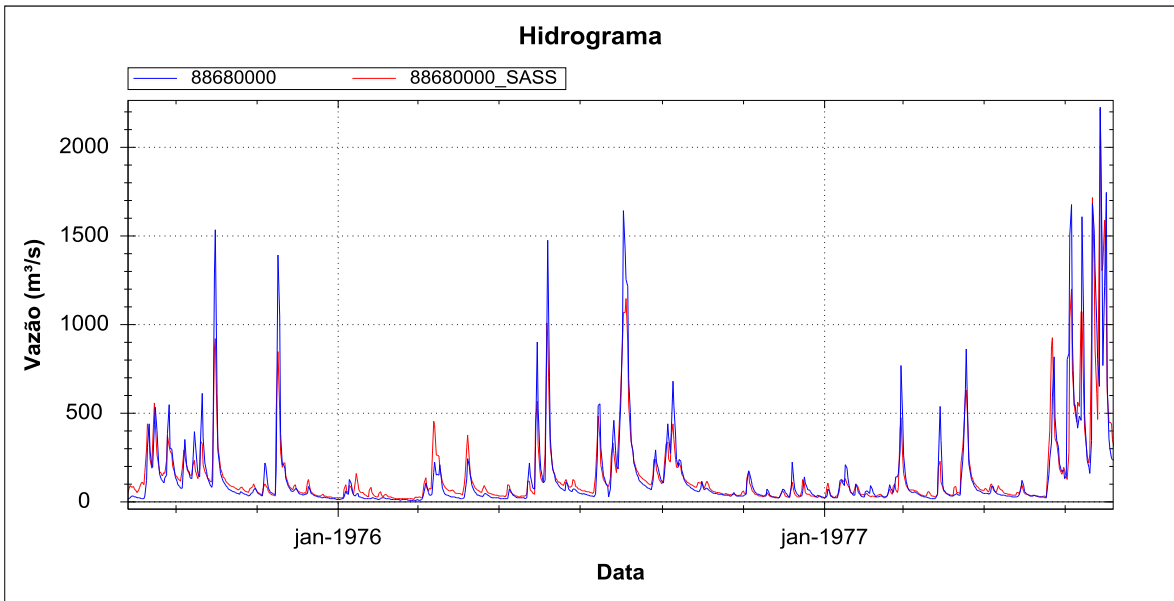












ANEXO D

HIDROGRAMAS OBSERVADOS E CALCULADOS COM ASSIMILAÇÃO E SEM ASSIMILAÇÃO DE DADOS UTILIZANDO O CONJUNTO DE PARAMETROS QUE ORIGINA O MENOR ERRO DE VOLUME NA CALIBRAÇÃO

