



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE ESCALA DIÁRIA PARA
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO CEARENSE

FORTALEZA
2017

WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE ESCALA DIÁRIA PARA
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Coorientador: Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P496c Pereira, Walter Jhameson Xavier.
Calibração de um modelo hidrológico de escala diária para bacias hidrográficas do semiárido cearense / Walter Jhameson Xavier Pereira. – 2017.
85 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.
Coorientação: Prof. Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior.
1. Modelo hidrológico. 2. SMAP diário. 3. Chuva-vazão. 4. Calibração . 5. Semiárido. I. Título.
CDD 628
-

WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE ESCALA DIÁRIA PARA BACIAS
HIDROGRÁFICAS DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em: 07/07/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior (Coorientador)

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

Me. Daniel Antônio Camelo Cid

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Victor Costa Porto

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Nelcilene e Valter, pelo esforço e amor incondicional.

Aos meus irmãos, Juliana e Jonas.

A minha prima, Anastácia Santos, por todos os ensinamentos e incentivo.

A minha mentora e amada tia Anazira Santos (*In Memoriam*) por ter acreditado em mim desde os meus primeiros passos nessa grande jornada.

A minha grande amiga e companheira, Taís Maria.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao criador do universo, por iluminar os meus passos e por me dar saúde e inteligência para vencer na vida.

Aos meus pais que mesmo sem instrução acadêmica fizeram de tudo para dar o melhor de si em prol da educação dos filhos. Em especial a minha mãe, Nelcilene, pelo amor incondicional, compreensão, e por me ensinar a ser resiliente perante as adversidades da vida. E por ser uma grande mulher, altruísta, que abdicou de diversos sonhos para dar uma vida melhor para os filhos. Obrigado por sempre acreditar em mim. Ao meu pai, por ser um exemplo de empreendedor e por nunca deixar faltar nada na vida dos filhos.

Aos meus irmãos, em especial a minha irmã Juliana, que sempre foi uma grande amiga. Me recebeu, cuidou de mim como um filho e se doou em prol das minhas conquistas.

A minha namorada Taís Maria por me completar e por me amar incondicionalmente. Por tornar a rotina durante a graduação mais leve, por compartilhar conhecimentos e servir de inspiração diária com o seu jeito singelo e carinhoso dando sempre o melhor de si em tudo que faz.

A minha prima e segunda mãe, Anastácia Santos, por todo incentivo, dedicação e por todo o auxílio na minha vida acadêmica. Obrigado por ser uma das minhas maiores motivadoras e a ser exemplo de pessoa e profissional que eu quero seguir.

A minha querida e amada tia, Anazira Santos (*In Memoriam*), por sempre acreditar no poder de transformação da educação, por ter acreditado no meu potencial e por ter investido em mim desde de muito cedo.

Ao Professor Assis, por ser um exemplo de docente a ser seguido, pela orientação, “*insights*”, atenção e compreensão. Por ter instigado em mim a minha paixão pela Hidrologia e por me ensinar a como ser o melhor na sua profissão dando aula sempre com um sorriso no rosto.

Ao Coorientador, Junior (Junim), pelos ensinamentos, conselhos, amizade, compreensão e ajuda mesmo nos momentos mais difíceis desse trabalho.

A minha tia Noima (Obinha), por investir no meu inglês que me ajudou tanto na minha carreira acadêmica e por me receber sempre com um belo sorriso no rosto.

A minha grande amiga Ana Paula Lima, por todos os anos de amizade, pelos conselhos e por me ensinar a levar a vida de um jeito mais leve e descontraído.

Aos amigos Josivaldo Alves, José Luiz, Selminha, Janderson Rocha, Vanessa Lemos, Valério, Gertrud, Pablo Lessa, Aurora Marçal, Estélio de Paula, Suyanne (Susu), Inácio e Ana Paula Pereira por dividir a dádiva da vida, por torna a rotina mais leve e pela amizade.

A todos os professores que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação acadêmica, em especial aos professores Assis Filho, Ana Bárbara, André Bezerra, Anderson Borghetti, Capelo Neto, Marisete Dantas e Paulo Igor. As professoras do IFCE Maracanaú Karine Bastos, Adriana Rocha e Rossana Silveira pela paciência e ensinamentos no início da minha graduação. Em especial a Profa. Karine Bastos que me aconselhou e me guiou quando eu precisei.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e aos idealizadores do programa Ciências sem Fronteiras pelo financiamento e pela oportunidade singular que foi divisora de águas na minha vida. Muito obrigado!

Ao programa ERASMUS Mundus e ao Professor Estêvão Rolim pelo financiamento e por me proporcionar uma experiência sensacional na Áustria.

Aos meus colegas de Engenharia Ambiental Ariadne, Allan Clemente, Aparecida Melo, Deiby, Karine Nunes, Mariana Rios, Mateus Alencar, Natanael Sancho, Raquel Braga e Silvio Duarte pelos infinitos trabalhos concluídos, pelo companheirismo, amizade e por tornar o curso mais motivante.

A todos que fazem e que fizeram parte do Grupo de Pesquisa HIDROSED, em especial ao Prof. José Carlos de Araújo, por ter me dado a oportunidade de ter contato com a pesquisa e de conhecer o poder transformador da ciência ainda no início da minha graduação. Também gostaria de expressar meus agradecimentos a todas as pessoas que fazem parte do Assentamento 25 de Maio, em Madalena, pela receptividade, generosidade e por despertar em mim uma visão de mundo muito mais holística.

Aos funcionários da secretaria do curso de Engenharia Ambiental pela presteza e solicitude, em especial aos ex-funcionários Dyego e Thayanne e as atuais Maíra e Cristina. Ao vice coordenador Prof. Fenando José pela paciência, presteza e agilidade durante os tramites burocráticos os quais necessitei.

A FUNCEME pela bolsa de transferência tecnológica, pela cessão dos dados e do algoritmo, e por toda a estrutura disponibilizada.

Aos colegas da sala do Chico e do Pirata na Funceme, pelos *Happy Hours* e descontração tornando o ambiente de trabalho mais leve e empolgante. Em especial, ao Pedro, Felipe e Luccas que trouxeram leveza para a rotina de trabalho. Ao colega Robson Franklin pela presteza e ajuda com os dados que foram essenciais para este trabalho.

A minha gata, Lia, por ser companheira de madrugadas e pelo carinho genuíno.

A todos que contribuíram direta e indiretamente à execução deste trabalho.

“Andá com fé eu vou. Que a fé não costuma
faiá.”

(Gilberto Gil)

Sonho também é resistência (...)
Acredite no poder da palavra desistir.
Tire o “D”, coloque um “R” que você tem:
RESISTIR.
Uma pequena mudança que nos enche de
esperança e faz a gente seguir.

(Bráulio Bessa)

RESUMO

O planejamento e a gestão eficiente dos recursos hídricos dependem fortemente da disponibilidade de dados hidrometeorológicos. Todavia, no Brasil, é comum a ausência de dados ou falhas nas séries existentes, principalmente, quando se trabalha com dados de vazão. No Ceará, há uma grande disponibilidade de dados de pluviométricos, entretanto, são poucos os postos fluviométricos com séries de dados longa o suficiente para a modelagem hidrológica. Nesse contexto, a modelagem chuva-vazão apresenta-se como uma alternativa a carência de dados, podendo ser utilizada para o preenchimento das falhas nas séries de vazão dos postos fluviométricos.

Neste trabalho, utilizou-se o modelo hidrológico conceitual e concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) para escala diária proposto por Lopes, Braga e Conejo (1982). Optou-se por utilizar o algoritmo evolucionário multiobjetivo MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*) para a calibração automática dos parâmetros do modelo. O modelo foi calibrado e validado para as bacias dos postos fluviométricos de Arneiroz (36020000), Icó (36290000), Iguatu (36160000) e Senador Pompeu (36470000), que são localizados próximos a reservatórios de alta relevância para o abastecimento de água do estado do Ceará.

As melhores calibrações foram escolhidas de acordo com o melhor coeficiente NSE da série e foi feita a análise de eficiência dos parâmetros do modelo. Em todas as 4 bacias foram obtidos NSE da série acima de 0,70 indicando a alta qualidade e consistência dos parâmetros de calibração. Apesar dos parâmetros de calibração terem desempenho insatisfatórios em alguns índices de desempenho e na validação, estes ainda podem ser utilizados, na ausência de dados de observados na bacia.

Palavras-chave: Modelo hidrológico. SMAP diário. Chuva-vazão. Calibração. Semiárido.

ABSTRACT

Planning and managing water resources depends heavily on the availability of hydrometeorological data. However, in Brazil, the absence of data or errors in the existing series is common, especially when working with river-flow data. In Ceará, there is a great availability of pluviometric data, however, there are few fluvimetric stations with data series long enough for hydrological modeling. In this context, rainfall-runoff modeling is an alternative to the lack of data. It can be used to fill the errors in the flow series of the fluvimetric stations.

In this Bachelor thesis, the Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) for daily scale proposed by Lopes, Braga and Conejo (1982) was used. We chose to use the Multiobjective evolutionary algorithm MOPSO (Multiobjective Particle Swarm Optimization) for the automatic calibration of the model parameters. The model was calibrated and validated for the river basins of Arneiroz (36020000), Icó (36290000), Iguatu (36160000) and Senator Pompeu (36470000), which are located near reservoirs of high relevance for the Ceará's water supply. The best calibrations were chosen according to the best Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of the simulated series. In all 4 basins, the NSE of the series obtained were above 0.70, indicating the high quality and consistency of the calibration parameters. Although the calibration parameters perform poorly in some performance indices and validation, they can still be used in the absence of observed data in the basin.

Keywords: Hydrological model. SMAP daily. Rainfall-runoff. Calibration. Semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Classificação de modelos hidrológicos de acordo com as características dos fenômenos hidrológicos..... | 19 |
| Figura 2 – Representação do Ciclo Hidrológico. | 22 |
| Figura 3 – Estrutura do Modelo SMAP diário. | 25 |
| Figura 4 – Fluxograma computacional do algoritmo MOPSO e associação ao processo natural. | 32 |
| Figura 5 – Localização das Bacias Hidrográficas dos Reservatórios de interesse. | 35 |
| Figura 6 – Localização das Bacias dos Pontos Fluviométricos estudados. | 36 |
| Figura 7 – Barragem do Açude Castanhão em 05 de Maio de 2017. | 38 |
| Figura 8 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia 36020000..... | 45 |
| Figura 9 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36160000..... | 46 |
| Figura 10 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36290000..... | 46 |
| Figura 11 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36470000..... | 47 |
| Figura 12 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36020000.. | 48 |
| Figura 13 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36290000.. | 48 |
| Figura 14 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36160000.. | 49 |
| Figura 15 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36470000.. | 49 |
| Figura 16 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36020000. | 50 |
| Figura 17 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36290000. | 51 |
| Figura 18 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36160000. | 51 |
| Figura 19 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36470000. | 52 |
| Figura 20 – Representação do Modelo SMAP diário utilizado nessa composição. | 53 |
| Figura 21 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36160000..... | 59 |
| Figura 22 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36020000..... | 59 |
| Figura 23 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36290000..... | 60 |
| Figura 24 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36470000..... | 60 |
| Figura 25 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36020000. Período de Calibração 01/10/1985 a 31/10/93..... | 62 |
| Figura 26 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36020000. Período de Validação 01/01/2003 a 31/12/2003. | 63 |
| Figura 27 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36020000..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36290000. Período de Calibração 01/10/1988 a 31/10/1996. | 65 |
| Figura 29 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36290000. Período de Validação 01/10/2002 a 31/10/2010. | 65 |
| Figura 30 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36290000. | 66 |
| Figura 31 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36160000. Período de Calibração 01/10/1976 a 31/10/84. | 67 |
| Figura 32 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36160000. Período de Validação 01/10/1990 a 31/10/1998. | 68 |
| Figura 33 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36160000. | 69 |
| Figura 34 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36470000. Período de Calibração 01/10/1977 a 31/10/1985. | 70 |
| Figura 35 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36470000. Período de Validação 01/01/2001 a 31/12/2005. | 71 |
| Figura 36 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36470000. | 71 |
| Figura 37 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36020000. Período da Série 01/01/1973 a 31/12/2010. | 77 |
| Figura 38 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36290000. Período da Série 01/01/1973 a 30/06/2016. | 78 |
| Figura 39 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36160000. Período da Série 01/01/1973 a 31/07/2016. | 78 |
| Figura 40 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36470000. Período da Série 01/01/1973 a 31/12/2005. | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de Inicialização do modelo. | 25 |
| Tabela 2 – Parâmetros calculados no modelo. | 26 |
| Tabela 3 – Limite de Variação dos Parâmetros do modelo SMAP Diário. | 27 |
| Tabela 4 – Valores de referência para a Constante de recessão do escoamento básico – kkt. . | 27 |
| Tabela 5 – Valores de referência para a Constante de recessão do escoamento superficial – k2t. | 28 |
| Tabela 6 – Valores de referência para o parâmetro de Abstração Inicial – Ai. | 28 |
| Tabela 7 – Valores de referência para o parâmetro de Capacidade de campo – Capc. | 28 |
| Tabela 9 – Folhas Topodata utilizadas para análise morfométrica. | 41 |
| Tabela 10 – Informações dos Postos Fluviométricos utilizados no estudo. | 50 |
| Tabela 11 – Parâmetros de Entrada do Algoritmo MOPSO. | 53 |
| Tabela 12 – Faixa de variação dos parâmetros de Entrada do SMAP diário. | 54 |
| Tabela 13 – Classificação dos Índices de desempenho. | 57 |
| Tabela 14 – Caracterização morfométrica das bacias dos Postos fluviométricos estudados. ... | 58 |
| Tabela 15 – Tempo de concentração das Bacias dos Postos fluviométricos. | 58 |
| Tabela 16 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36020000. | 61 |
| Tabela 17 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36290000. | 64 |
| Tabela 18 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36160000. | 66 |
| Tabela 19 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36470000. | 69 |
| Tabela 20 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36020000 - Período 01/10/1985 a 31/10/1993. | 72 |
| Tabela 21 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36020000 – Período 01/01/2003 a 31/12/2003. | 73 |
| Tabela 22 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36290000 - Período 01/10/1988 a 31/10/1996. | 74 |
| Tabela 23 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36290000 – Período 01/10/2002 a 31/10/2010. | 74 |
| Tabela 24 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36160000 - Período 01/10/1976 a 31/10/1984. | 75 |
| Tabela 25 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36160000 – Período 01/10/1990 a 31/10/1998. | 75 |
| Tabela 26 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36470000 - Período 01/10/1977 a 31/10/1985. | 76 |
| Tabela 27 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36470000 – Período 01/01/2001 a 31/12/2005. | 77 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 OBJETIVO | 18 |
| 2.1 Objetivo Geral | 18 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 3.1 Modelos Hidrológicos | 18 |
| 3.2.1 Descrição do SMAP na sua versão diária..... | 24 |
| 3.2.2 Parâmetros de Calibração do Modelo SMAP diário | 27 |
| 3.3 Calibração automática de Modelos Hidrológicos..... | 28 |
| 3.3.1 Algoritmo MOPSO (Multiobjective Particle Swarm Optimization)..... | 30 |
| 3.4 Função objetivo e Análise de Desempenho de modelos | 32 |
| 3.5 Características da Região Semiárida que influenciam o ciclo hidrológico | 33 |
| 4 LOCAL DE APLICAÇÃO..... | 34 |
| 4.1 Açude Arneiroz II..... | 37 |
| 4.2 Açude Castanhão | 37 |
| 4.3 Açude Banabuiú | 39 |
| 4.4 Açude Orós | 40 |
| 5 METODOLOGIA..... | 40 |
| 5.1 Análise Morfométrica das bacias hidrográficas | 41 |
| 5.2 Dados Hidrometeorológicos | 44 |
| 5.3 O Modelo SMAP diário..... | 52 |
| 5.4 Calibração-Validação | 54 |
| 5.5 Análise de desempenho dos parâmetros calibrados | 55 |
| 5.6 Preenchimento das falhas nos dados dos Postos Fluviométricos | 57 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 58 |
| 6.1 Análise Morfométrica..... | 58 |
| 6.2 Calibração e Validação do Modelo SMAP | 60 |
| 6.3 Análise de desempenho da calibração e validação do SMAP diário..... | 72 |
| 6.4 Preenchimento das Falhas utilizando os parâmetros calibrados do SMAP diário | 77 |
| 7 CONCLUSÃO..... | 80 |
| REFERÊNCIAS | 81 |

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios em hidrologia é o de conhecer adequadamente o comportamento dos processos hidrológicos. A compreensão desses processos é fundamental em estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas. O tempo de residência da água nos diversos compartimentos da hidrosfera influencia, entre outros, a disponibilidade hídrica, a ocorrência de inundações e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes (SCHULER *et al.*, 2003). O entendimento dos processos hidrológicos geralmente é qualitativo, o que nem sempre permite o gerenciamento dos recursos hídricos dentro de bases ambientalmente sustentáveis (TUCCI, 2002).

De acordo com Tucci (2005), é necessário monitorar o comportamento dos sistemas naturais, como a bacia hidrográfica, para que seja possível prever a sua resposta a diferentes ações como precipitações extremas, modificações do uso do solo, estiagem entre outras. Nesse contexto, a modelagem hidrológica apresenta-se como uma solução tanto para a problemática da carência de séries de dados quanto para facilitar a análise dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Assim, a modelagem se caracteriza como uma ferramenta fundamental para o estudo da dinâmica ambiental em uma bacia, facilitando a gestão dos seus recursos naturais (TUCCI, 2005).

Não obstante, as atividades humanas alteram os processos naturais que ocorrem no ciclo hidrológico, seja por inserção de matéria e/ou energia. Para controlar os impactos das alterações no comportamento do escoamento superficial, é fundamental conhecer as variáveis hidrológicas de uma bacia hidrográfica, bem como o comportamento de seus rios, suas sazonalidades e vazões (MACHADO; MELLO JUNIOR; WENDLAND, 2017). A importância dessas inter-relações é responsável pelo crescente interesse em estudos hidrológicos e por consequência, nos processos através dos quais a água chega aos rios.

No Brasil, a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.744/1997) e a criação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos marcaram a gestão ambiental de recursos hídricos. Os fundamentos nos quais essa política é baseada consistem no reconhecimento da água como recurso limitado, vulnerável e dotado de valor econômico, na adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, na consideração dos múltiplos usos da água e na necessidade de uma gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

Os fundamentos dessa política e os instrumentos por ela estabelecidos constituem não apenas um desafio político, econômico, social, ambiental e cultural, mas também um desafio de conhecimentos. A implementação da política defronta-se com uma grande necessidade de conhecimentos científicos e tecnológicos em relação aos recursos hídricos (ANA, 2002).

Dentro de um contexto geral do gerenciamento de recursos hídricos, apresentam-se situações em que se torna necessário compatibilizar os volumes de água disponíveis com as necessidades específicas em um dado momento. Assim, o padrão qualitativo dos recursos hídricos, tanto quanto o quantitativo, deve ser objeto de consideração e de adequação das disponibilidades com as necessidades (LATUF, 2011). A modelagem matemática entra nesse contexto como ferramenta utilizada no conhecimento mais aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos e previsão de cenários (SCHULER *et al.*, 2003).

No último século, a vertiginosa evolução da tecnologia, mais especificamente dos computadores, proporcionou a otimização dos processadores, o que culminou principalmente no ganho de capacidade e velocidade de processamento. Este fato viabilizou a utilização de modelos matemáticos mais complexos e sofisticados pela comunidade científica na tentativa de reproduzir os fenômenos naturais. Nesse contexto, a modelagem hidrológica se difundiu e ganhou espaço na academia. Dessa forma, uma nova área de pesquisa, a hidroinformática, foi se moldando impulsionada também pelos avanços dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Os modelos têm sido utilizados para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade relacionados com o regime hídrico e também têm sido utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas. Uma vez que os modelos podem ser usados para prever condições futuras por meio de simulação, eles são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Em suma, o principal objetivo da previsão usando modelos deve ser melhorar a tomada de decisão sobre os problemas hidrológicos, seja este em planejamento dos recursos hídricos, proteção contra enchentes, mitigação de contaminantes, outorga, entre outras áreas. (BEVEN, 2012).

Portanto, o planejamento adequado dos recursos hídricos somente é possível a partir do conhecimento dos valores quantitativos, tendo em vista sua distribuição nas escalas temporal e espacial (PAIVA; PAIVA; PAIVA, 2006).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Calibrar o modelo hidrológico SMAP para escala diária, com base nas informações meteorológicas de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e vazão natural-afluente observada para as bacias hidrográficas dos postos fluviométricos: 36020000 (Arneiroz), 36290000 (Icó), 36160000 (Iguatu) e 36470000 (Senador Pompeu).

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Fazer a análise morfométrica das bacias hidrográficas dos postos fluviométricos.
- ✓ Calcular os polígonos de Thiessen dos postos pluviométricos de cada bacia.
- ✓ Calibrar o modelo SMAP diário para diferentes períodos nas bacias de estudo.
- ✓ Validar os modelos calibrados.
- ✓ Avaliar os resultados das calibrações e validações utilizando os seguintes indicadores de desempenho: coeficiente de eficiência Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), Nash de Picos (NSPicos), Percentual de Tendências (PBIAS), Coeficiente de correlação de Pearson (R), Coeficiente de determinação (R^2), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Índice de concordância (d) e Índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE).
- ✓ Realizar o preenchimento de falhas nas séries de vazão dos postos fluviométricos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

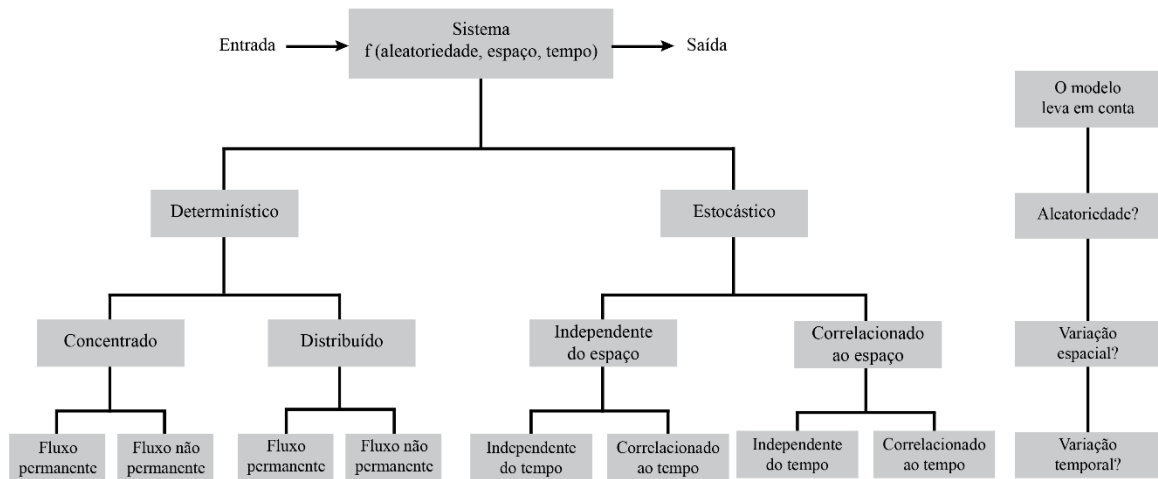
3.1 Modelos Hidrológicos

Para Xu (2002), um modelo é uma representação simplificada de um sistema complexo. Dessa forma, um modelo sempre descreve os componentes básicos e mais importantes de um sistema complexo. Por outro lado, Dooge (1977) afirma que um modelo envolve similaridade sem identidade e simula algumas, mas não todas, características do sistema em estudo.

De acordo com Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida pela ciência, para facilitar o entendimento e a representação dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica e, propiciar a previsão de condições diferentes das observadas.

Existem diversos tipos de modelos hidrológicos. Singh (1988), criou uma classificação para os modelos hidrológicos que os divide em duas classes principais: modelos materiais e modelos simbólicos. Chow, Maidment e Mays (1994) classificaram os modelos hidrológicos (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**) em três grandes áreas que levam em consideração os seguintes aspectos: aleatoriedade, variação espacial e variação temporal.

Figura 1 – Classificação de modelos hidrológicos de acordo com as características dos fenômenos hidrológicos.



Fonte: CHOW; MAIDMENT; MAYS (1994).

Segundo Lucas *et al* (2009), os modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos tais como: tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos).

De acordo com Câmara *et al* (2016), a simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e pelos processos envolvidos, sendo que o modelo por si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para alcançá-lo. Este é usado para antecipar os eventos críticos, com a possibilidade, por exemplo, avaliar os impactos da urbanização de uma bacia para que se possam efetivar as medidas preventivas necessárias (CÂMARA *et al.*, 2006). Para Beven (2012), a principal razão que justifica a necessidade de modelar os processos hidrológicos de Chuva-Vazão está relacionada a limitação das técnicas de medição hidrológica.

Tucci (2005) afirma ainda que os modelos “precipitação-vazão” (chuva-vazão) devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio.

De acordo com Xu (2002), em termos de discretização (resolução espacial), pode-se identificar uma escala crescente de sofisticação começando com modelos concentrados que tratam a bacia completa como um todo homogêneo, passando por modelos semi-distribuídos, que tentam calcular as contribuições de fluxo de áreas ou sub-bacias separadas que são tratadas como homogêneas dentro de si mesmas, para modelos totalmente distribuídos, em que toda a bacia é dividida em áreas unitárias elementares, como uma malha de nós onde os fluxos são passados de um ponto de grade (nó) para outro à medida que a água drena através da bacia.

Um modelo é considerado concentrado (*lumped*) quando este não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia hidrográfica. Segundo Refsgaard (1997), os modelos concentrados consideram a bacia hidrográfica como uma unidade completa, caracterizada por um número relativamente pequeno de parâmetros e variáveis. Para Shultz (2007), os modelos concentrados são sistemas onde todos os parâmetros que impactam a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica são calculados conjuntamente através da média espacial para criar uniformidade através da bacia.

Os modelos concentrados têm sido usados por mais de 50 anos como uma técnica hidrológica para estimar a vazão no exutório de uma bacia. Infelizmente, esta técnica requer muitas suposições que tendem a distorcer as características hidrológicas gerais de uma bacia de drenagem (SHULTZ, 2007).

Segundo Kling e Gupta (2009), os modelos de precipitação-vazão concentrados, permanecem em uso generalizado, porque esses modelos tendem a ser parametricamente parcimoniosos enquanto produzem um bom desempenho do modelo após a calibração usando dados históricos de entrada-saída de bacias hidrográficas.

Por outro lado, um modelo é considerado distribuído (*distributed*) quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço. Segundo Tucci (2005), na prática não existe modelos puramente distribuídos, já que são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído concentrado, mesmo que numa pequena subdivisão.

De acordo com Refsgaard (1997), os modelos hidrológicos distribuídos são estruturados para permitir que as variações espaciais das características da bacia hidrográfica sejam representadas. Muitas vezes, as aplicações de modelos exigem milhares de pontos de grade, cada um dos quais é caracterizado por vários parâmetros e variáveis. Assim, o número de parâmetros e variáveis em um modelo distribuído é, em princípio, duas ou três ordens de grandeza maior do que seria para um modelo concentrado de mesma área (REFSGAARD, 1997).

Dada a diferença de resolução espacial, de volume de dados e de tempo de processamento entre modelos concentrados e distribuídos, tem-se que os procedimentos de parametrização, calibração e validação desses tipos de modelos diferem entre si.

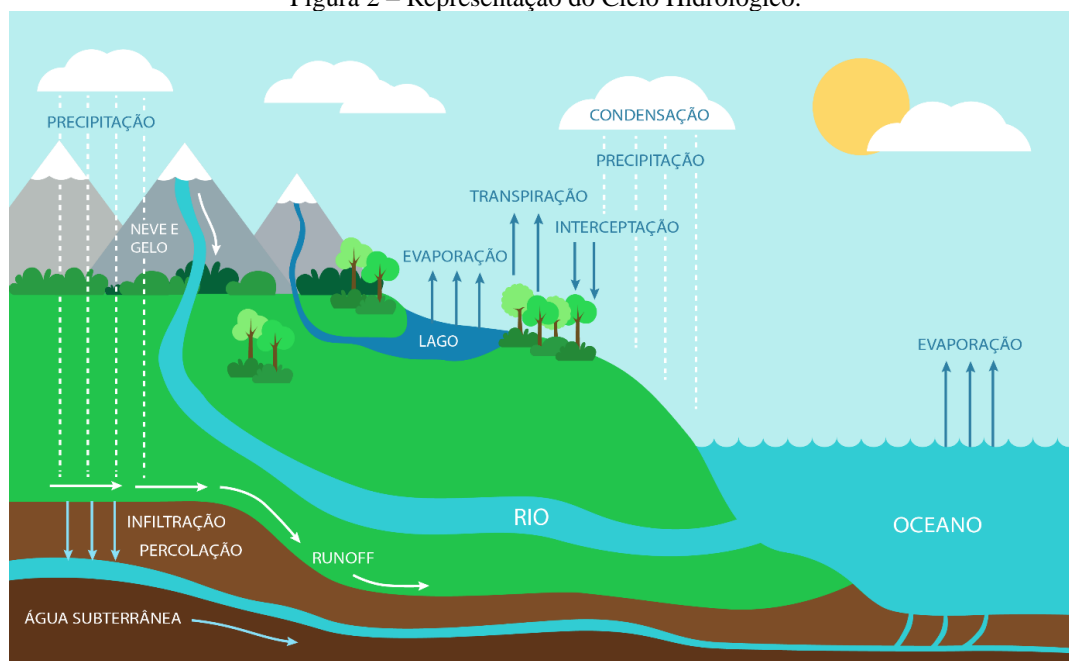
Por conseguinte, acrescenta-se que, de acordo com Hollanda *et al* (2015), a utilização de modelos hidrológicos proporciona custos menores e economia de tempo para analisar os potenciais impactos das mudanças antrópicas no regime hídrico de bacias hidrográficas.

3.2 O Modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP)

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. O SMAP foi desenvolvido em 1981 por Lopes, Braga e Conejo (1982). Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente foram apresentadas as versões horária e mensal, com algumas adaptações em sua estrutura (KAVISKI *et al.*, 2007). Segundo Lopes (1999), para a calibração do modelo são necessários de 30 a 90 dias de dados de vazão, incluindo eventos de cheia.

O SMAP é um modelo do tipo conceitual, uma vez que este se baseia nos conceitos físicos relacionados ao ciclo hidrológico (Figura 2) para simular os processos que ocorrem na natureza.

Figura 2 – Representação do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Nunes (2014), as principais vantagens do modelo SMAP estão associadas à sua simplicidade e à pequena quantidade de parâmetros a serem utilizados. Dos seis parâmetros do modelo, dois são considerados fixos, com estimativas fundamentadas em processos físicos.

Segundo Santos e Fontes (2014), a metodologia de simulação de vazão diária pelo modelo é constituída a partir da representação das fases do escoamento (superficial, de base e recarga) em três reservatórios: reservatório do solo (zona aerada), reservatório da superfície da bacia e reservatório subterrâneo (zona saturada), com variáveis atualizadas a cada dia.

O modelo SMAP opera de forma contínua no tempo. A cada intervalo de tempo, novo dado de chuva média na bacia é incorporado e a água contida em cada um dos reservatórios do modelo é atualizada por suas funções de transferência. Mesmo sem chuva, os reservatórios são atualizados com perdas por evaporação e liberação dos escoamentos (FADIGA JUNIOR *et al*, 2008).

Moreira, Guilhon e Rocha (2007) compararam diferentes métodos de previsão de vazões naturais afluentes na bacia do Rio Iguaçu utilizando o modelo SMAP e concluíram que a informação de previsão de precipitação incorpora um ganho de qualidade aos modelos de previsão de vazões.

Santos e Fontes (2014) aplicaram o modelo SMAP diário na bacia hidrográfica do rio Salitre, a qual se localiza dentro do semiárido baiano. O estudo obteve resultados satisfatórios para uma multicalibração onde utilizou-se uma série de um ano e diferentes

cenários climáticos (úmido, médio, seco). Foi obtido o melhor resultado de desempenho do modelo para o período correspondente à condição hidrológica seca.

Kaviski *et al.* (2007), calibrou o modelo SMAP diário para três diferentes trechos da Bacia do Rio Iguaçu e conclui que a “conservação de massa” durante a rotina de atualização do estado dos reservatórios no dia da previsão pode superestimar os picos de cheias, principalmente para eventos de chuva intensos, onde o reservatório do solo está próximo da sua capacidade máxima.

Segundo Kaviski *et al.* (2007), os parâmetros que regem as características físicas de uma bacia com grande área, da ordem de 10.000 km², perdem sua representatividade física diante da complexidade do processo chuva-vazão em tal escala espacial, tornando-se apenas coeficientes matemáticos que tentam ajustar as equações ao processo. De acordo com Fadiga Junior (2008), o reservatório subterrâneo leva meses para ser esvaziado, podendo até carregar um valor para o próximo ano hidrológico.

Paiva *et al.* (2006), utilizou o modelo SMAP diário para simulação com geração de vazões diárias e propagação de vazões médias de sete dias e obteve resultados satisfatórios (NSE acima de 65%), comprovando a eficácia do modelo, com restrição ao fato de que este não foi capaz de representar bem as vazões altas.

Porto *et al.* (2008) calibrou o modelo SMAP diário na bacia do rio Gramame na Paraíba utilizando 5 funções objetivos diferentes e constatou que os valores das vazões calculadas são alterados sensivelmente, devido à variação existente nos parâmetros calibrados automaticamente.

Lourenço *et al.* (2014), aplicou o modelo SMAP diário para a Bacia hidrográfica do Rio Piancó que faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu e, obteve resultados satisfatórios com NSE superior a 80%. Lourenço *et al.* (2014), observou ainda que o modelo SMAP apresenta excelente desempenho, NSE acima na ordem de 90%, para o início do período de chuvas na Bacia do Piancó, quando os rios de regime intermitente recebem os primeiros aportes de escoamento (dezembro a fevereiro).

3.2.1 Descrição do SMAP na sua versão diária

O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e modelo MERO em trabalhos realizados no DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE (LOPES, 1999).

A versão diária do modelo é constituída de três reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia da seguinte forma:

$$R_{\text{solo}}(i+1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec}$$

$$R_{\text{sup}}(i+1) = R_{\text{sup}}(i) + E_s - E_d$$

$$R_{\text{sub}}(i+1) = R_{\text{sub}}(i) + \text{Rec} - E_b$$

Onde:

R_{solo} = reservatório do solo (zona aerada) [mm]

R_{sup} = reservatório da superfície da bacia [mm]

R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada) [mm]

P = chuva [mm]

i = intervalo de tempo [dia]

E_s = escoamento superficial [mm]

E_d = escoamento direto [mm]

E_r = evapotranspiração real [mm]

Rec = recarga subterrânea [mm]

E_b = escoamento básico [mm]

Para realizar a inicialização dos três reservatórios (superficial, solo e subterrâneo) é necessário estimar o teor de umidade inicial do solo (T_{uin}) e o escoamento de base inicial (E_{bin}), mostrados na Tabela 1. Nesta etapa é preciso considerar as características fisiográficas e climáticas da região da bacia hidrográfica, pois isto facilita a escolha do período inicial de calibração e ajuda a ajustar a calibração ao hidrograma de vazão observada. Assim, a inicialização é feita do seguinte modo utilizando os parâmetros descritos na Tabela 1:

$$R_{\text{solo}}(1) = T_{\text{uin}} * S_{\text{tr}}$$

$$R_{\text{sup}}(1) = 0$$

$$R_{\text{sub}}(1) = E_{\text{bin}} / (1 - k_k) / A_d * 86.4$$

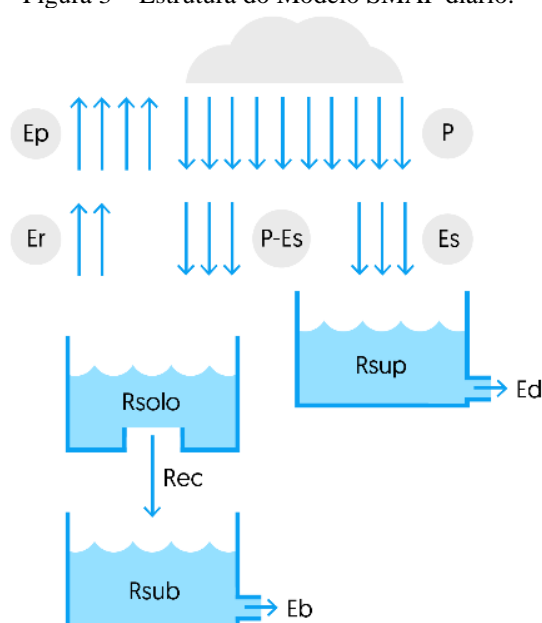
Tabela 1 – Parâmetros de Inicialização do modelo.

| Variável | Descrição | Unidade |
|------------------|-------------------------|-------------------|
| Tu _{in} | Teor de umidade inicial | Adimensional |
| E _{bin} | Vazão básica inicial | m ³ /s |
| Ad | Área de drenagem | km ² |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O SMAP diário (Figura 3) é composto por 5 funções de transferência. A separação do escoamento superficial é baseada no método do SCS (*Soil Conservation Service* do U.S. *Department of Agriculture*).

Figura 3 – Estrutura do Modelo SMAP diário.



Fonte: Adaptada de Lopes (1999).

As funções de transferência do modelo estão descritas abaixo no formato condicional (*if-else*), onde o segundo cálculo só é feito caso a primeira condição não seja atendida.

1. Função de transferência do escoamento superficial (Es)

Se $(P > Ai)$, então:

$$S = Str - R_{solo}$$

$$Es = (P - Ai) ^ 2 / (P - Ai + S)$$

Caso contrário:

$$Es = 0$$

2. Função de transferência da evapotranspiração real (Er)

Se $((P - Es) > Ep)$, então:

$$E_r = E_p$$

Caso contrário:

$$E_r = (P - E_s) + (E_p - (P - E_s)) * T_u$$

3. Função de transferência da recarga subterrânea (Rec)

Se $R_{solo} > (Capc * Str)$, então:

$$Rec = Crec * T_u * (R_{solo} - (Capc * Str))$$

Caso contrário:

$$Rec = 0$$

4. Função de transferência do escoamento direto (Ed)

$$E_d = R_{sup} * (1 - K_2)$$

5. Função de transferência do escoamento básico (Eb)

$$E_b = R_{sub} * (1 - K_k)$$

Sendo:

$$T_u = R_{solo} / Str$$

As unidades dos parâmetros foram são calculadas da seguinte forma:

$$K_k = 0,5^{(1/K_{kt})} \text{ e } K_2 = 0,5^{(1/K_{2t})}$$

Onde:

K_{kt} e K_{2t} são expressos em dias em que a vazão cai à metade de seu valor.

$Crec$ e $Capc$ são multiplicados por 100.

O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. Finalmente o cálculo da vazão é dado pela seguinte equação:

$$Q = (E_s + E_b) * A_d / 86.4$$

Os seis parâmetros calculados no modelo estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros calculados no modelo.

| Parâmetro | Descrição |
|------------------|--|
| Str | Capacidade de saturação do solo (mm) |
| K _{2t} | Constante de recessão do escoamento superficial (dias) |
| Crec | Parâmetro de recarga subterrânea (%) |
| A _i | Abstração inicial (mm) |
| Capc | Capacidade de campo (%) |
| K _{kt} | Constante de recessão do escoamento básico (dias) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2 Parâmetros de Calibração do Modelo SMAP diário

Lopes (1999) utilizou a calibração automática para apenas 3 dos 6 parâmetros do modelo SMAP. Os parâmetros Ai, Capc e Kkt são valores estimados baseados em processos físicos. Os parâmetros Str, K2t e Crec são calculados com base nas séries históricas de precipitação e vazão (LOPES, 1982). As faixas de variação desses parâmetros obtidas na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Limite de Variação dos Parâmetros do modelo SMAP Diário.

| Parâmetro | Faixa de Variação | Unidades |
|-----------|-------------------|----------|
| Str | 100 - 2000 | [mm] |
| K2t | 0,2 - 10 | [dias] |
| Crec | 0 - 100 | [%] |
| Ai | 0 - 9 | [mm] |
| Capc | 20 - 60 | [%] |
| Kkt | 10 - 270 | [dias] |

Fonte: Lopes (1999).

De acordo com Lopes (1999), o parâmetro Kkt (constante de recessão do escoamento básico) não apresentou sensibilidade a funções objetivo. Em decorrência disso, este deve ser ajustado observando-se no hidrograma os trechos de recessão.

Apresenta-se a seguir a Tabela 4, que associa a constante de recessão ao tempo em dias em que a vazão básica cai à metade de seu valor (não considerando recarga nesse período) (LOPES, 1999).

Tabela 4 – Valores de referência para a Constante de recessão do escoamento básico – kkt.

| Parâmetro | Tempo [dias] | Valor da Constante | Velocidade |
|-----------|--------------|--------------------|--------------|
| kkt | 30 | 0,9772 | Muito rápido |
| | 60 | 0,9885 | Rápido |
| | 90 | 0,9923 | Médio |
| | 120 | 0,9942 | Lento |
| | 180 | 0,9962 | Muito lento |

Fonte: Lopes (1999).

A Tabela 5 apresenta exemplos da associação de valores da constante de recessão do escoamento superficial ao tempo em dias. Este parâmetro é calculado com base nas séries históricas de precipitação e na vazão de entrada no modelo.

Tabela 5 – Valores de referência para a Constante de recessão do escoamento superficial – k2t.

| Parâmetro | Tempo [dias] | Valor da Constante |
|------------------|---------------------|---------------------------|
| K2t | 0,2 | 0,0600 |
| | 1 | 0,5000 |
| | 2 | 0,7070 |
| | 3 | 0,7937 |
| | 4 | 0,8409 |
| | 5 | 0,8706 |

Fonte: Lopes (1999).

Os parâmetros Ai e Capc podem ser obtidos através de características da cobertura vegetal e do tipo de solo, respectivamente. Lopes (1999), introduziu alguns valores de referência (Tabela 6 e Tabela 7) para esses dois parâmetros em bacias hidrográficas brasileiras.

Tabela 6 – Valores de referência para o parâmetro de Abstração Inicial – Ai.

| Parâmetro | Valor [mm] | Tipo de Cobertura Vegetal |
|------------------|-------------------|----------------------------------|
| Ai | 2,5 | Campo |
| | 3,7 | Mata |
| | 5,0 | Floresta Densa |

Fonte: Lopes (1999).

Tabela 7 – Valores de referência para o parâmetro de Capacidade de campo – Capc.

| Parâmetro | Valor [%] | Tipo de Solo |
|------------------|------------------|---------------------|
| Capc | 30 | Arenoso |
| | 40 | Misto |
| | 50 | Argiloso |

Fonte: Lopes (1999).

3.3 Calibração automática de Modelos Hidrológicos

Durante muitos anos os modelos hidrológicos foram calibrados manualmente, por meio de processos de tentativa e erro. A calibração era feita por um hidrólogo experiente e dotado de muitos conhecimentos sobre as características fisiográficas e hidrometeorológicas da bacia hidrográfica em estudo. Em geral, os hidrólogos analisavam a eficiência do modelo visualmente comparando a série sintética de dados de vazão a série de dados observados, por meio do hidrograma. Esse procedimento muitas vezes gera resultados robustos, no entanto, é tedioso e muito demorado, ou seja, este método é eficiente, porém, ineficaz.

Para Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), a viabilidade do método de calibração manual baseia-se no fato de que muitos modelos hidrológicos são projetados para que os parâmetros tenham alguma relação conceitual com as características da bacia hidrográfica. No

entanto, grandes números de parâmetros de interação podem resultar em efeitos imprevisíveis quando múltiplos parâmetros são ajustados. (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

O avanço dos computadores permitiu a automatização do processo de calibração de modelos hidrológicos tanto devido a evolução dos processadores que trouxeram ganhos no tempo de processamento quanto devido a inovação e utilização de novos algoritmos baseados em sistemas naturais. De acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), o conceito básico por trás dos procedimentos de calibração "automática" não mudou muito desde a sua criação e, pode ser descrito nos seguintes passos:

1. Um período de calibração é selecionado dentro da série de dados.
2. Uma estimativa inicial é feita quanto aos valores prováveis (ou intervalo de valores) para os parâmetros.
3. O modelo é executado usando esses valores para os parâmetros.
4. A "distância" entre a saída do modelo e os dados observados é medida usando uma equação matemática chamada de função objetivo ou critério de estimativa.
5. Um procedimento de otimização automática é usado para procurar os valores dos parâmetros que otimizam o valor da função objetivo.

Na calibração automática, os parâmetros do modelo são ajustados dentro do espaço de busca, de acordo com um ou mais objetivos, que mensuram a aderência dos resultados do modelo aos dados observados no campo (REIS JUNIOR; MARTINS; NASCIMENTO, 2009).

Segundo Madsen (2003), nos últimos anos, diversas pesquisas foram direcionadas para o desenvolvimento de procedimentos de automatização da calibração com base em técnicas de otimização numérica. Destaca-se no meio dessas, as rotinas eficientes, que são algoritmos baseados na evolução e na população, como os algoritmos genéticos e os *Shuffled Complex Evolution* (SCE).

O aumento da complexidade dos problemas de engenharia, especialmente no campo da gestão de recursos de água levou a ampliação das aplicações de algoritmos evolucionários nesta área. Estes utilizam métodos de pesquisa estocásticos que simulam a evolução biológica natural e / ou o comportamento social de espécies. Os algoritmos evolucionários apresentam um conjunto de soluções não definidas (frentes de Pareto) para problemas multiobjetivos (FALLAH-MEHDIPOUR; HADDAD; MARIÑO, 2011).

Segundo Arroyo (2002), um problema de otimização multiobjetivo, geralmente, consiste em minimizar (ou maximizar) simultaneamente um conjunto de critérios (objetivos)

satisfazendo um conjunto de restrições. Assim, não existe uma única solução que otimize cada um dos objetivos, mas sim um conjunto de soluções eficientes no qual nenhuma solução é melhor que outra solução para todos os objetivos.

De acordo com Barros (2007), o conceito de dominância de Pareto pode ser descrito dado um problema multiobjetivo representado pela seguinte equação:

$$\min f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \dots \\ f_M(x) \end{bmatrix}$$

Onde $f_i(x)$ é a i -ésima de M funções e x é uma possível solução que satisfaz o problema.

Segundo Barros (2007), da expressão acima pode-se observar que duas soluções distintas (u e v) podem se relacionar da seguinte forma:

Se $f_i(u) < f_i(v) | \forall i = 1, \dots, M$ então u é dita estritamente dominante de v , o que é representado pela expressão $u < v$;

Ou se, $f_i(u) \leq f_i(v) | \forall i$, u é denominada fracamente dominante de v , o que é representado pela expressão $u \preceq v$.

Caso u não seja dominada por v , e v não seja dominada por u , então u e v são ditas soluções não-dominadas. Desta forma, fica claro que problemas multiobjetivo possuem mais do que uma solução como ótimo, e esse conjunto é denominado de frente ótima de Pareto ou frente verdadeira de Pareto, a qual é composta por soluções não-dominadas por qualquer possível solução (BARROS, 2007).

3.3.1 Algoritmo MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*)

Um algoritmo do tipo *Particle Swarm Optimization* (PSO) consiste em uma população de partículas que, ao contrário dos algoritmos evolutivos, sobrevive até a última geração. As partículas procuram o espaço variável movendo-se com uma velocidade especial para a melhor partícula global (guia), usando sua experiência das gerações passadas (MOSTAGHIM; TEICH, 2003). Comparado com o Algoritmo genético (GA), o PSO leva vantagem, pois é mais fácil de implementar e há menos parâmetros para ajustar (TSOU, 2008).

Alvarez-Benitez *et al.* (2005) adaptou o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), para lidar com problemas multiobjetivos. A principal dificuldade em estender PSO a problemas multiobjetivos é encontrar a melhor maneira de selecionar as guias para cada partícula no bando (enxame). A dificuldade se manifesta porque não há conceitos claros para os melhores pessoais e globais que podem ser claramente identificados quando se lida com objetivos D e não com um único objetivo (ALVAREZ-BENITEZ; EVERSON; FIELDSEND, 2005).

A seguir a estrutura básica do algoritmo PSO e MOPSO é descrita. De acordo com Lalwani (2013), considerando a busca espacial de dimensão (d) e de n partículas, a qual a i -ésima partícula em uma posição particular $X_i (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ está se movendo com velocidade $V_i (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$. Cada partícula é associada a um melhor particular, $P_i (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ o qual é definido pela sua melhor performance no bando (enxame). Similarmente, uma melhor performance geral da partícula em relação ao bando é definida como “melhor global”. Cada partícula tenta modificar a sua posição utilizando as seguintes informações: posição atual, velocidade atual, distância entre a posição atual e o melhor particular, distância entre a posição atual e o melhor global (LALWANI, 2013).

O movimento das partículas é regido pela atualização da velocidade e dos atributos de posição.

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_1(x_{pbest} - X_i^t) + c_2r_2(x_{gbest} - X_i^t)$$

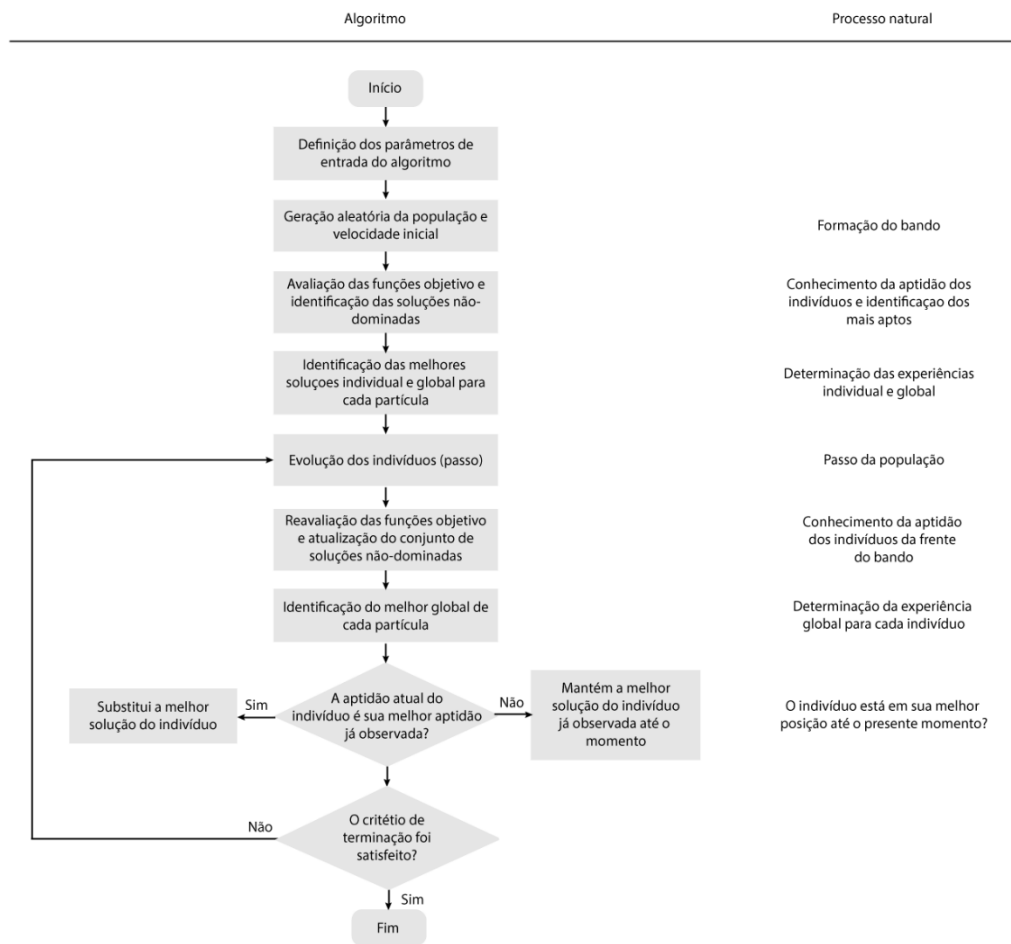
$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}$$

Onde w equivale ao peso inercial, c_1 é o coeficiente de aceleração cognitiva e c_2 é o coeficiente de aceleração social, r_1 e r_2 são valores aleatórios entre 0 e 1, x_{pbest} é o melhor particular da partícula e x_{gbest} é o melhor global da partícula. X_i^t é a posição atual da i -ésima partícula na interação t .

No algoritmo do tipo MOPSO, a minimização do problema é considerada utilizando o conceito de dominância de Pareto para problemas multiobjetivo explicado anteriormente.

Barros (2007) descreveu o fluxograma computacional do algoritmo MOPSO e a sua associação ao processo natural, que pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma computacional do algoritmo MOPSO e associação ao processo natural.



Fonte: Adaptado de Barros (2007).

Dirceu Junior, Martins e Nascimento (2009), aplicaram o algoritmo de otimização MOPSO na calibração do modelo SMAP mensal em 21 bacias hidrográficas do Ceará e, obtiveram resultados extremamente satisfatórios para a frente de Pareto e para a seleção dos melhores parâmetros. Dessa forma, foi possível confirmar a eficácia desse método de calibração para o semiárido cearense.

3.4 Função objetivo e Análise de Desempenho de modelos

A principal característica de um problema multiobjetivo é que a solução não será, em geral, única. De fato, é comum ter várias soluções com a característica de que o deslocamento de uma solução para outra resulta na melhoria de uma função objetivo enquanto

provoca uma deterioração no valor de pelo menos uma outra função objetiva (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1998).

De acordo com Yapo, Gupta e Sorooshian (1998), o problema multiobjetivo de calibração do modelo hidrológico pode ser declarado como o seguinte problema de otimização:

$$\underset{w.r.t \theta}{\text{minimizar}} F(\theta) = \{f_1(\theta, \dots, f_m(\theta))\}$$

Onde $f_1(\theta, \dots, f_m(\theta))$ são as m funções objetivo não comensuráveis a serem simultaneamente minimizadas em relação aos parâmetros θ do modelo. Dessa forma, cada $f_1(\theta)$ pode corresponder, por exemplo, ao Nash–Sutcliffe de uma saída específica do modelo para os dados de vazão disponíveis.

A primeira função objetivo avaliada (FO1) buscou maximizar a eficiência (NSE) definida por Nash e Sutcliffe (1970), formulada através da seguinte expressão:

$$FO1 = \max_{\theta} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right)$$

Onde θ é o conjunto de parâmetros do modelo, Q_{obs} é a série de vazões observadas, Q_{sim} a série de vazões simuladas, n o comprimento da série em meses e \bar{Q}_{obs} é a média mensal das vazões observadas. De certa forma, a FO1 é a famosa função objetivo baseada no somatório dos quadrados dos resíduos, porém neste caso, a função é padronizada pela variância da série observada (REIS JUNIOR; MARTINS; NASCIMENTO, 2009).

A segunda função objetivo adotada procurou minimizar as distâncias entre as vazões de pico das séries observadas e simuladas. Utilizou uma expressão matemática similar a proposta por Nash e Sutcliffe (1970). A FO2 é calculada pela expressão apresentada abaixo (REIS JUNIOR; MARTINS; NASCIMENTO, 2009).

$$FO2 = \max_{\theta} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{p,i}^{obs} - q_{p,i}^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{p,i}^{obs} - \bar{q}_{p,i}^{obs})^2} \right)$$

Onde $q_{p,i}^{obs}$ é a vazão de pico observada, $q_{p,i}^{sim}$ é a vazão de pico simulada, n é o comprimento da série em anos e $\bar{q}_{p,i}^{obs}$ é a média das vazões de pico observadas.

3.5 Características da Região Semiárida que influenciam o ciclo hidrológico

A variabilidade das condições hidrológicas é um processo estocástico no tempo e no espaço. Esta variação é decorrência da combinação de vários fatores como: condições climáticas de precipitação, evapotranspiração, radiação solar, entre outros; relevo, geologia,

geomorfologia e solos; cobertura vegetal e uso do solo; ações antrópicas sobre o sistema fluvial (TUCCI, 2002). A variabilidade espacial da precipitação pode dominar o balanço hídrico de grandes bacias hidrográficas, particularmente em áreas secas e montanhosas (ARNOLD *et al.*, 1998).

Desse modo, a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica é uma questão chave para a Gestão dos Recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas onde a vazão anual dos rios é frequentemente muito variável (REIS JUNIOR *et al.*, 2007).

Em regiões semiáridas, a quantificação do escoamento superficial e produção de sedimentos, são de extrema importância, uma vez que, a vegetação predominante da região é a caatinga, que não possui grande proteção ao impacto das gotas de chuva sobre o solo, e também, devido ao grande desmatamento da região (SANTOS, 2009). Além disso, o solo da região é de pouca profundidade, podendo apresentar afloramento de rochas cristalinas (MOLLE, 1994).

Diniz e Clarke (2001) enfatizam que os dois processos hidrológicos mais importantes na região semiárida do Nordeste brasileiro são, indiscutivelmente, as precipitações e a evaporação, particularmente devido à grande variabilidade temporal e espacial do primeiro e as elevadas e constantes taxas do segundo.

A região semiárida é caracterizada por apresentar uma grande variabilidade climática, baixo índice pluviométrico e períodos de secas prolongadas (MOLLE, 1994). No Ceará, mais de 80% da precipitação anual ocorre na estação chuvosa (Fevereiro-Junho), enquanto é comum que existam fluxo zero durante a estação seca (Julho-Dezembro) (REIS JUNIOR *et al.*, 2007).

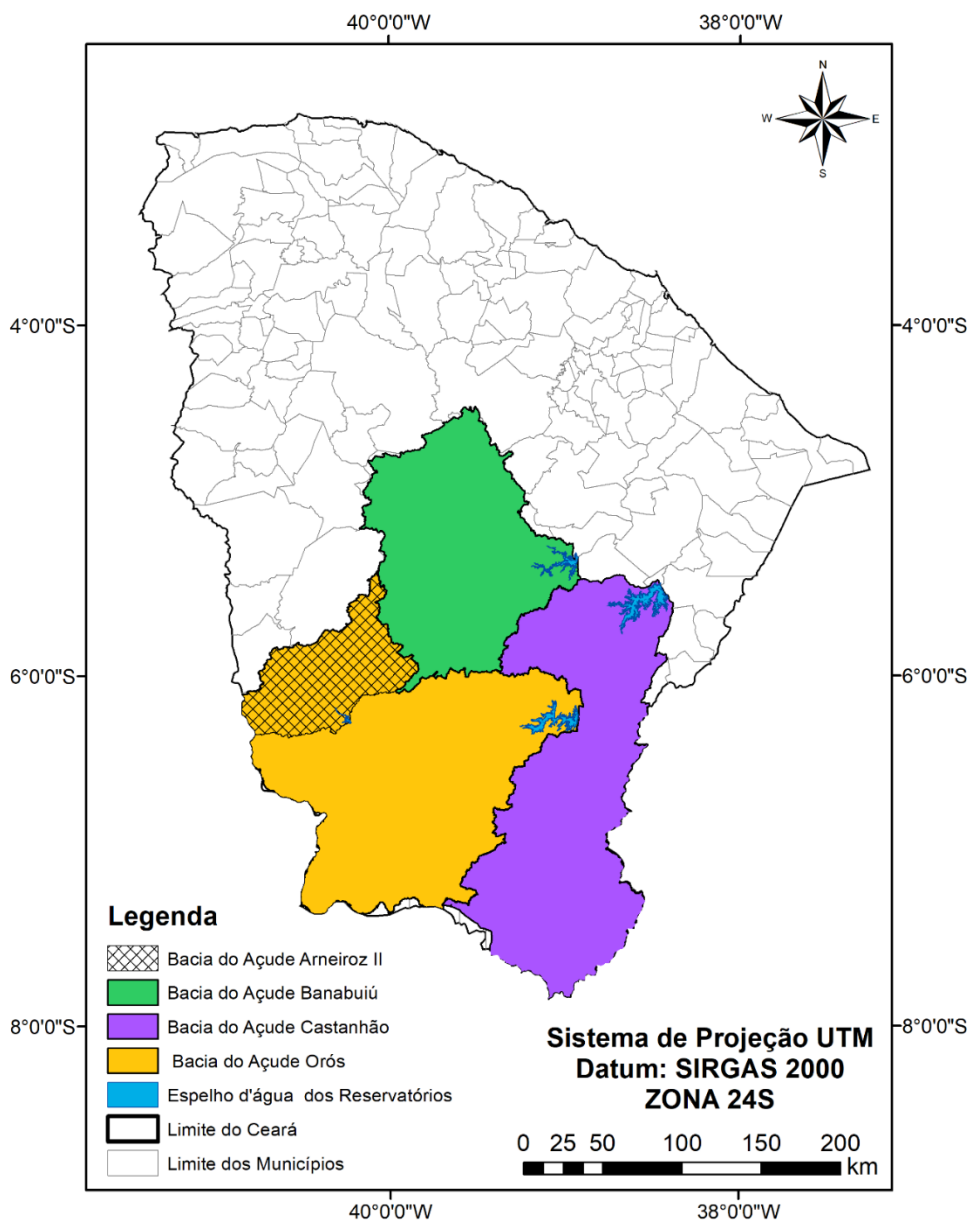
O regime de vazão do semiárido pode variar bastante, podendo alcançar altos picos de vazão (acima de 1.000 m³/s, por exemplo) no período chuvoso e chegar à vazão zero no período de estiagem (FELIX; PAZ, 2016). Além disso, compreender como ocorrem os processos hidrológicos da região semiárida pode favorecer a sociedade e dar subsídios aos gestores no processo de gestão dos recursos hídricos em estiagem (FELIX; PAZ, 2016).

4 LOCAL DE APLICAÇÃO

A escolha das bacias a serem modeladas nesta composição foi feita considerando os açudes mais relevantes para o manejo e gerenciamento dos recursos hídricos no Estado do

Ceará. Os reservatórios escolhidos foram: Arneiroz II, Banabuiú, Castanhão e Orós (Figura 5). Os três últimos fazem parte do Sistema Jaguaribe-Metropolitano que tem importância estratégica para o abastecimento de água de grande parte da população do Ceará. O Açude Arneiroz II foi escolhido com o objetivo de se testar como o modelo SMAP diário se comporta em bacias hidrográficas de pequeno porte.

Figura 5 – Localização das Bacias Hidrográficas dos Reservatórios de interesse.

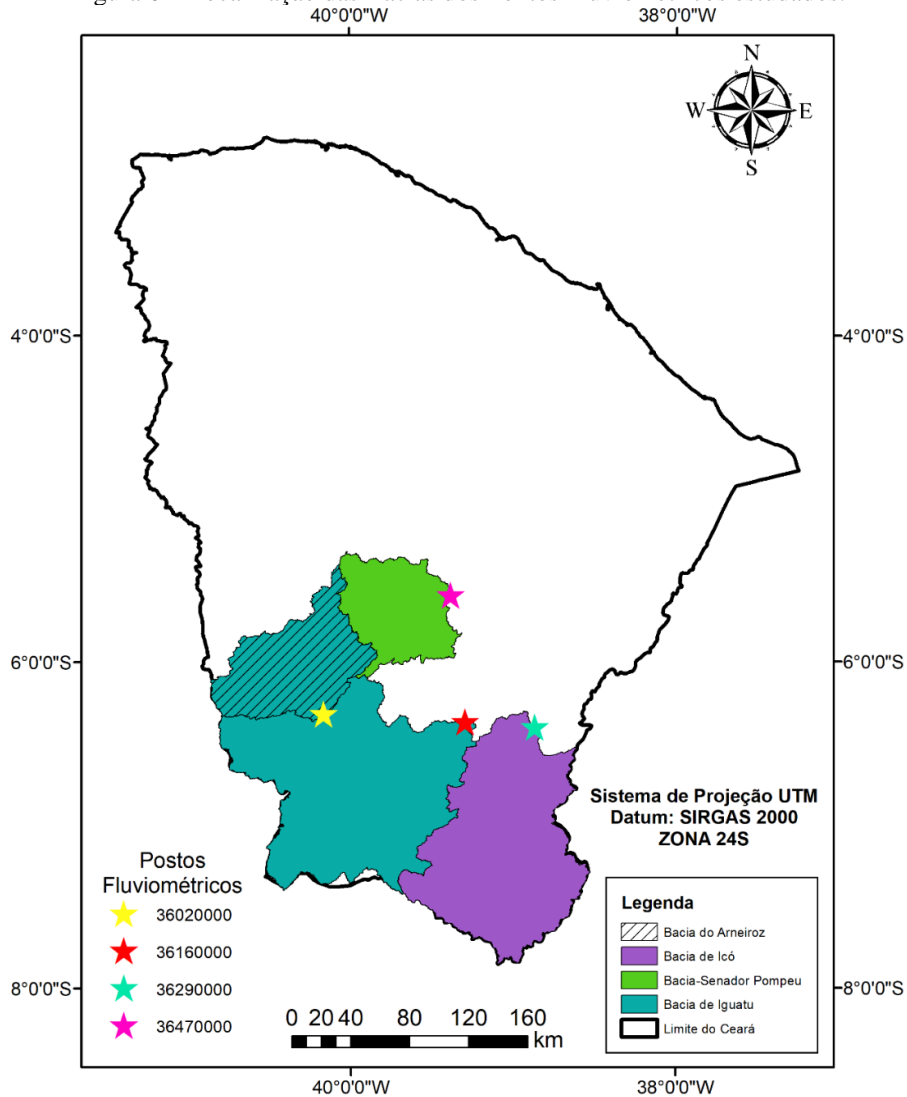


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, buscou-se no Sistema Hidroweb/ANA os postos fluviométricos existentes nas proximidades dos açudes. Optou-se por escolher os postos fluviométricos a montante e mais próximos dos reservatórios de interesse desse estudo. Além disso,

selecionou-se os postos com as maiores séries, ou seja, com maior número de dados. Seguindo esses critérios, selecionou-se os seguintes Postos Fluviométricos: 36020000 que está localizado no município de Arneiroz para a calibração do açude Arneiroz II, 36470000 que está localizado no município de Senador Pompeu para a calibração do açude Banabuiú, 36290000 que está localizado no município de Icó para a calibração do açude Castanhão e, por fim, 36160000 que está localizado no município de Senador Pompeu para a calibração do açude Orós. A Figura 6 ilustra a localização dos Postos Fluviométricos e suas respectivas bacias de drenagem.

Figura 6 – Localização das Bacias dos Pontos Fluviométricos estudados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 Açude Arneiroz II

O reservatório Arneiroz II, localizado no município de Arneiroz (distante 393 km de Fortaleza) é responsável pelo abastecimento humano da cidade de Saboeiro e Cariús (OLIVEIRA FILHO, 2013). Atualmente o açude também abastece a sede do município de Tauá, compreendendo uma população total atendida de cerca de 100 mil habitantes.

Na perspectiva de ampliar as ofertas hídricas da região do Alto Jaguaribe, o Plano Estadual de Recursos Hídricos (Lei nº 11.996, de 24 de julho de 2005), apresentou um planejamento para até o ano de 2010 serem construídas as barragens de Arneiroz II, Faé, Mamoeiro e Jucá (CEARÁ, 2009b). A construção da barragem, que se iniciou em 2002, foi concluída em 2005.

A bacia hidrográfica da barragem Arneiroz II conta com uma área superior à 5.400,0 km². Seu rio mais longo percorre cerca de 150,0 km desde região próxima à fronteira dos municípios de Pedra Branca e Independência, na cota topográfica aproximada 640,0 m, até a barragem, onde a cota mínima de sua foz estima-se em 340,0 m (TEIXEIRA, 2009).

O açude, com capacidade máxima de armazenamento de 197.060.000 m³, é responsável pela perenização de 113 km, abastecendo as comunidades em seu entorno e a jusante, sendo as sedes das cidades de Saboeiro e Jucás atendidas atualmente pela perenização (OLIVEIRA FILHO, 2013).

4.2 Açude Castanhão

O açude Castanhão localiza-se em sua totalidade nos municípios de Alto Santo, Jaguaribe, Jaguaribara e Jaguaretama a aproximadamente 190 km de Fortaleza (em linha reta). A construção da barragem, que regula a vazão do rio Jaguaribe, foi concluída em 2003, tendo como órgão executor o DNOCS. O açude tem capacidade de 6.700.000.000 m³ e a sua vazão regularizada é igual a 29,000 m³/s (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011b).

A barragem do Castanhão é uma obra constante no Plano de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. A Lei No 10.596, de 11 de dezembro de 2002, denominou “Barragem Padre Cícero” a “Barragem do Castanhão” (BRAZ, 2011).

Figura 7 – Barragem do Açude Castanhão em 05 de Maio de 2017.



Fonte: Acervo pessoal.

Para a construção do açude, foi necessária a inundação de cerca de dois terços da cidade de Jaguaribara e, por consequência, a construção de uma nova cidade. Nesse período, a comunidade local deu início ao movimento “Não ao Castanhão”, com mobilizações na tentativa de evitar que a sede de Jaguaribara fosse coberta pelas águas do rio Jaguaribe (LINS, 2011).

Embora o projeto da barragem tenha sido discutido desde de 1985, segundo o relatório “Barragem do Castanhão, Projeto e Aspectos de Construção”, elaborado pelo DNOCS em novembro de 1997 e apresentado em Fortaleza, no I Fórum Interamericano de Gestão dos Recursos Hídricos, os primeiros estudos geológicos sobre a barragem datam de 1910, sendo de responsabilidade da antiga Inspetoria de Obras Contra a Seca (IOCS), hoje denominada DNOCS (BRAZ, 2011).

A mobilização popular resultou na elaboração, por parte de estudiosos da questão, de uma proposta que envolvia a construção de três açudes de menor porte. Porém, de acordo com Lins (2011) a sugestão não foi aceita pelo governo do Estado do Ceará no ano de 1995, foram iniciadas as obras de construção do Castanhão.

O açude Castanhão possui bacia hidrográfica de aproximadamente 45.450 km², inserida na região hidrográfica da bacia do rio Jaguaribe. Destaca-se por sua grande extensão, de forma que abrange praticamente metade do território cearense (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011b).

4.3 Açude Banabuiú

O açude Banabuiú, localizado em sua totalidade nos municípios de Banabuiú e Quixeramobim a aproximadamente 180 km de Fortaleza (em linha reta) foi construído em 1966, tendo como órgão executor o DNOCS, barrando o rio Banabuiú. A barragem Arrojado Lisboa tem capacidade de 1.601.000.000 m³ e a sua vazão regularizada é de 12,930 m³/s (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011a).

A sub-bacia do Banabuiú compreende, essencialmente, os sertões centrais do Ceará mais fortemente submetidos aos rigores da semiaridez. Por sua localização central, limita-se com quase todas as Bacias do Estado, excetuando-se as bacias do Coreaú, do Litoral e a sub-bacia do Salgado. É uma das cinco sub-bacias que compõem a Bacia do Jaguaribe (CEARÁ, 2009a).

Na bacia hidrográfica do açude Banabuiú o volume das águas anualmente explorável é estimado em cerca de 4,0 a 6,3 milhões de m³/ano no cristalino (dados do Plano de Bacia do Banabuiú, SRH, 2001), e em 18 a 32 milhões de m³/ano nos pequenos aquíferos aluviais (FUNCEME, 2008). Entretanto, o volume de água explorada em 2007 nos pequenos aquíferos aluviais desta bacia é estimado em menos de 1,5 milhões de m³/ano.

O rio Banabuiú é o mais importante rio desta Sub-bacia e drena uma área de 19.810 km², desenvolve-se no sentido oeste-leste, percorrendo um curso total de 314 km, até desaguar no rio Jaguaribe nas proximidades da cidade de Limoeiro do Norte. Sua área equivale a 13% do território cearense (CEARÁ, 2009a).

A sub-bacia do Banabuiú possui déficit hídrico considerável devido principalmente às elevadas temperaturas e altas taxas de evaporação, aliadas às fracas pluviosidades. Assim, o escoamento na rede de drenagem natural fica praticamente restrito aos períodos chuvosos (CEARÁ, 2009a). Segundo Fuck Júnior (2008), a escassez pluviométrica acentua-se a oeste, diminuindo a leste da bacia (de mesma latitude, porém mais próximo ao mar).

A precipitação média total da bacia do Açude Banabuiú, calculada através do método dos polígonos de Thiessen, é igual a 671,1695 mm (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011a).

4.4 Açude Orós

O açude Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira, conhecido como açude Orós, é localizado na área correspondente aos municípios de Quixelô, Iguatu e Orós, localizados no estado do Ceará (DANTAS, 2011). A barragem fica a aproximadamente 450 km de Fortaleza, barrando o rio Jaguaribe e cobrindo uma área de cerca de 25.000 km² (FUNCEME, 2010).

A barragem foi construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS e concluída em 1961, barrando o rio Jaguaribe com capacidade para 1.940.000.000 m³ e uma vazão regularizada de 20,40 m³/s (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011c).

O açude Orós constitui-se como importante fonte hídrica para o Médio e Baixo Jaguaribe, garantindo a perenização do rio Jaguaribe até atingir o açude do Castanhão, além de contribuir também para o açude Lima Campos, na bacia do Salgado (COGERH, 2002).

A precipitação média total da bacia do Açude Orós, calculada através do método dos polígonos de Thiessen, é igual a 712,23 mm (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; SRH; COGERH, 2011c).

5 METODOLOGIA

Os *shapefiles* dos polígonos com a delimitação das Bacias hidrográficas de estudo foram fornecidos pela FUNCEME e são os mesmos utilizados no Portal HIDRO COGERH/FUNCEME.

Foi definido o ponto do exutório para cada bacia coincidindo com o ponto onde o vertedouro da barragem está localizado. No caso da bacia dos postos fluviométricos, o próprio posto fluviométrico foi considerado como “exutório”.

5.1 Análise Morfométrica das bacias hidrográficas

Para a realização da análise morfométrica das bacias hidrográficas foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do INPE com resolução espacial de 30 m, no formato GeoTiff (INPE, 2017). A Tabela 8 especifica as folhas que foram usadas para cada bacia hidrográfica.

Tabela 8 – Folhas Topodata utilizadas para análise morfométrica.

| Bacia do Posto Fluviométrico | Folhas Topodata |
|-------------------------------------|--|
| 36020000 | 05S42_,05S405,06S42_,06S405 |
| 36470000 | 05S405, 06S405 |
| 36290000 | 06S405, 06S39_, 07S405, 07S39_ |
| 36160000 | 05S42_, 05S405, 06S42_, 06S405, 07S42_, 07S405 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente, foi realizado um tratamento no MDE utilizando o software *QuantumGIS* (versão 2.18), onde transformou-se os dados de elevação do tipo *float 32* para número inteiro 16 *bits*, objetivando otimizar o tempo de processamento. Além disso, foi realizada a reprojeção do raster para o sistema de projeção UTM, Datum Sirgas 2000 e zona 24S. Para realização da análise morfométrica utilizou-se o software da ESRI, *ArcMap* (versão 10.5) e a *toolbox ArcHydroTools* (versão 10.5).

Em seguida, utilizou-se a função *Fill Sinks* para preencher as depressões do MDE. Foi utilizada a função *Flow Direction* para criar uma malha com a direção do fluxo baseada nas altitudes do MDE. Aplicou-se então a função *Flow Accumulation* para criar uma malha de acumulação de fluxo associado, que contém o número acumulado de células a montante de uma célula, para cada célula na malha de entrada. Então, utilizou-se a função *Stream Definition* para criar uma malha do fluxo utilizando 1% da área da bacia como tamanho do limiar de fluxo. Depois, usou-se a função *Stream Segmentation* que cria uma grade de segmentos de fluxo que têm uma identificação única. Posteriormente, foi utilizada a função *Catchment Grid Delineation*, que cria uma grade em que cada célula contém um valor indicando qual bacia pertence a célula.

Depois, utilizou-se a função *Catchment Polygon Processing* para gerar polígonos das microbacias a partir da malha gerada na função anterior. Em seguida, utilizou-se a função *Drainage Line Processing* que converte a malha obtida na função *Stream Segmentation* em linhas de drenagem que contém o identificador da bacia em que reside. Logo após, a função

Adjoint Catchment Processing foi utilizada para gerar bacias agregadas a montante utilizando o resultado da função *Catchment Polygon* como entrada.

Posteriormente, utilizou-se a função *Drainage Point Processing*, que gera os pontos de drenagem associados a cada microbacia. Em seguida, aplicou-se a função *Longest Flow Path for Catchments* que gera o caminho de fluxo mais longo para cada microbacia na classe de recurso *Catchment* de entrada. Por fim, utilizou-se a função *Longest Flow Path for Adjoint Catchments*, que gera o caminho de fluxo mais longo para cada microbacia adjunta na classe de recurso *Adjoint Catchment*.

Além disso, foi criado um *Batch Point* no exutório de cada bacia para poder fazer o traçado da bacia hidrográfica. Então, a função *Batch Watershed Delineation* foi utilizada. As bacias hidrográficas traçadas coincidiram com os polígonos fornecidos pela FUNCEME. Foi utilizada a função *Longest Flow Path for Watersheds* para determinar o percurso de fluxo mais longo para a bacia. De posse dessas camadas calculadas pela ferramenta *ArcHydro* realizou-se a análise morfométrica da bacia.

A área e o perímetro de cada bacia hidrográfica foram calculados a partir da tabela de atributo no software *ArcMap*. O comprimento do rio principal (L) foi calculado a partir da tabela de atributos da saída da função *Longest Flow Path for Watersheds*. Não obstante, o comprimento do talvegue foi calculado através da ferramenta *Measure* no software *ArcMap* selecionando o início e fim do rio principal em linha reta.

A declividade média da bacia foi calculada utilizando a função *Slope* da ferramenta *ArcHydro*. Após calculado o Raster de declividade utilizou-se a ferramenta propriedade para visualizar a média desse parâmetro.

Além disso, a ordem do rio principal foi calculada a partir da *Arctoolbox* usando a ferramenta *Spatial Analyst tools*, do menu *Hydrology*, aplicando a função *Stream order* que utiliza os dados de entrada calculados pela ferramenta *ArcHydro* para calcular a ordem do rio principal utilizando o método descrito por Strahler (1952). A ordem dos rios é uma classificação que reflete o grau de ramificação dentro de uma bacia.

De posse de todos os dados obtidos anteriormente, calculou-se os parâmetros morfométricos da bacia de cada Posto Fluviométrico. O Fator de Forma da Bacia (K_f) que estabelece uma relação entre a largura média da bacia e o comprimento axial do curso d'água, foi calculado da seguinte forma:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Onde:

A = área da bacia em km².

L = comprimento da foz até o ponto mais longínquo na bacia (em km).

O Índice de Compacidade (K_c), que relaciona o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual à da bacia foi calculado utilizando a seguinte formula.

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde:

A = área da bacia (km²)

P = perímetro da bacia (km)

Calculou-se também o Índice de circularidade (IC) para as bacias, que mede o quanto a bacia se aproxima da forma circular.

$$IC = 12,57 * \frac{A}{P^2}$$

Onde:

A = área da bacia (km²)

P = perímetro da bacia (km)

A sinuosidade do rio principal (S) foi calculada através da razão entre o comprimento do rio principal e o comprimento do talvegue do rio.

$$S = \frac{L}{L_T}$$

Onde:

L = comprimento do rio principal (km)

L_T = comprimento do talvegue (km)

A declividade do álveo (S₁) foi calculada utilizando o comprimento do talvegue do rio principal e a diferença de elevação no ponto inicial e final.

$$S_1 = \frac{\Delta H}{L_T}$$

Onde:

ΔH = diferença de elevação (m)

L_T = comprimento do talvegue (m)

A densidade de drenagem (Dd) foi calculada pela razão entre o comprimento total de rios e a área da bacia. O comprimento total de rios foi calculado utilizando a tabela de

atributos do software *ArcMap* utilizando como dado de entrada a *Drainage Line* calculada pela ferramenta *ArcHydro*.

$$D_d = \frac{\sum l}{A} = km/km^2$$

Onde:

$\sum l$ = somatório do comprimento de todos os rios (km)

A = área da bacia (km²)

O tempo de concentração (T_c) das bacias hidrográficas foi calculado utilizando o método de descrito por Kirpich (1940), que utiliza o comprimento do rio principal e a diferença de cotas entre a nascente e o exutório.

$$T_c = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385}$$

Onde:

L = comprimento do rio principal (km)

Δh = diferença de elevação (m)

T_c = tempo de concentração em minutos

5.2 Dados Hidrometeorológicos

Os dados de precipitação foram obtidos através dos bancos de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional de Águas (ANA), do *Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS) e do produto MERGE do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) proposto por Rozante *et al.* (2010). As duas últimas bases são compostas por informações oriundas de estações automáticas e satélites.

As informações de evapotranspiração potencial (ETP) foram calculadas a partir dos dados de temperatura máxima, média e mínima obtidos através das estações do INMET, utilizando-se a metodologia proposta por Hargreaves e Samani (1985). De acordo com Hargreaves e Samani (1985), considerando os problemas associados com disponibilidade e confiabilidade dos dados climáticos no mundo e os possíveis erros associados aos mais sofisticados métodos para estimativa da necessidade hídrica das culturas, o método da estimativa através da temperatura é recomendado por ser muito simples e prático para a estimativa da evapotranspiração da cultura. O método proposto está descrito abaixo.

$$ET_0 = 0,0023 Q_0 (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} (T_{\text{méd}} + 17,8)$$

Onde:

ET_0 : Evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

Q_0 : Radiação extraterrestre (mm d^{-1});

$T_{\text{máx}}$: temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{\text{mín}}$: temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{\text{méd}}$: temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$).

Após a aquisição e preparo dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial, foi calculada a média espacial destas variáveis. Para tanto, utilizou-se o método do Polígono de Thiessen (Figura X a X), proposto por Thiessen (1911), no qual se utiliza a área de influência de cada posto de medição como ponderador para os dados (precipitação ou evapotranspiração). O método de Thiessen é usado para postos pluviométricos não uniformemente distribuídos, ponderando os valores obtidos em cada posto por sua zona de influência (STUDART, 2006).

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A}$$

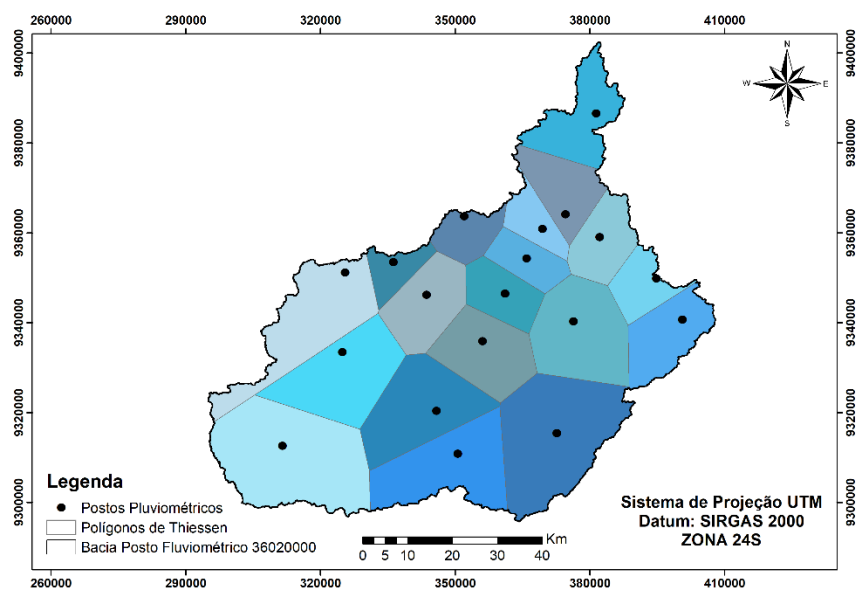
Onde:

\bar{P} : precipitação média na bacia (mm)

P_i : precipitação no posto i (mm)

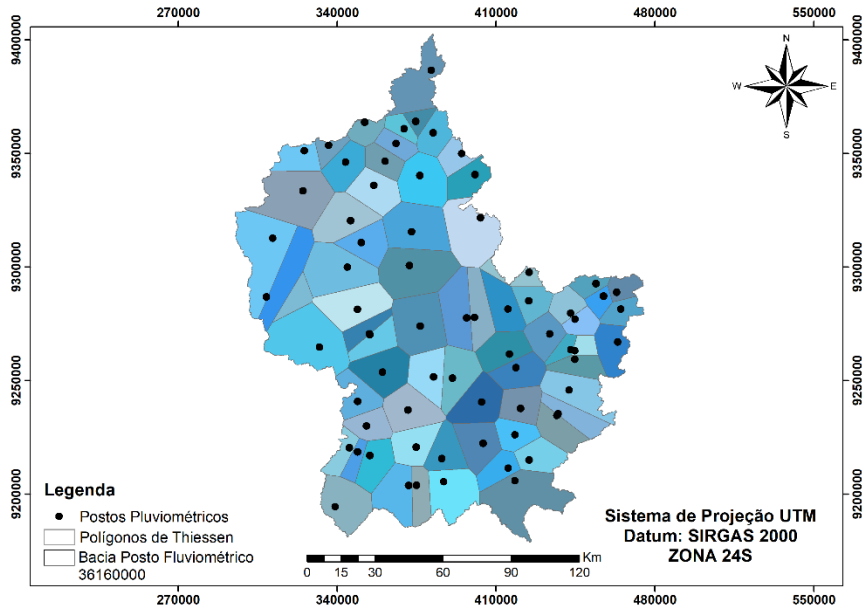
A_i : área do respectivo polígono, dentro da bacia (km^2)

Figura 8 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia 36020000.



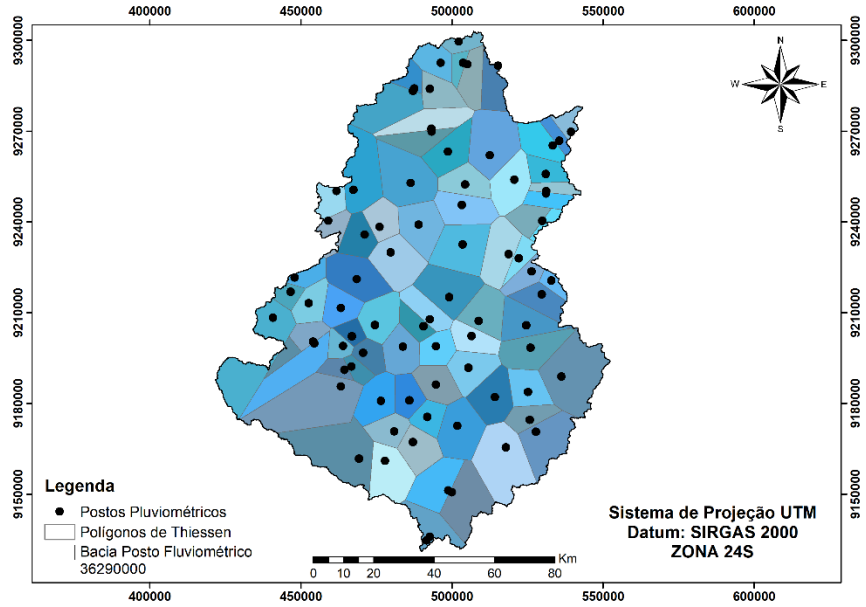
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36160000.



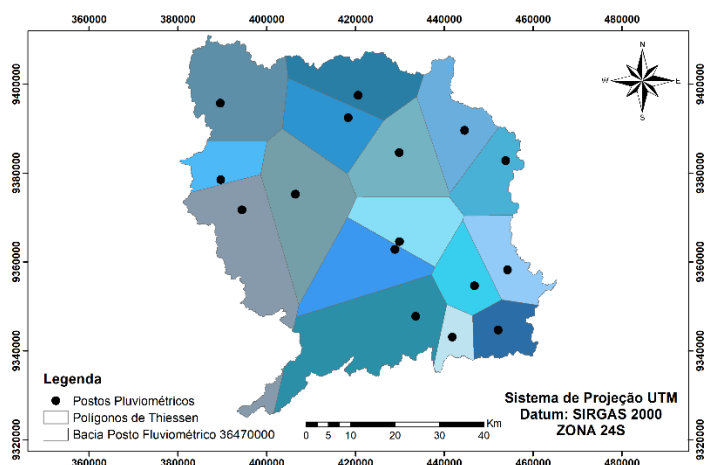
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36290000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Polígonos de Thiessen dos Postos Pluviométricos da Bacia do 36470000.



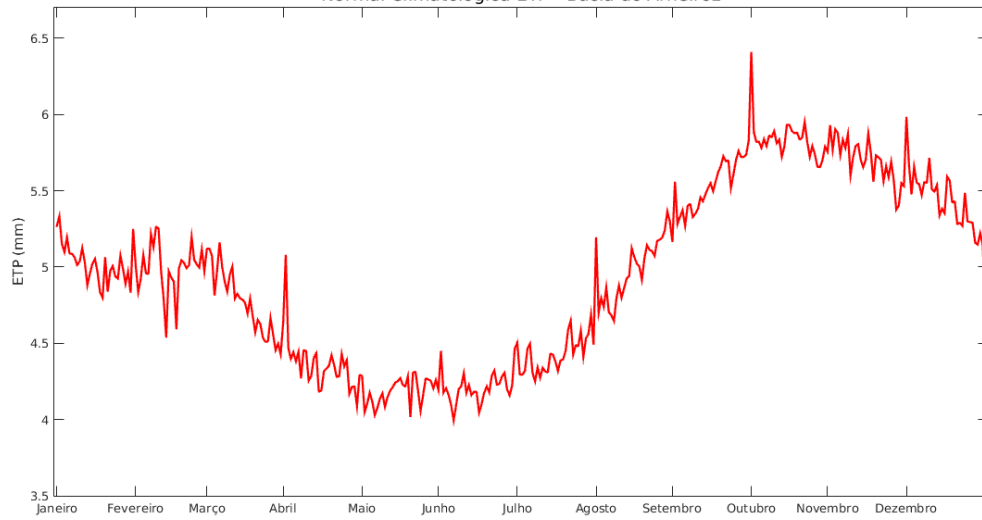
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados de precipitação e evapotranspiração potencial utilizados nesse estudo contemplam uma série histórica entre os anos de 1973 a 2016 (01/01/1973 a 31/12/2016). A quantidade de postos pluviométricos utilizados para o cálculo da precipitação média foram: 71 para a bacia do Posto 36160000, 16 para a bacia do Posto 36470000, 81 para a bacia do Posto 36290000 e 19 para a bacia do Posto 36020000.

Tanto os dados de ETP quanto os dados de precipitação que tinham falhas durante a série de dados foram corrigidos. No caso dos dados de precipitação, a correção foi realizada com base nos dados do MERGE e CHIRPS. Por outro lado, os dados de ETP foram corrigidos com base na normal climatológica de ETP para a região estudada.

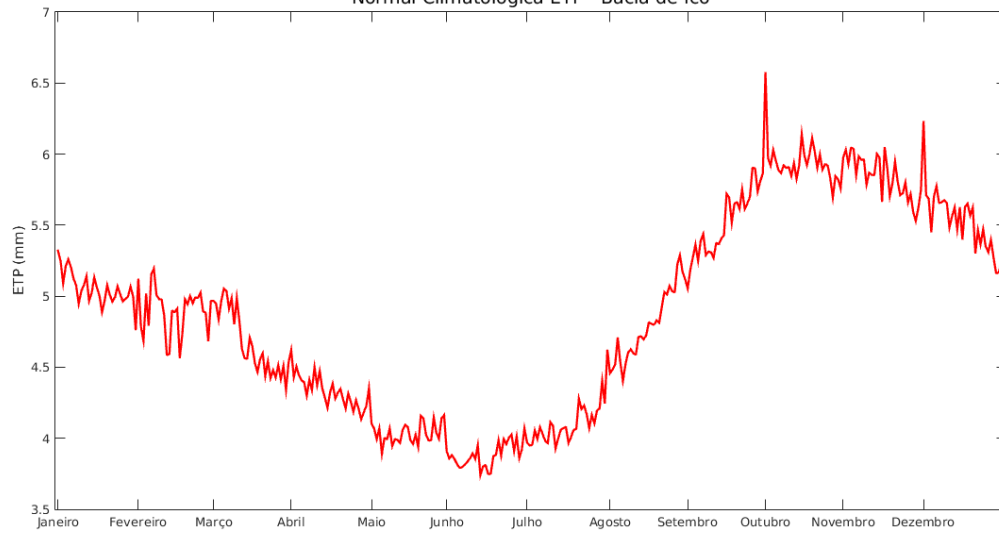
A normal climatológica de ETP para cada bacia foi calculada utilizando a mesma série histórica de dados citada acima, todavia optou-se pelo período de 1981 a 2010 (01/01/1981 a 31/12/2010). Desse modo, utilizou-se um algoritmo escrito em *Python*, o qual faz a média de todos os dados diferentes de NaN (*Not a number*) para cada dia do ano, percorre a série de dados e substitui os dados faltantes com os dados da normal climatológica. A seguir as normais de climatológicas de ETP para as bacias dos postos fluviométricos são representadas pelas Figura 12 a Figura 15.

Figura 12 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36020000.
Normal Climatológica ETP - Bacia do Arneiroz



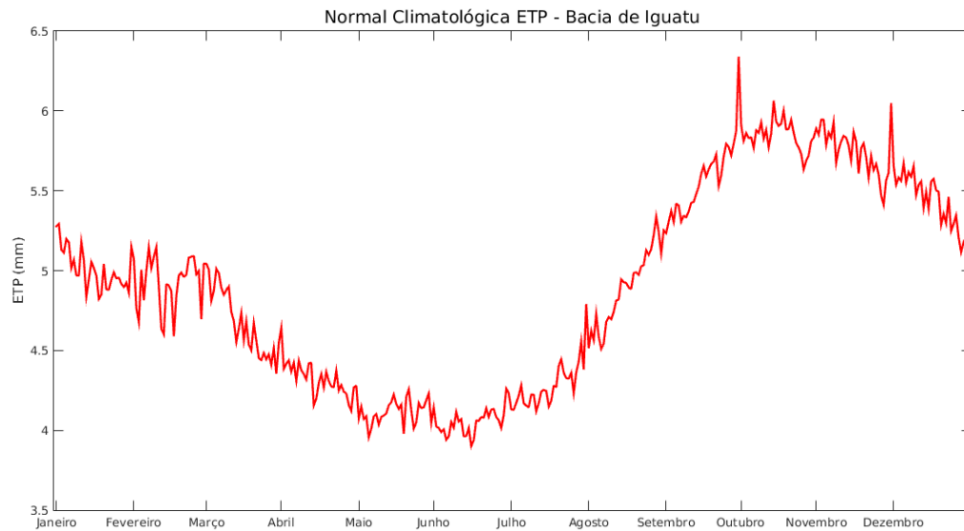
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36290000.
Normal Climatológica ETP - Bacia de Icó



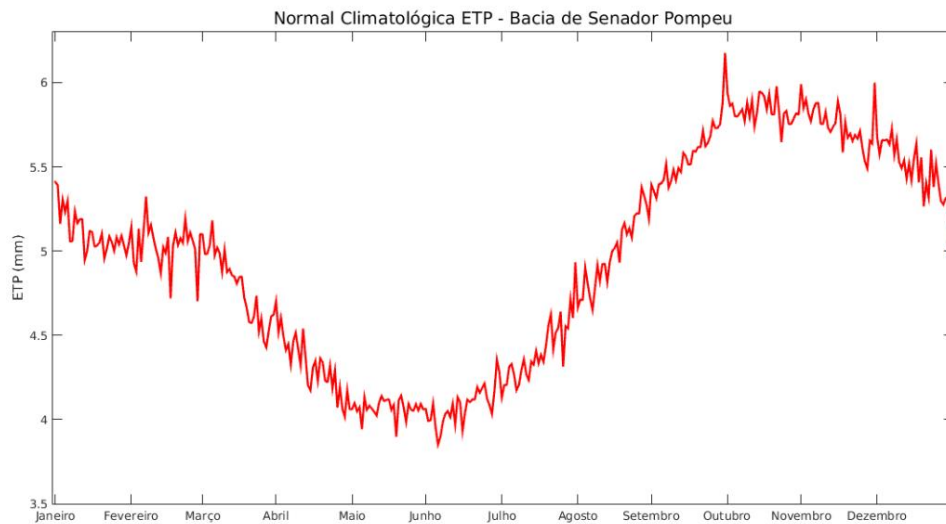
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36160000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Normal Climatológica de ETP para a Bacia do Posto Fluviométrico 36470000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados de entrada de vazão observada utilizados para testar a eficiência do modelo foram retirados do sistema de informação HidroWeb da ANA. Os dados dos postos fluviométricos utilizados estão expostos na Tabela 9. Os dados foram recortados a partir do dia 01/01/1973 até a data mais recente disponível para o posto fluviométrico com o objetivo de compatibilizar o período dos dados de vazão com os dados de precipitação e ETP.

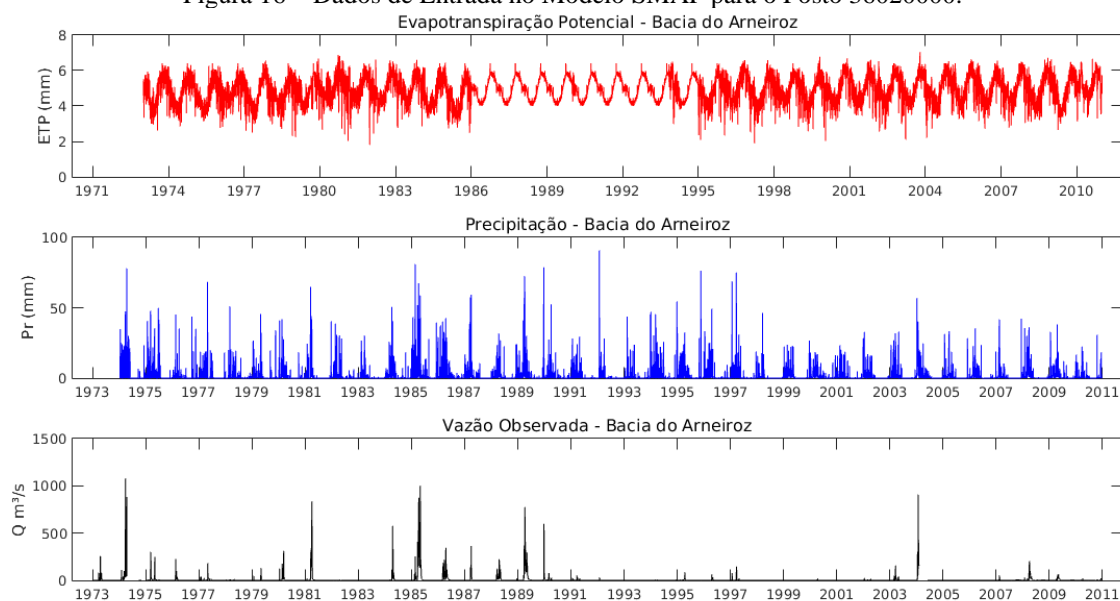
Tabela 9 – Informações dos Postos Fluviométricos utilizados no estudo.

| Código da Estação | Nome da Estação | Entidade Responsável | Município | Área de Drenagem (Km ²) | Nome do Rio | Latitude | Longitude |
|-------------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------------------------------|---------------|----------|-----------|
| 36290000 | ICÓ | ANA | ICÓ | 12.400,00 | RIO SALGADO | -6.4067 | -38.8672 |
| 36160000 | IGUATU | ANA | IGUATU | 20.700,00 | RIO JAGUARIBE | -6.3744 | -39.2933 |
| 36020000 | ARNEIROZ | ANA | ARNEIROZ | 5.870,00 | RIO JAGUARIBE | -6.3244 | -40.1617 |
| 36470000 | SENADOR POMPEU | ANA | SENADOR POMPEU | 4.530,00 | RIO BANABUIU | -5.5958 | -39.3811 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

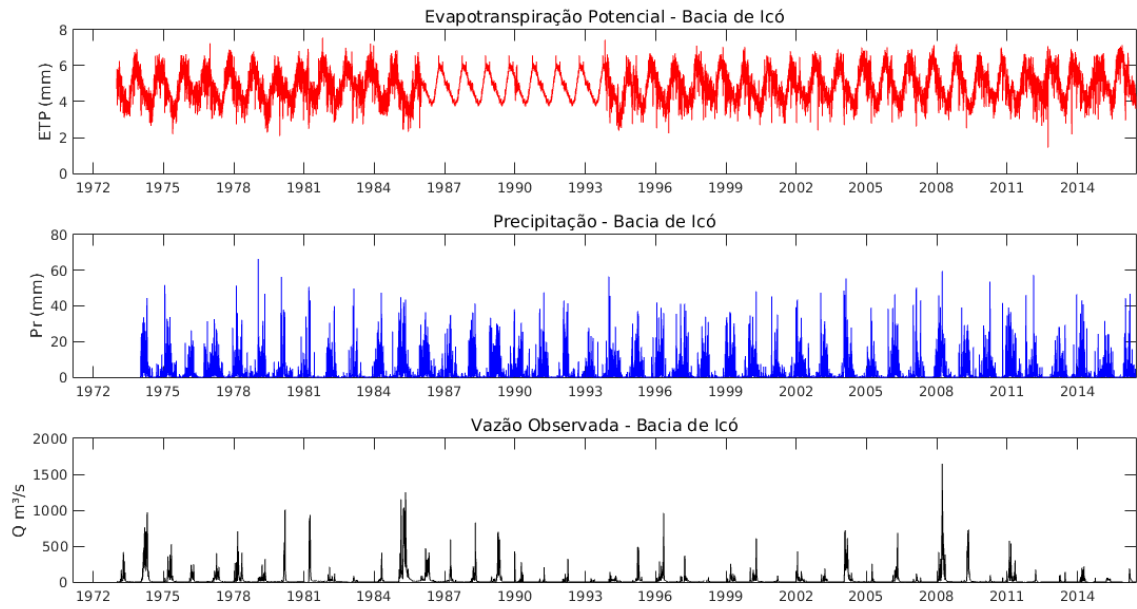
O pré-processamento dos dados de vazão observada dos postos selecionados foi feito utilizando um algoritmo escrito em *Python* o qual percorre os dados retirados do HydroWeb da ANA e, para cada dia, seleciona a vazão consistida, porém na ausência desse tipo de dado, a rotina escolhe o dado bruto disponível. Não obstante, na ausência de qualquer tipo de dados na série, o código computacional preenche esse dia com *NaN*, para facilitar o uso de indexadores na seleção e manipulação dos dados. Os dados de ETP, precipitação média e vazão observada utilizadas nesse estudo estão dispostos nos gráficos das Figura 16 a Figura 19 a seguir.

Figura 16 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36020000.



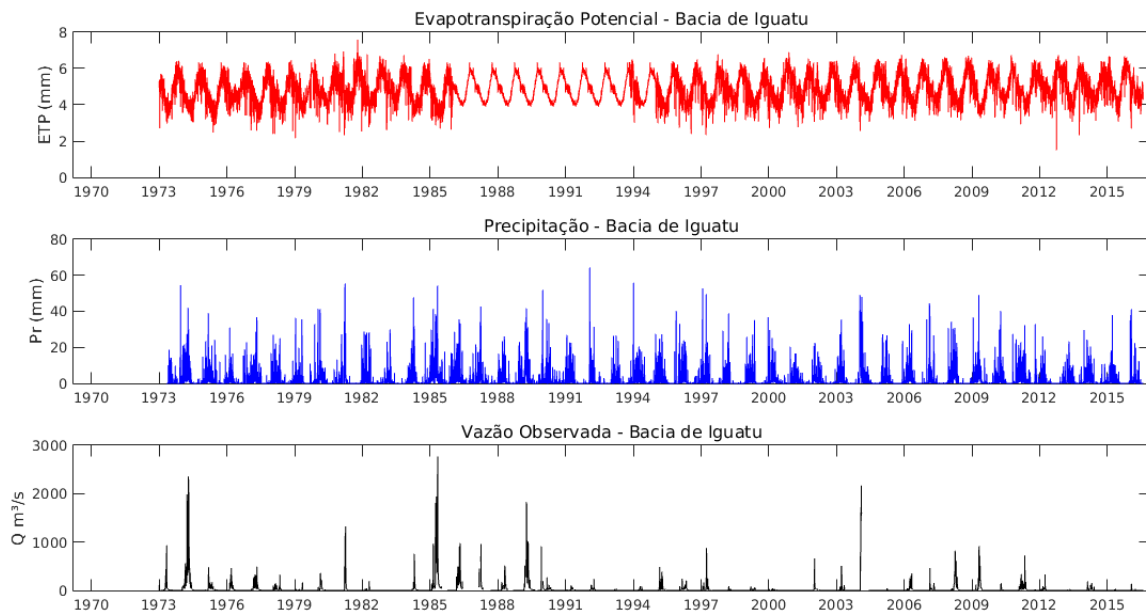
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36290000.



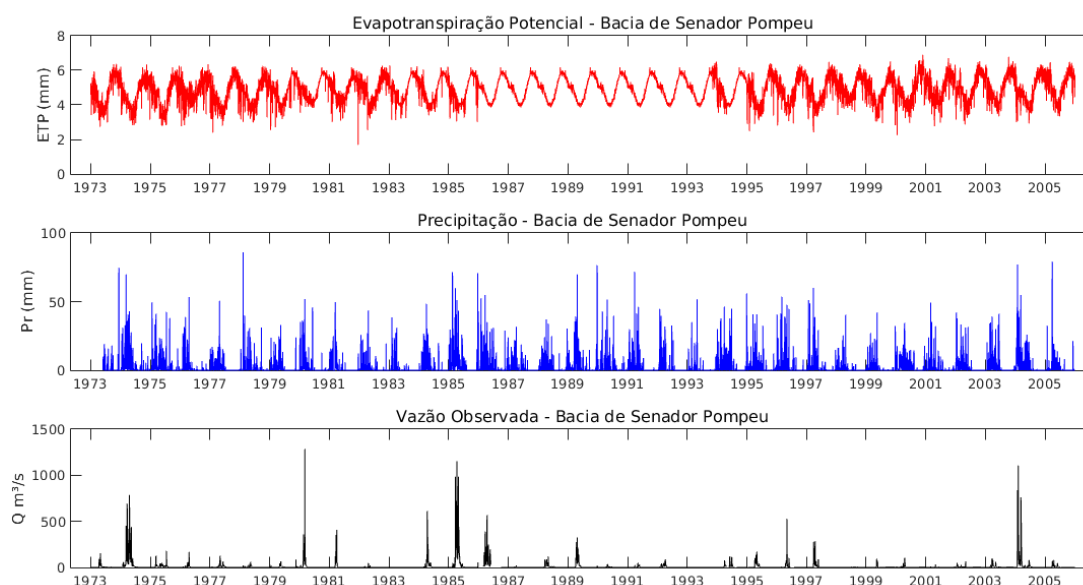
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36160000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Dados de Entrada no Modelo SMAP para o Posto 36470000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 O Modelo SMAP diário

O algoritmo utilizado nesse trabalho foi criado e adaptado por Barros (2007) e cedido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Barros (2007) implementou em linguagem MATLAB© o modelo SMAP na sua versão diária e utilizou técnicas heurísticas na calibração desse modelo hidrológico e na operação de reservatórios. Além disso, ele implementou diversos algoritmos multiobjectivo para facilitar a calibração do modelo SMAP e HYMOD.

Figura 20 – Representação do Modelo SMAP diário utilizado nessa composição.

| DADOS DE ENTRADA | PROCESSO SIMULADO | REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO | PARÂMETROS | DADOS DE SAÍDA |
|--|-------------------|--|---|---------------------------------|
| Precipitação Evapotranspiração potencial Vazão observada | Vazão | $R_{solo(i+1)} = R_{solo(i)} + P - E_s - E_r - Rec$ $R_{sup(i+1)} = R_{sup(i)} + E_s - E_d$ $R_{sub(i+1)} = R_{sub(i)} + Rec - E_b$ Inicialização: $R_{solo(1)} = Tu_{in} \cdot Str$ $R_{sup(1)} = 0$ $R_{sub(1)} = E_{bin} / (1 - k_k) / Ad * 86,4$ Onde: R_{solo} = reservatório do solo (zona aerada) R_{sup} = reservatório da superfície da bacia R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada) P = chuva E_s = escoamento superficial E_r = evapotranspiração real Rec = recarga subterrânea E_d = escoamento direto E_b = escoamento básico Tu_{in} = teor de umidade inicial (adimensional) E_{bin} = vazão básica inicial (m ³ /s) Ad = área de drenagem (km ²) | Str = capacidade de saturação do solo (mm) K_{2t} = constante de recessão do escoamento superficial (dias) C_{rec} = parâmetro de recarga subterrânea A_i = abstração inicial (mm) $Capc$ = capacidade de campo (%) K_{kt} = constante de recessão do escoamento básico (dias) Faixas de variação: $100 < Str < 2000$ $0,2 < K_{2t} < 20$ C_{rec} : fixo = 0 $0 < A_i < 10$ $0 < Capc < 100$ $0 < K_{kt} < 5$ Inicialização: $Tu_{in} = 0$ [%] $E_{bin} = 0$ [m ³ /s] | Série sintética de vazão diária |

Fonte: Adaptado de Santos e Fontes (2014).

Para este trabalho optou-se por utilizar o algoritmo evolucionário multiobjectivo MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*) para a calibração automática do modelo SMAP diário, pois de acordo com Barros (2007) o algoritmo MOPSO apresentou-se de maneira geral superior em densidade frente a outros algoritmos multiobjectivos. Os parâmetros de entrada (Tabela 10) escolhidos foram os mesmos descritos por Barros (2007) em sua dissertação.

Tabela 10 – Parâmetros de Entrada do Algoritmo MOPSO.

| Parâmetro | Valor |
|--------------------------------|-------|
| Número de Variáveis | 6 |
| Tamanho da população inicial | 100 |
| Número de Interações | 100 |
| Constante c_1 | 2 |
| Constante c_2 | 2 |
| Velocidade máxima da partícula | 0,1 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este trabalho seguiu-se as recomendações de Nunes *et al.* (2014) e escolheu-se o mês inicial do conjunto de dados de calibração estrategicamente em uma estação seca,

em que não houvesse vazão no rio, possibilitando assumir os valores de Ebin e Tuin como sendo iguais a zero. No caso do Ceará optou-se pelo mês de outubro. Na Tabela 11, a faixa de variação dos parâmetros de entrada do SMAP diário é ilustrada. Optou-se por esta faixa de seguindo as recomendações descritas por Barros (2007) em seus estudos.

Tabela 11 – Faixa de variação dos parâmetros de Entrada do SMAP diário.

| Parâmetro | Faixa de Variação | Unidades |
|----------------------|--------------------------|---------------------|
| Str | 100 - 2000 | [mm] |
| K2t | 0,2 - 10 | [dias] |
| Crec | 0 | [%] |
| Ai | 0 - 10 | [mm] |
| Capc | 0 - 100 | [%] |
| Kkt | 0 | [dias] |
| Inicialização | | |
| Tuin | 0 | [%] |
| Ebin | 0 | [m ³ /s] |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Calibração-Validação

Primeiramente, foi feita uma análise nos dados de vazão observada para verificar a existência de falhas na série de vazão. O tamanho da série de dados utilizadas para a calibração foi o recomendado por Barros (2007) que consiste em aproximadamente 8 anos (2922 dias), selecionando tanto períodos de cheia quanto de seca. Optou-se por selecionar 8 anos consecutivos, para garantir que os dados estão no mesmo regime climatológico interdecadal.

Não foi utilizado período de aquecimento para calibração do modelo, pois foi escolhido e fixado para todos os experimentos o mês de outubro, período seco, para início do período de calibração. Neste período as variáveis de transferência do solo para o subsolo são quase nulas e isso facilita a aferição do valor inicial para o escoamento de base.

Na validação foi utilizado o mesmo tamanho da série (8 anos) para as bacias do Postos fluviométricos 36160000 e 36290000 que possuem uma série de vazão mais concisa e com menos falhas. Já para a bacia do 36020000 e do 36470000 a validação foi realizada para uma série de dados de 8 anos, mas devido a incoerências nos valores dos índices de desempenho optou-se por fazer a validação utilizando uma série menor de 1 e 5 anos respectivamente.

A escolha dos melhores parâmetros de calibração do SMAP diário foi realizada utilizando-se como critério o maior valor da função objetivo (FO1) que é o coeficiente de Nash–Sutcliffe (1970) da série de calibração.

5.5 Análise de desempenho dos parâmetros calibrados

Para analisar o desempenho da série de vazão calculada pelo modelo, utilizou-se a linguagem R e o pacote HydroGOF proposto por Zambrano-Bigiarini (2014) que calcula diversos índices de desempenho que mensuram a qualidade do ajuste (*Goodness-of-fit*) entre os dados observados e os dados simulados. Além do NSE da série e do NSPicos foram escolhidos outros 6 índices de avaliação de desempenho entre simulado e observado. A seguir os índices de avaliação de desempenho escolhidos são brevemente descritos.

O índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE) foi desenvolvido por Gupta *et al.* (2009), com o objetivo de fornecer uma decomposição do *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE). O KGE facilita a análise da importância dos diferentes componentes: correlação, tendência e variabilidade. Este índice pode variar entre +1 e $-\infty$, sendo que quanto mais próximo de 1 mais acurácia possui o modelo. O KGE é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$KGE = 1 - (r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_O} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_S}{\mu_O} - 1\right)^2$$

Onde r corresponde ao coeficiente de Pearson, μ e σ correspondem respectivamente a média e ao desvio padrão dos dados. O “o” corresponde a série de vazões observada e o “s” a série gerada pelo modelo (RIBEIRO *et al.*, 2014).

O Índice de concordância (d) de Willmott (1981) é uma função normalizada que computa o quanto a série simulada se aproxima da observada. Este pode variar entre 0 e 1, sendo que 0 indica que não existe nenhuma relação entre as duas séries e 1 indica que as séries são iguais (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2014).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Onde S representa a série temporal gerada pelo modelo, \bar{O} corresponde à média da série observada, e N corresponde ao tamanho da série temporal.

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) dá o desvio padrão do erro de previsão do modelo (entre a série simulada e a observada). Um valor menor indica melhor desempenho do modelo. O RMSE é calculado através da seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2}$$

Onde S representa a série simulada pelo modelo, O a série observada e N o tamanho da série.

O percentual de viés (PBIAS) das vazões simuladas em relação as observadas, mede a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os observados (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2014). A PBIAS pode ser calculada através da seguinte expressão matemática:

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^N Oi}$$

Onde S representa a série simulada pelo modelo, O a série observada e N o tamanho da série. O valor ideal do PBIAS é 0, com valores de baixa magnitude indicando simulação de modelo precisa. Os valores positivos indicam viés de superestimação, enquanto valores negativos indicam viés de subestimação do modelo (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2014).

O coeficiente de correlação de Pearson (R) e o coeficiente de determinação (R²) descrevem o grau de colinearidade entre os dados simulados e observados. O coeficiente de correlação, que varia de -1 a 1, é um índice do grau de relação linear entre dados observados e simulados. Se R = 0, não existe uma relação linear. Se R = 1 ou -1, existe um relacionamento linear positivo ou negativo perfeito. Da mesma forma, R² descreve a proporção da variância em dados medidos explicada pelo modelo. R² varia de 0 a 1, com valores mais altos indicando menos variação de erro, e tipicamente valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis (SANTHI *et al.*, 2001; VAN LIEW *et al.*, 2003 *apud* MORIASI *et al.*, 2007).

Moriasi *et al.* (2007) criou uma classificação (Tabela X) para o resultado de 3 índices de desempenho utilizados para analisar modelos hidrológicos. Dois desses índices são utilizados nesse trabalho: NSE e PBIAS (%).

Tabela 12 – Classificação dos Índices de desempenho.

| Classificação | NSE da Série (%) | PBIAS (%) |
|----------------|---------------------|------------------------------|
| Muito Bom | $75 < NSE \leq 100$ | $PBIAS < \pm 10$ |
| Bom | $65 < NSE \leq 75$ | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ |
| Satisfatório | $50 < NSE \leq 65$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Insatisfatório | $NSE \leq 50$ | $PBIAS \geq \pm 25$ |

Fonte: Moriasi et al. (2007).

5.6 Preenchimento das falhas nos dados dos Postos Fluviométricos

O preenchimento das falhas de dados dos postos Fluviométricos foi realizado utilizando os parâmetros do SMAP da calibração de maior NSE da série. Para tanto, utilizou-se um algoritmo em MATLAB © que percorre a série de dados de vazão e substitui os valores ausentes (*NaN*) pela vazão simulada pelo modelo SMAP diário.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise Morfométrica

O resultado da análise morfométrica das bacias dos postos fluviométricos está resumido na Tabela 13.

Tabela 13 – Caracterização morfométrica das bacias dos Postos fluviométricos estudados.

| Características Físicas | Bacia Posto 36020000 | Bacia Posto 36470000 | Bacia Posto 36290000 | Bacia Posto 36160000 |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Área de Drenagem (km ²) | 5870,00 | 4530,00 | 12400,00 | 20700,00 |
| Perímetro (km) | 633,60 | 579,95 | 953,68 | 1449,01 |
| Comprimento do Rio principal (km) | 156,96 | 155,39 | 366,72 | 304,44 |
| Comprimento do Talvegue (km) | 102,10 | 76,60 | 142,97 | 136,48 |
| Fator de Forma (Kf) | 0,24 | 0,19 | 0,09 | 0,22 |
| Índice de Compacidade (Kc) | 2,31 | 2,41 | 2,40 | 2,81 |
| Índice de Circularidade (IC) | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,12 |
| Ordem da Bacia | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Densidade de Drenagem (km/km ²) | 0,1071 | 0,1375 | 0,0832 | 0,0622 |
| Sinuosidade | 1,54 | 2,03 | 2,57 | 2,23 |
| Declividade (m/m) | 0,0038 | 0,0085 | 0,0055 | 0,0037 |
| Declividade Média (%) | 6,27 | 11,05 | 8,19 | 8,17 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as quatro bacias dos postos fluviométricos possuem um fator de forma baixo indicando que essas possuem baixa propensão a enchentes. Os índices de compacidade das quatro bacias estão aproximadamente na mesma faixa e são significativamente maiores que 1 indicando a não circularidade das bacias e menor propensão dessas a enchentes. Os rios de todas as bacias estudadas foram classificados como ordem 4.

O tempo de concentração calculado através da fórmula de Kirpich (1940) indica o tempo que a água demora para chegar do ponto mais distante da bacia ao exutório, nesse caso considerado como o posto fluviométrico. Na Tabela 14 estão dispostos os tempos de concentração das bacias dos postos fluviométricos correspondentes.

Tabela 14 – Tempo de concentração das Bacias dos Postos fluviométricos.

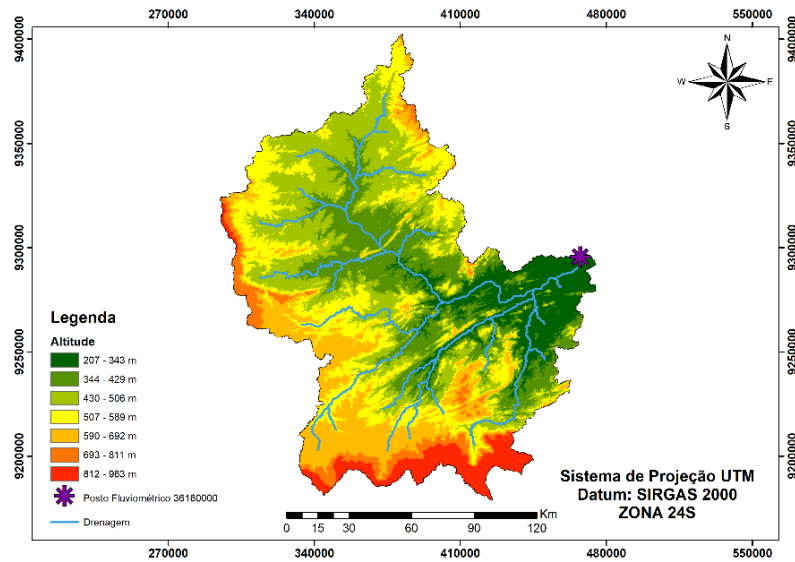
| Bacia Hidrográfica | Tempo de Concentração (dias) |
|---------------------------|-------------------------------------|
| 36020000 | 1,31 |
| 36470000 | 1,06 |
| 36290000 | 2,64 |
| 36160000 | 2,52 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As bacias dos postos 36020000 e 36470000 possuem tempo de concentração relativamente pequenos, entretanto, uma vez que estes são maiores que um dia, eles podem ser relevantes para o estudo de propagação entre uma bacia e outra. Os postos 36290000 e 36160000 apresentaram tempos de concentração superiores a 2,5 dias indicando a necessidade do estudo de propagação de vazão para essas bacias.

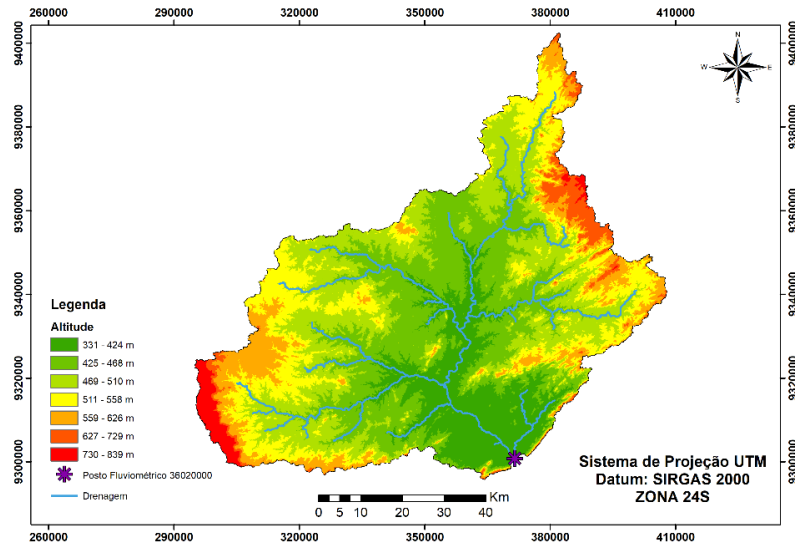
Os mapas hipsométricos das bacias dos postos fluviométricos estão dispostos nas Figura 21 a Figura 24. Além da altitude, estes mapas destacam a localização dos Postos Fluviométricos e a drenagem das bacias.

Figura 21 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36160000

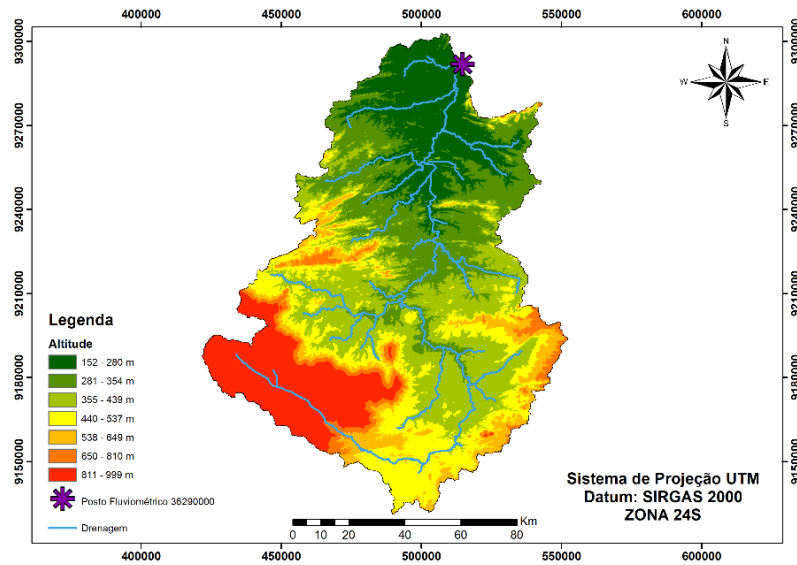


Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36020000.

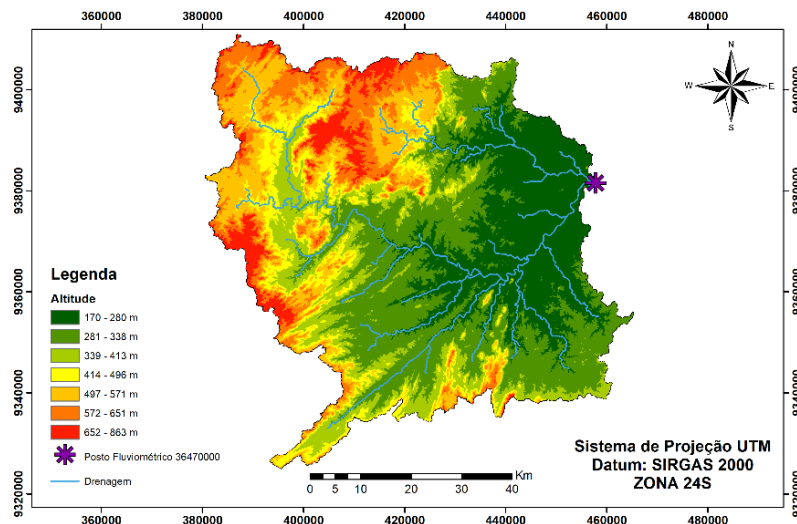


Fonte: Elaborada pelo autor.
 Figura 23 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36290000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Mapa hipsométrico da Bacia do Posto 36470000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 Calibração e Validação do Modelo SMAP

Todos os postos fluviométricos estudados neste trabalho possuem diversas falhas na série de medição de vazão. Este fato limitou a quantidade de calibrações, pois é recomendado se utilizar 8 anos para calibração e 8 anos de um período posterior ao da calibração para a realização da validação dos parâmetros calibrados. Tanto os parâmetros

Crec e kkt quanto as variáveis de inicialização Ebin e Tuin foram fixados em 0 para todas as simulações.

Foram realizadas 7 calibrações do modelo SMAP diário para a bacia do Posto Fluviométrico 36020000 e os resultados para estes eventos estão expostos na Tabela 15.

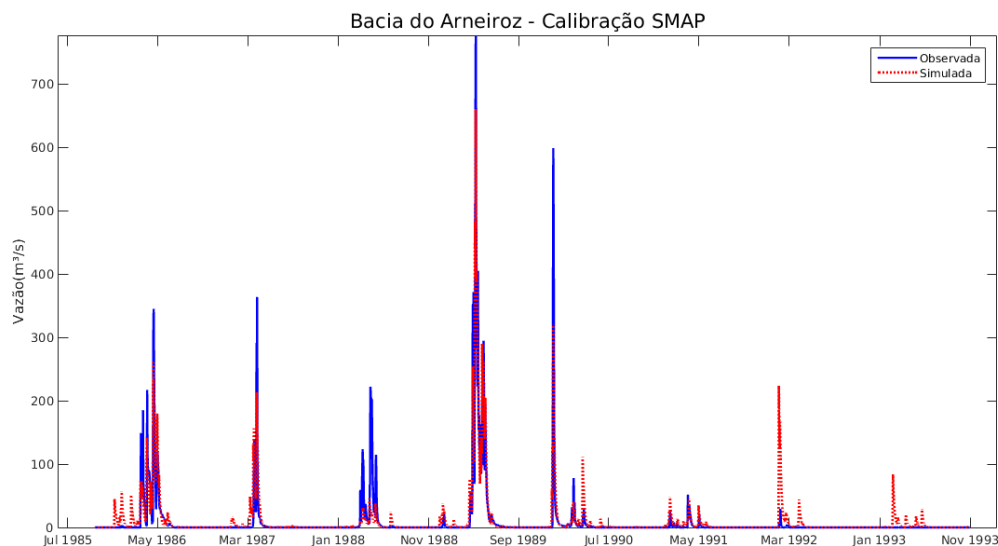
Tabela 15 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36020000.

| - | Período | NSE Série (%) | NSPicos (%) | Str (mm) | k2t (dias) | Ai (mm) | Capc (%) |
|-------------|-------------------------|---------------|-------------|----------|------------|---------|----------|
| Calibração | 01/10/1980 - 31/10/1988 | 39,62 | 42,73 | 884,46 | 2,00 | 1,80 | 60,64 |
| Validação | 01/10/1989 - 31/10/1997 | 33,42 | 39,85 | | | | |
| Calibração | 01/10/1981 - 31/10/1989 | 44,33 | 43,14 | 855,09 | 3,76 | 1,12 | 17,74 |
| Validação | 01/10/1990 - 31/10/1998 | -29,02 | 47,80 | | | | |
| Calibração | 01/10/1982 - 31/10/1990 | 42,32 | 43,79 | 821,53 | 1,88 | 1,78 | 46,03 |
| Validação | 01/10/1991 - 31/10/1999 | -134,20 | 5,73 | | | | |
| Calibração | 01/10/1983 - 31/10/1991 | 42,74 | 43,99 | 821,53 | 1,88 | 1,78 | 46,03 |
| Validação | 01/10/1992 - 31/10/2000 | -70,22 | 30,64 | | | | |
| Calibração | 01/10/1984 - 31/10/1992 | 46,18 | 46,02 | 786,32 | 3,17 | 2,31 | 62,25 |
| Validação | 01/10/1993 - 31/10/2001 | -7,96 | 57,99 | | | | |
| Calibração | 01/10/1985 - 31/10/1993 | 76,04 | 77,79 | 388,48 | 3,29 | 1,01 | 55,15 |
| Validação 1 | 01/10/1994 - 31/10/2002 | -294,80 | -2,73 | | | | |
| Validação 2 | 01/01/2003 - 31/12/2003 | 45,57 | 67,27 | | | | |
| Calibração | 01/10/1986 - 31/10/1994 | 75,8 | 77,39 | 383,51 | 3,17 | 1,76 | 58,00 |
| Validação | 01/10/1995 - 31/10/2003 | -117,40 | 41,61 | | | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os melhores parâmetros obtidos para o posto 36020000 foram os referentes ao período de 01/10/1985 a 31/10/1993, com NSE da Série de aproximadamente 76% e NSPicos de 77,8 %. O hidrograma sintético obtido através desses parâmetros e o hidrograma observado estão ilustrados na Figura 25. Percebe-se uma leve subestimação dos picos de vazão no período de março/1986 a março/1987 e também um pequeno atraso dos picos para este intervalo. No período de 1988 a 1990 o modelo subestima consideravelmente as vazões no período chuvoso. Por outro lado, o modelo superestima as vazões para o período chuvoso de 1992 e 1993.

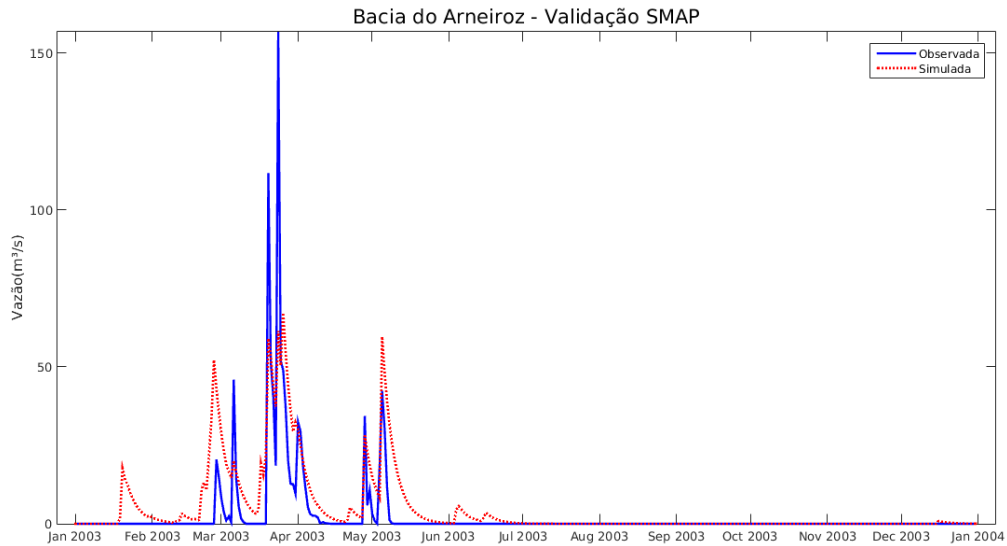
Figura 25 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36020000. Período de Calibração 01/10/1985 a 31/10/93



Fonte: Elaborada pelo autor.

A validação dos parâmetros do evento de calibração de maior NSE da série para o período de 01/10/1994 a 31/10/2002 foi insatisfatória, uma vez que o NSE da série de validação obtido foi de -294,80%, indicando problemas na série observada ou nas considerações realizadas para a calibração do modelo. Além disso, foi testado um período mais curto de validação (01/01/2003 a 31/12/2003), demonstrado na Figura 26, com o objetivo de verificar o comportamento do modelo e do hidrograma e foi obtido um NSE da Série de aproximadamente 45,6% e de NS de Picos de 67,27%. Todavia, ao analisar o hidrograma dessa validação percebe-se a superestimação da vazão no mês de fevereiro e um adiantamento e subestimação dos picos de vazão para o período chuvoso (Março a Maio).

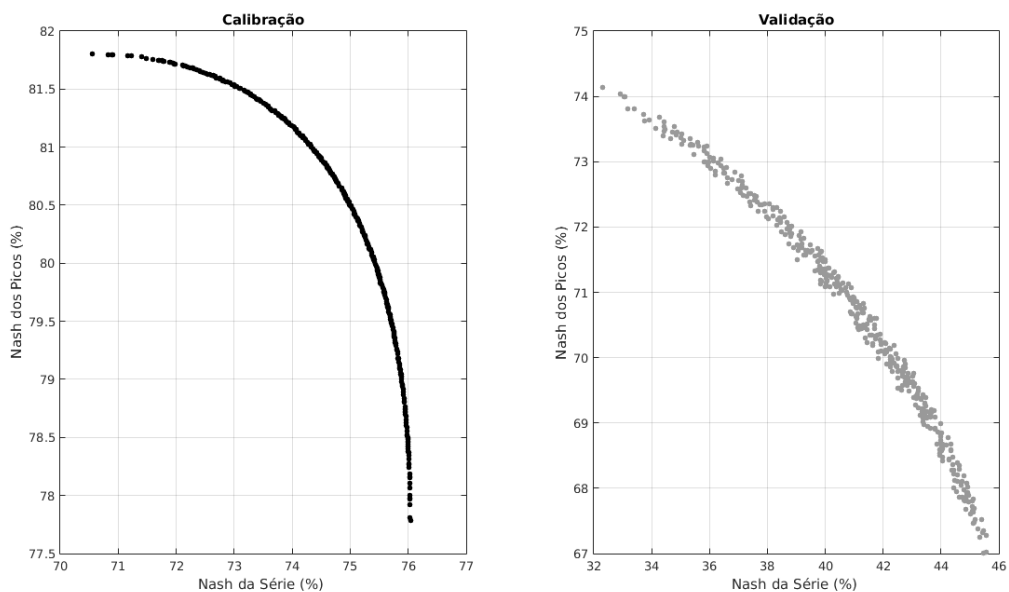
Figura 26 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36020000. Período de Validação 01/01/2003 a 31/12/2003.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 27 ilustra a frente de Pareto para a calibração do SMAP para o Posto 36020000 referente ao período de 01/10/1985 a 31/10/1993 e para a validação referente ao período de 01/01/2003 a 31/12/2003. Para ambas frentes de Pareto (Calibração e Validação) a maximização do NSE da série implica na minimização do NSPicos.

Figura 27 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36020000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizadas 7 calibrações do modelo SMAP diário para a bacia do Posto Fluviométrico 36290000 e os resultados para estes eventos estão expostos na Tabela 16.

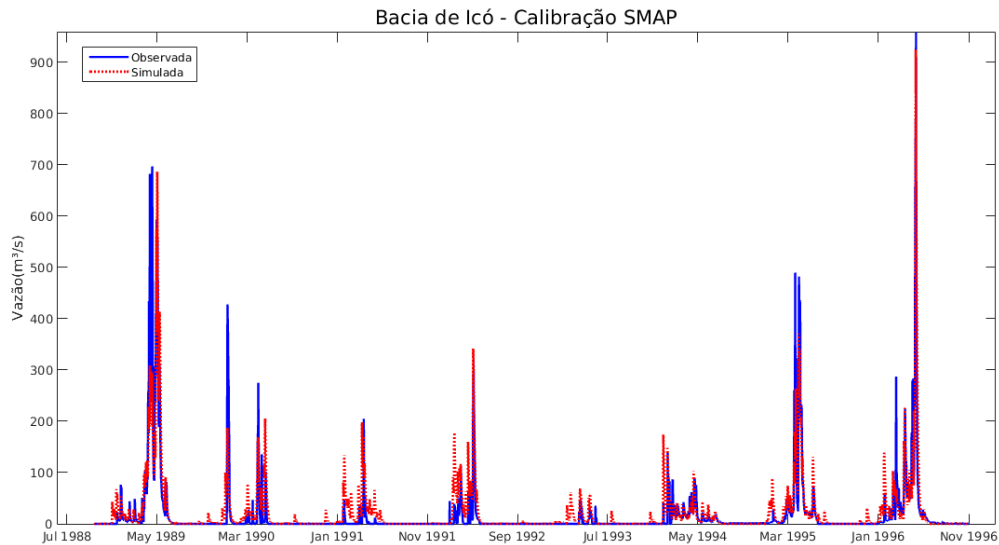
Tabela 16 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36290000.

| - | Período | NSE Série (%) | NSPicos (%) | Str (mm) | k2t (dias) | Ai (mm) | Capc (%) |
|------------|-------------------------|---------------|-------------|----------|------------|---------|----------|
| Calibração | 01/10/1983 - 31/10/1991 | 54,32 | 63,03 | 537,69 | 5,47 | 1,00 | 67,16 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 64,13 | 62,50 | | | | |
| Calibração | 01/10/1984 - 31/10/1992 | 55,79 | 61,74 | 553,40 | 5,04 | 1,00 | 56,85 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 65,21 | 63,73 | | | | |
| Calibração | 01/10/1985 - 31/10/1993 | 66,82 | 67,69 | 479,19 | 3,34 | 1,01 | 37,90 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 64,23 | 70,57 | | | | |
| Calibração | 01/10/1986 - 31/10/1994 | 67,46 | 67,57 | 498,30 | 3,37 | 1,00 | 50,58 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 66,47 | 69,64 | | | | |
| Calibração | 01/10/1987 - 31/10/1995 | 70,02 | 69,43 | 495,60 | 3,42 | 1,00 | 44,15 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 66,20 | 69,70 | | | | |
| Calibração | 01/10/1988 - 31/10/1996 | 74,70 | 76,76 | 478,20 | 3,15 | 1,27 | 41,36 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 63,80 | 70,82 | | | | |
| Calibração | 01/10/1989 - 31/10/1997 | 69,42 | 72,30 | 475,94 | 3,37 | 2,87 | 38,04 |
| Validação | 01/10/2002 - 31/10/2010 | 61,00 | 67,53 | | | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os melhores parâmetros obtidos para o posto 36290000 foram os referentes ao período de 01/10/1988 a 31/10/1996, com NSE da Série de aproximadamente 75% e NSPicos de 76,76%. O hidrograma sintético obtido através desses parâmetros e o hidrograma observado estão ilustrados na *Figura 28 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36290000. Período de Calibração 01/10/1988 a 31/10/1996.* Figura 28. Percebe-se uma leve subestimação dos picos de vazão e também um pequeno atraso dos picos para o período chuvoso de 1989 e 1990. Em geral, a simulação de vazão do modelo representou satisfatoriamente o comportamento hidrológico da bacia.

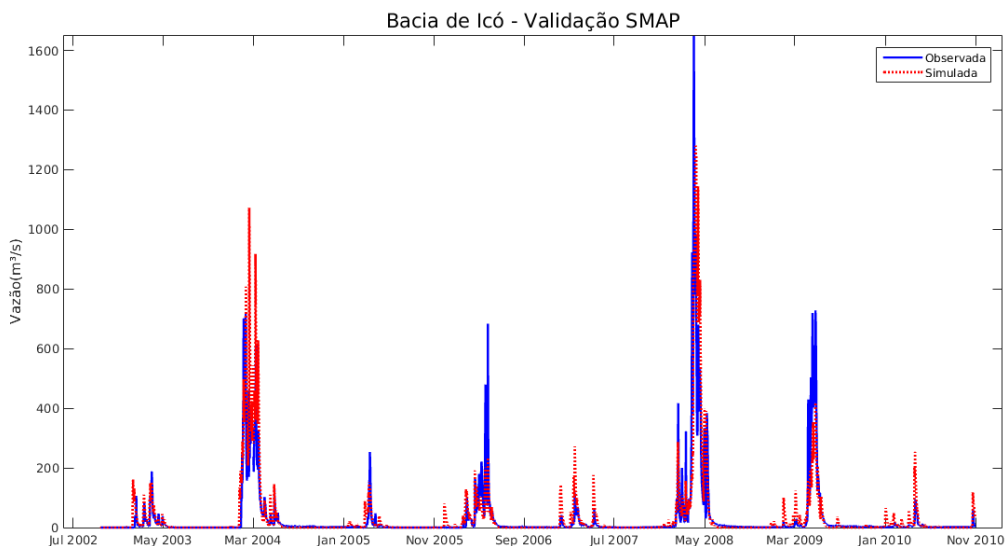
Figura 28 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36290000. Período de Calibração 01/10/1988 a 31/10/1996.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A validação dos parâmetros do evento de calibração de maior NSE da série para o período de 01/10/2002 a 31/10/2010 foi satisfatória, uma vez que o NSE da série de validação obtido foi de 63,80% e o NSPico foi 70,82%. Analisando-se o hidrograma da validação (Figura 29) percebe-se um atraso e superestimação dos picos de vazão simulada para o período chuvoso de março de 2004. Além disso, nota-se que o modelo subestimou a vazão no período chuvoso de 2006, 2008 e 2009.

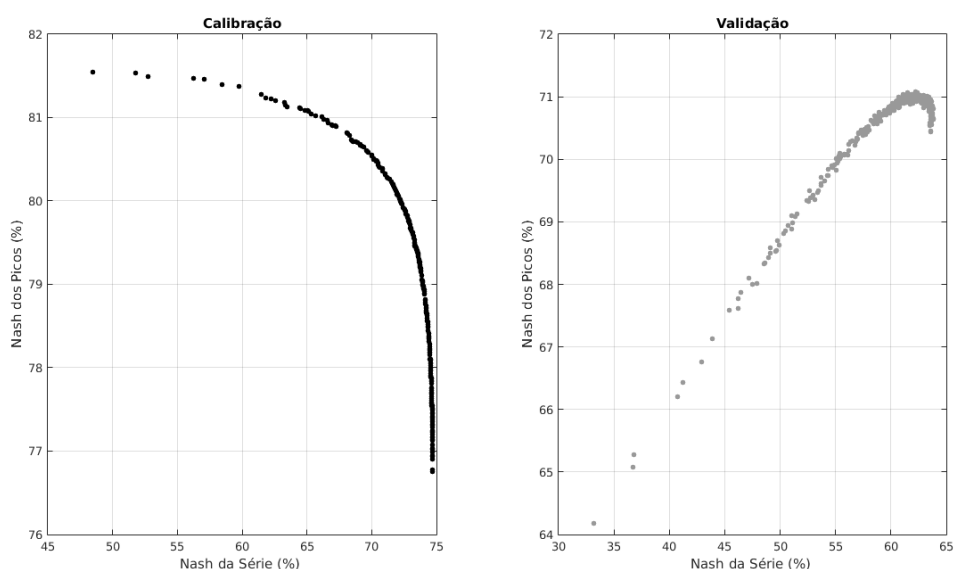
Figura 29 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36290000. Período de Validação 01/10/2002 a 31/10/2010.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 30 ilustra a frente de Pareto para a calibração do SMAP para o Posto 36290000 referente ao período de 01/10/1988 a 31/10/1996 e para a validação referente ao período de 01/10/2002 a 31/10/2010. Na frente de Pareto de calibração a maximização do NSE da série implica a minimização do NSPicos. Por outro lado, na frente de Pareto de validação a maximização do NSE da série resulta também na maximização do Nash de Picos até certo ponto, aproximadamente NSE da série de 62%.

Figura 30 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36290000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizadas 6 calibrações do modelo SMAP diário para a bacia do Posto Fluviométrico 36160000 e os resultados para estes eventos estão expostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36160000.

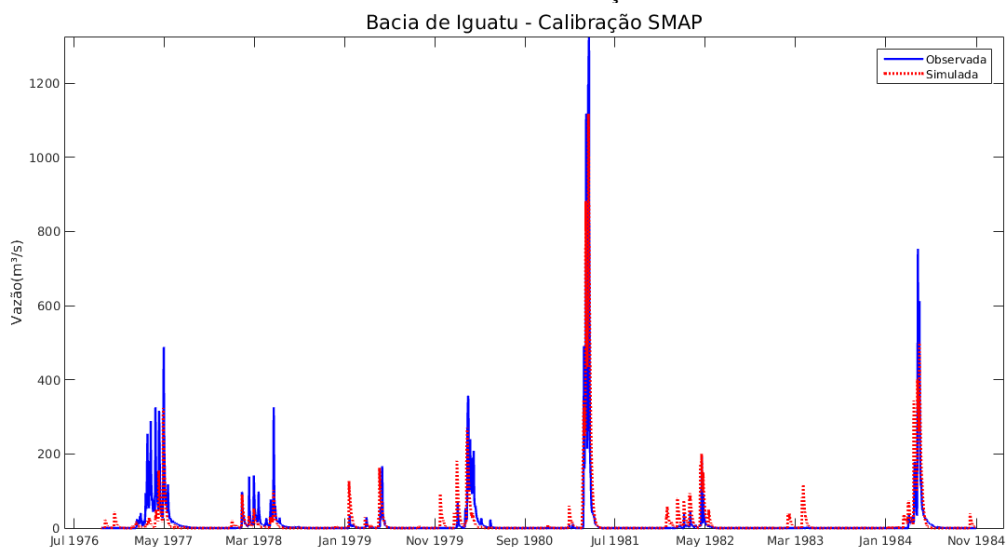
| - | Período | NSE Série (%) | NSPicos (%) | Str (mm) | k2t (dias) | Ai (mm) | Capc (%) |
|------------|-------------------------|---------------|-------------|----------|------------|---------|----------|
| Calibração | 01/10/1974 - 31/10/1982 | 68,25 | 71,29 | 298,72 | 4,63 | 2,37 | 46,28 |
| Validação | 01/10/1989 - 31/10/1997 | 12,13 | 46,93 | | | | |
| Calibração | 01/10/1975 - 31/10/1983 | 67,90 | 70,62 | 293,14 | 4,35 | 3,74 | 56,62 |
| Validação | 01/10/1989 - 31/10/1997 | 16,97 | 45,50 | | | | |
| Calibração | 01/10/1976 - 31/10/1984 | 71,69 | 74,61 | 292,61 | 3,94 | 5,71 | 71,66 |
| Validação | 01/10/1990 - 31/10/1998 | 28,24 | 58,29 | | | | |
| Calibração | 01/10/1989 - 31/10/1997 | 32,97 | 36,34 | 378,21 | 6,88 | 3,09 | 48,10 |
| Validação | 01/10/2004 - 31/12/2010 | 74,42 | 78,72 | | | | |
| Calibração | 01/10/1990 - 31/10/1998 | 43,67 | 50,45 | 361,95 | 7,18 | 3,66 | 53,28 |
| Validação | 01/10/2004 - 31/12/2010 | 74,15 | 76,84 | | | | |
| Calibração | 01/10/1991 - 31/10/1999 | 43,69 | 50,25 | 372,93 | 7,15 | 3,38 | 31,21 |

| | | | | | | | |
|-----------|-------------------------|-------|-------|--|--|--|--|
| Validação | 01/10/2004 - 31/12/2010 | 74,32 | 77,42 | | | | |
|-----------|-------------------------|-------|-------|--|--|--|--|

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os melhores parâmetros obtidos para o posto 36160000 foram os referentes ao período de 01/10/1976 a 31/10/1984, com NSE da Série de aproximadamente 72% e NSPicos de 74,61%. O hidrograma sintético obtido através desses parâmetros e o hidrograma observado estão ilustrados na Figura 31. Nota-se que o modelo subestima a vazão principalmente nos períodos chuvosos dos anos de 1977, 1978, 1981 e 1984. Por outro lado, o modelo apresenta um adiantamento dos picos e superestima a vazão no início do período chuvoso dos anos de 1979, 1980, 1982 e 1983. Em suma, na maior parte do período de calibração o modelo se comporta satisfatoriamente.

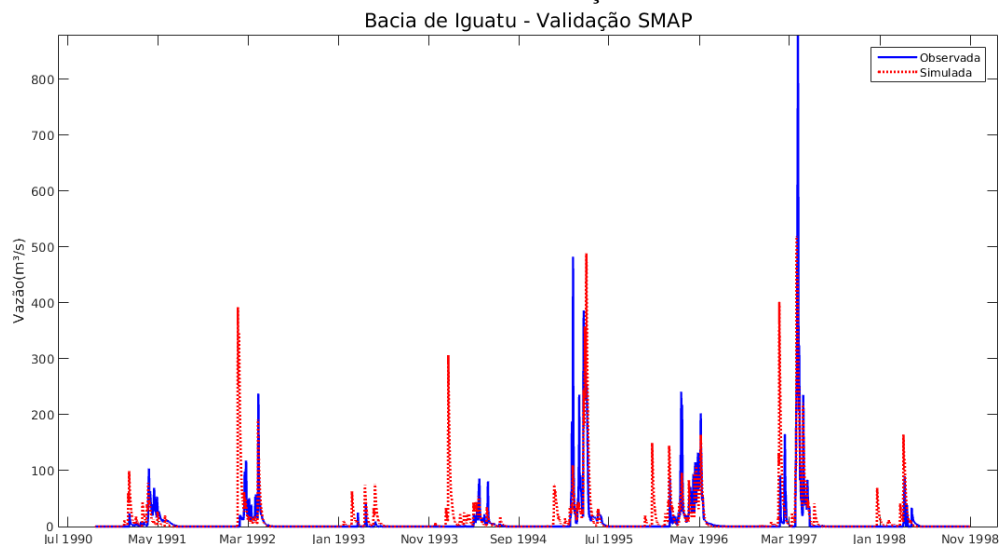
Figura 31 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36160000. Período de Calibração 01/10/1976 a 31/10/84.



Fonte: Elaborada pelo autor.

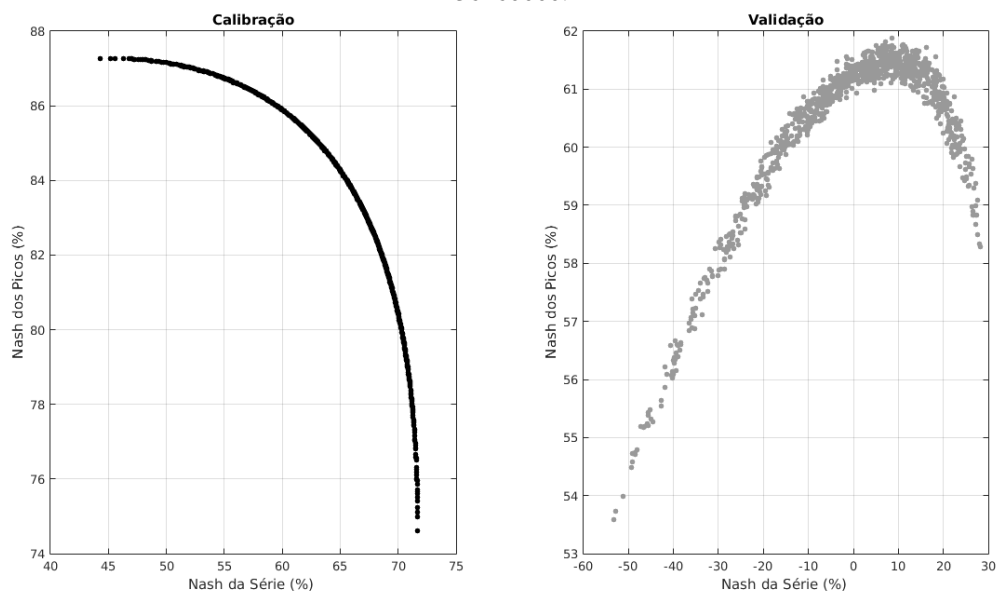
A validação dos parâmetros do evento de calibração de maior NSE da série para o período de 01/10/1990 a 31/10/1998 foi insatisfatória, uma vez que o NSE da série de validação obtido foi de 28,24 % e o NSPico foi 58,29%. Analisando-se o hidrograma da validação (Figura 32) percebe-se que o modelo superestima e antecipa os picos de vazão no período chuvoso dos anos de 1991, 1992, 1993, 1994, 1996, 1997 e 1998. Por outro lado, no ano de 1995 o modelo apresenta um atraso dos picos de vazão para o período chuvoso.

Figura 32 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36160000. Período de Validação 01/10/1990 a 31/10/1998.



A Figura 33 ilustra a frente de Pareto para a calibração do SMAP para o Posto 36160000 referente ao período de 01/10/1976 a 31/10/1984 e para a validação referente ao período de 01/10/1990 a 31/10/1998. Na frente de Pareto de calibração a maximização do NSE da série implica na minimização do NSPicos. Por outro lado, na frente de Pareto de validação o algoritmo começa com valores de NSE da série negativos e insatisfatórios e vai melhorando gradativamente. Dessa forma, na frente de Pareto de Validação a maximização do NSE da série resulta também na maximização do Nash de Picos até certo ponto, aproximadamente NSE da série de 10 %. Depois desse valor o NSE da série e o NSPicos se comportam de forma inversamente proporcional.

Figura 33 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36160000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Posto fluviométrico 36470000 tinha a pior disponibilidade de dados desse estudo e também a menor série de medição, desfavorecendo a calibração. Foram realizadas apenas 4 calibrações do modelo SMAP diário para a bacia do Posto Fluviométrico 36470000 e os resultados para estes eventos estão expostos na Tabela 18.

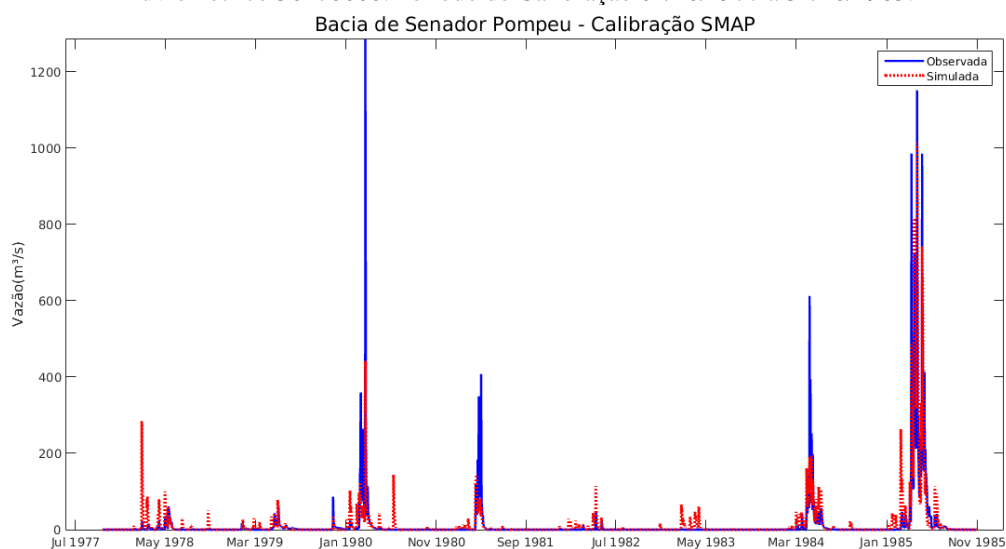
Tabela 18 – Resultados testes de Calibração e Validação SMAP Diário. Posto: 36470000.

| - | Período | NSESérie (%) | NSPicos (%) | Str (mm) | k2t (dias) | Ai (mm) | Capc (%) |
|-------------|-------------------------|--------------|-------------|----------|------------|---------|----------|
| Calibração | 01/10/1974 - 31/10/1982 | 56,19 | 71,71 | 238,98 | 2,54 | 7,05 | 60,14 |
| Validação | 01/10/1987 - 31/12/1993 | -416,50 | -186,40 | | | | |
| Calibração | 01/10/1975 - 31/10/1983 | 56,72 | 71,97 | 241,39 | 2,38 | 7,19 | 54,93 |
| Validação | 01/10/1987 - 31/12/1993 | -424,70 | -198,70 | | | | |
| Calibração | 01/10/1976 - 31/10/1984 | 56,11 | 68,99 | 259,00 | 2,27 | 4,55 | 42,08 |
| Validação | 01/10/1987 - 31/12/1993 | -388,50 | -173,50 | | | | |
| Calibração | 01/10/1977 - 31/10/1985 | 71,97 | 75,63 | 349,50 | 1,81 | 1,01 | 53,43 |
| Validação 1 | 01/10/1987 - 31/12/1993 | -211,10 | -48,60 | | | | |
| Validação 2 | 01/01/2001 - 31/12/2005 | 59,10 | 79,36 | | | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os melhores parâmetros obtidos para o posto 36470000 foram os referentes ao período de 01/10/1977 a 31/10/1985, com NSE da Série de aproximadamente 72% e NSPicos de 75,63%. O hidrograma sintético obtido através desses parâmetros e o hidrograma observado estão ilustrados na Figura 34. Percebe-se um significativo adiantamento e superestimação da vazão para o período chuvoso de 1978. Além disso, o modelo subestima as vazões nos períodos chuvosos de 1980, 1981 e 1984. Por outro lado, o modelo superestima levemente a vazão e atrasa os picos nos anos de 1982 e 1983. Por fim, o modelo se comportou de forma satisfatória para o ano de cheia de 1985.

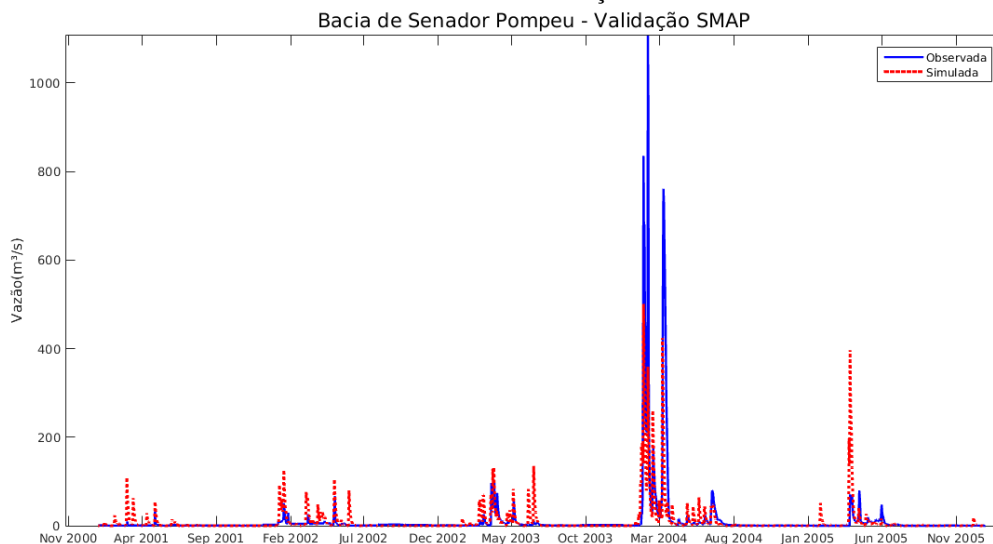
Figura 34 – Hidrograma observado e calibrado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36470000. Período de Calibração 01/10/1977 a 31/10/1985.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A validação dos parâmetros do evento de calibração de maior NSE da série para o período de 01/10/1987 a 31/12/1993 foi insatisfatória, uma vez que o NSE da série de validação obtido foi de -211,10%, indicando problemas na série observada ou nas considerações realizadas para a calibração do modelo. Além disso, foi testado um período mais curto de 5 anos para a validação (01/01/2001 a 31/12/2005), demonstrado na Figura 35, com o objetivo de verificar o comportamento do modelo e do hidrograma e foi obtido um NSE da Série de aproximadamente 59% e de NS de Picos de 79,36%. O modelo superestima as vazões para os períodos chuvosos dos anos de 2001, 2002, 2003, 2005. Por outro lado, o modelo subestimou os picos de vazão da grande cheia de 2004.

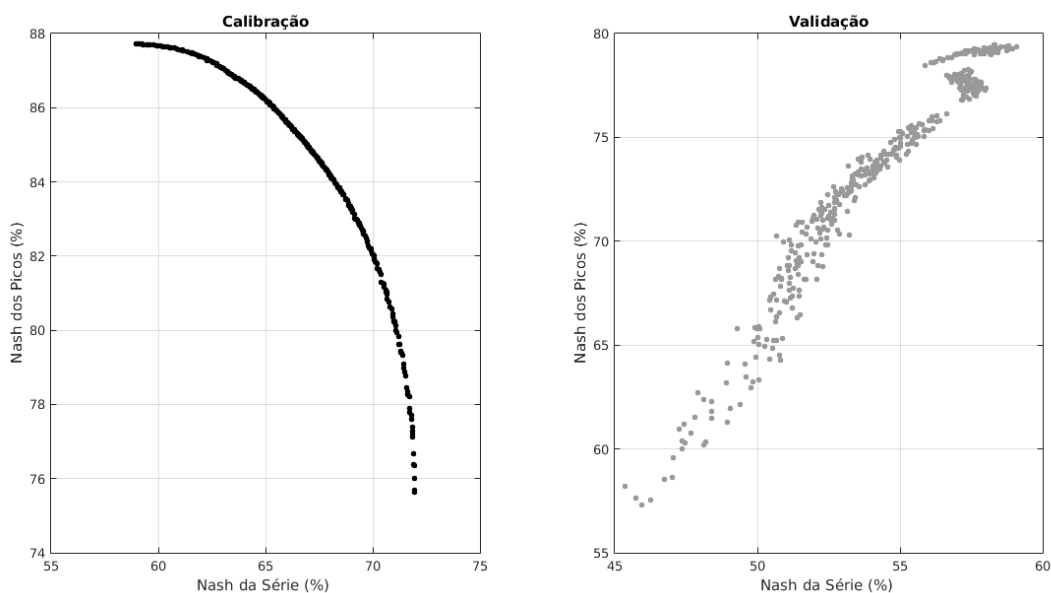
Figura 35 – Hidrograma observado e validado obtido através da calibração do SMAP diário para o Posto Fluviométrico 36470000. Período de Validação 01/01/2001 a 31/12/2005.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 36 ilustra a frente de Pareto para a calibração do SMAP para o Posto 36160000 referente ao período de 01/10/1977 a 31/10/1985 e para a validação referente ao período de 01/01/2001 a 31/12/2005. Na frente de Pareto de calibração a maximização do NSE da série implica a minimização do NSPicos. Por outro lado, na frente de Pareto de Validação os pontos de otimização flutuam em torno de uma linha de tendência onde a maximização do NSE da série resulta também na maximização do Nash de Picos.

Figura 36 – Frentes de Pareto identificadas e funções objetivo para o período de calibração e validação do Posto 36470000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 Análise de desempenho da calibração e validação do SMAP diário

O NSE da série é um indicador de desempenho mundialmente utilizado para a avaliação da calibração de modelos hidrológicos. Todavia, o NSE sozinho não é capaz de capturar todos os erros associados ao processo de simulação hidrológica. Em decorrência disso, foi realizada a análise da calibração de melhor NSE da série para cada bacia utilizando os indicadores de desempenho descritos na metodologia desse trabalho. Além disso, analisou-se também o desempenho da validação dos melhores parâmetros para cada bacia. Os valores obtidos para NSE da série, NSE_{Picos} e PBIAS foram classificados utilizando a classificação de Moriasi (2007).

Na Tabela 19 os indicadores calculados para a melhor calibração do posto Fluviométrico 36020000 são apresentados. O NSE da série e o NSE_{Picos} são classificados como “Muito Bom”, pois ambos estão acima de 75%. O PBIAS é classificado como “Bom”, pois está entre 10% e 15%. O coeficiente de Pearson (r) está próximo de 1 indicando uma boa colinearidade entre os dados simulados e observados. Da mesma forma, o coeficiente de determinação (R²) está aceitável, uma vez que este está acima de 0,5. Os índices KGE e d estão próximos de 1, indicando uma boa acurácia do modelo. O RMSE é considerado satisfatório.

Tabela 19 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36020000 - Período 01/10/1985 a 31/10/1993.

| Parâmetros | Valores | Indicadores de Desempenho | Valores |
|------------|----------|---------------------------|---------|
| Str | 388,4787 | NSE Série | 76,04 % |
| k2t | 3,2918 | NSE _{Picos} | 77,79 % |
| Crec | 0 | PBIAS | 14 % |
| Ai | 1,0097 | r | 0,87 |
| Capcc | 55,1533 | R ² | 0,76 |
| kkt | 0 | d | 0,93 |
| Tuin | 0 | KGE | 0,77 |
| Ebin | 0 | RMSE | 22,05 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 20 os indicadores calculados para a validação dos parâmetros calibrados para o posto Fluviométrico 36020000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Insatisfatório” e o NSPicos como “Bom”. O PBIAS é classificado como “Insatisfatório”, pois está acima de 25%. O coeficiente de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2) são considerados aceitáveis, uma vez que estes estão acima de 0,5. Todavia, o índice KGE está próximo a zero, indicando a falta de acurácia do modelo na validação. Ambos d e o RMSE são considerados satisfatórios.

Tabela 20 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36020000 – Período 01/01/2003 a 31/12/2003.

| Indicadores de Desempenho | Valores |
|----------------------------------|----------------|
| NSE Série | 45,57 % |
| NSPicos | 67,27 % |
| PBIAS | 91,10 % |
| r | 0,73 |
| R^2 | 0,53 |
| d | 0,84 |
| KGE | 0,05 |
| RMSE | 9,18 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 21 os indicadores calculados para a melhor calibração do posto Fluviométrico 36290000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Bom” e o NSPicos como “Muito Bom”, pois o último está acima de 75%. O PBIAS é classificado como “Satisfatório”, pois está entre 15 e 25%. Os coeficientes r e R^2 estão próximos de 1, indicando uma boa colinearidade entre os dados simulados e observados. Os índices KGE e d estão próximos de 1, indicando uma boa acurácia do modelo. O RMSE é considerado satisfatório.

Tabela 21 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36290000 - Período 01/10/1988 a 31/10/1996.

| Parâmetros | Valores | Indicadores de Desempenho | Valores |
|-------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| Str | 478,1972 | NSE Série | 74,70 % |
| k2t | 3,1460 | NSPicos | 76,76 % |
| Crec | 0 | PBIAS | 23,90 % |
| Ai | 1,2720 | r | 0,87 |
| Capcc | 41,3627 | R ² | 0,75 |
| kkt | 0 | d | 0,92 |
| Tuin | 0 | KGE | 0,70 |
| Ebin | 0 | RMSE | 33,28 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 22 os indicadores calculados para a validação dos parâmetros calibrados para o posto Fluviométrico 36290000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Satisfatório” e o NSPicos como “Bom”. O PBIAS é classificado como “Satisfatório”, pois está entre 15 e 25%. O coeficiente de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R²) são considerados aceitáveis, uma vez que estes estão acima de 0,5. Ambos os índices KGE e d são considerados satisfatórios, indicando uma boa acurácia do modelo na validação. O RMSE é considerado insatisfatório, pois quanto mais próximo de 0 este índice está melhor é o ajuste entre os dados simulados e observados.

Tabela 22 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36290000 – Período 01/10/2002 a 31/10/2010.

| Indicadores de Desempenho | Valores |
|----------------------------------|----------------|
| NSE Série | 63,80 % |
| NSPicos | 70,82 % |
| PBIAS | 15,60 % |
| r | 0,84 |
| R ² | 0,70 |
| d | 0,91 |
| KGE | 0,76 |
| RMSE | 63,82 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 23 os indicadores calculados para a melhor calibração do posto Fluviométrico 36160000 são apresentados. O NSE da série e o NSPicos são classificados como “Bom”, pois ambos estão acima entre 65 e 75%. O PBIAS é classificado como “Muito Bom”, pois este é menor que 10%. Os coeficientes r e R^2 estão próximo de 1, indicando uma boa colinearidade entre os dados simulados e observados. Os índices KGE e d estão próximos de 1, indicando uma boa acurácia do modelo. O RMSE é considerado insatisfatório.

Tabela 23 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36160000 - Período 01/10/1976 a 31/10/1984.

| Parâmetros | Valores | Indicadores de Desempenho | Valores |
|-------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| Str | 292,6118 | NSE Série | 71,69 % |
| k2t | 3,9399 | NSPicos | 74,61 % |
| Crec | 0 | PBIAS | 3,30 % |
| Ai | 5,7052 | r | 0,85 |
| Capcc | 71,6630 | R^2 | 0,72 |
| kkt | 0 | d | 0,91 |
| Tuin | 0 | KGE | 0,80 |
| Ebin | 0 | RMSE | 39,64 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 24 os indicadores calculados para a validação dos parâmetros calibrados para o posto Fluviométrico 36160000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Insatisfatório” e o NSPicos como “Satisfatório”. O PBIAS é classificado como “Insatisfatório”, pois está acima de 25%. O coeficiente r e o R^2 são considerados insatisfatórios, uma vez que estes estão próximos de 0,5. Todavia, o índice KGE está próximo a 0,5, indicando a falta de acurácia do modelo na validação. Ambos d e o RMSE são considerados satisfatórios.

Tabela 24 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36160000 – Período 01/10/1990 a 31/10/1998.

| Indicadores de Desempenho | Valores |
|----------------------------------|----------------|
| NSE Série | 28,24 % |
| NSPicos | 58,29 % |
| PBIAS | 40,70 % |
| r | 0,66 |
| R^2 | 0,44 |
| d | 0,80 |
| KGE | 0,47 |
| RMSE | 35,03 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 25 os indicadores calculados para a melhor calibração do posto Fluviométrico 36470000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Bom” e o NSPicos como “Muito Bom”, pois o último está acima de 75%. O PBIAS é classificado como “Bom”, pois está entre 10% e 15%. Os coeficientes r e R^2 estão próximos de 1, indicando uma boa colinearidade entre os dados simulados e observados. Os índices KGE e d estão próximos de 1, indicando uma boa acurácia do modelo. O RMSE é considerado satisfatório.

Tabela 25 – Indicadores de desempenho da Calibração para o Posto Fluviométrico 36470000 - Período 01/10/1977 a 31/10/1985.

| Parâmetros | Valores | Indicadores de Desempenho | Valores |
|-------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| Str | 349,4968 | NSE Série | 71,97 % |
| k2t | 1,8113 | NSPicos | 75,63 % |
| Crec | 0 | PBIAS | 11,30 % |
| Ai | 1,0114 | r | 0,85 |
| Capcc | 53,4327 | R^2 | 0,72 |
| kkt | 0 | d | 0,91 |
| Tuin | 0 | KGE | 0,78 |
| Ebin | 0 | RMSE | 35,33 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela X os indicadores calculados para a validação dos parâmetros calibrados para o posto Fluviométrico 36470000 são apresentados. O NSE da série é classificado como “Satisfatório” e o NSPicos como “Muito Bom”. O PBIAS é classificado como “Bom”, pois está entre ± 10 e ± 15 . O coeficiente de Pearson (r) é considerado satisfatório, todavia o coeficiente de determinação (R^2) é considerado insatisfatório, uma vez que este está abaixo de 0,5. O índice d é considerado satisfatório. Ambos os índices KGE e o RMSE são considerados insatisfatórios.

Tabela 26 – Indicadores de desempenho da Validação para o Posto Fluviométrico 36470000 – Período 01/01/2001 a 31/12/2005.

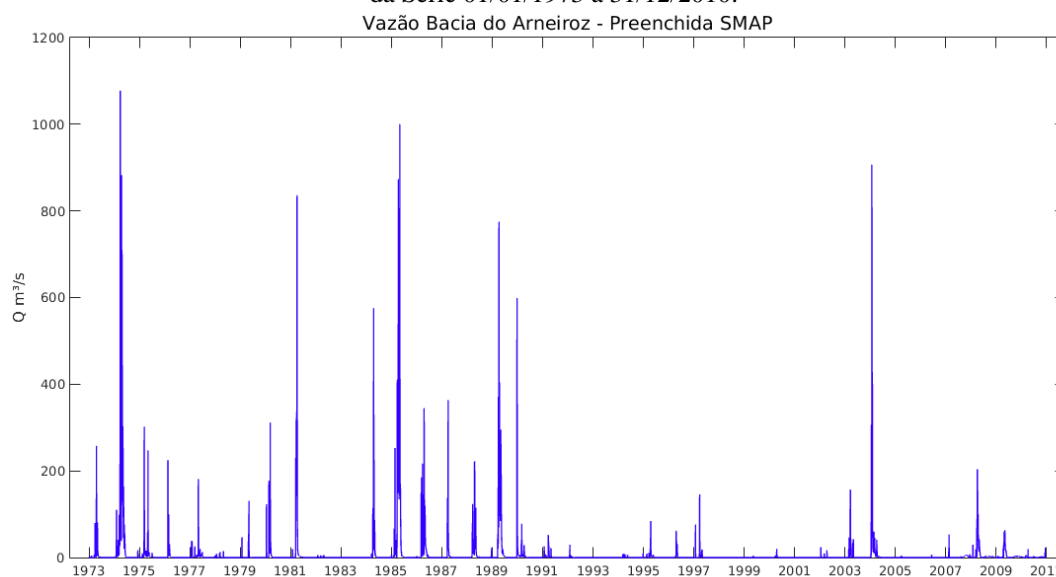
| Indicadores de Desempenho | Valores |
|----------------------------------|----------------|
| NSE Série | 59,10 % |
| NSPicos | 79,36 % |
| PBIAS | -12,80 % |
| r | 0,70 |
| R ² | 0,48 |
| d | 0,74 |
| KGE | 0,43 |
| RMSE | 46,78 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 Preenchimento das Falhas utilizando os parâmetros calibrados do SMAP diário

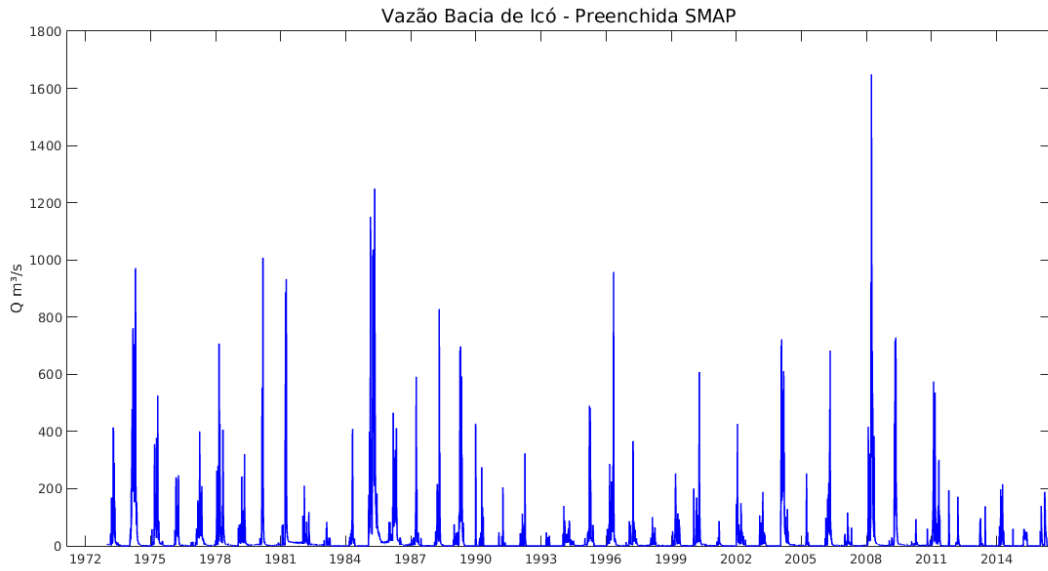
As Figura 37 a Figura 40 ilustram os hidrogramas das séries de vazão preenchidas para os postos Fluviométricos 36020000, 36290000, 36160000 e 36470000, respectivamente. O modelo SMAP diário calibrado automaticamente através do algoritmo MOPSO se mostrou eficaz para o preenchimento de falhas de vazão observada.

Figura 37 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36020000. Período da Série 01/01/1973 a 31/12/2010.



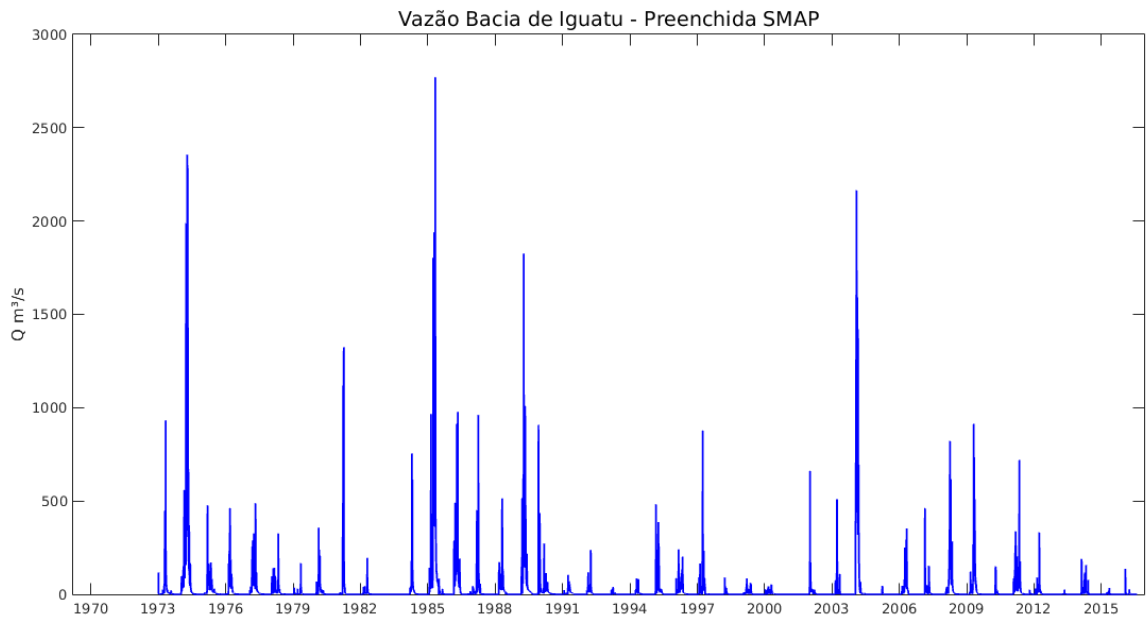
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36290000. Período da Série 01/01/1973 a 30/06/2016.



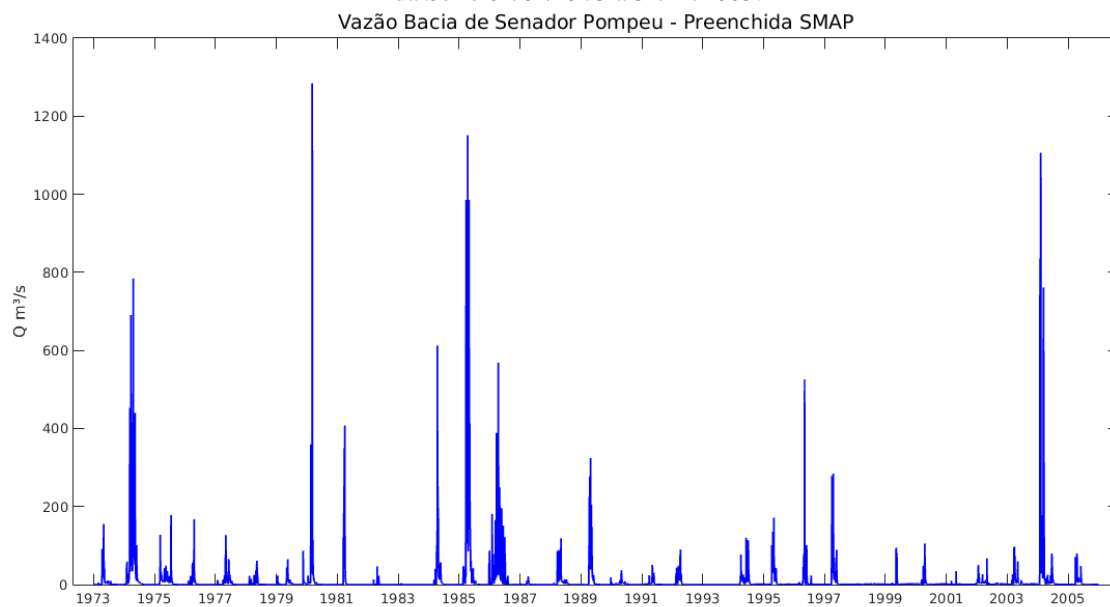
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36160000. Período da Série 01/01/1973 a 31/07/2016.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Série de Vazão preenchida com os dados do SMAP diário. Posto Fluviométrico 36470000. Período da Série 01/01/1973 a 31/12/2005.



Fonte: Elaborada pelo autor.

7 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi possível calibrar e validar o modelo SMAP diário para diferentes períodos nas bacias dos Postos fluviométricos 36020000, 36290000, 36470000 e 36160000. O modelo SMAP com calibração automática via algoritmo MOPSO apresentou-se eficaz para calibração de bacias no semiárido, onde em geral, grande parte dos eventos de precipitação são concentrados em apenas 4 meses.

Foram escolhidas as melhores calibrações de acordo com o melhor coeficiente NSE da série e foi feita a análise de eficiência dos parâmetros do modelo. Em todas as 4 bacias foram obtidos NSE da série acima de 70% indicando a alta qualidade e consistência dos parâmetros de calibração. Apesar dos parâmetros de calibração terem desempenho insatisfatórios em alguns índices de desempenho e na validação, estes ainda podem ser utilizados, na ausência de dados de observados na bacia.

A análise morfométrica das bacias dos Postos Fluviométricos serviu para eximir as dúvidas de traçado da bacia e para auxiliar na interpretação do comportamento do hidrograma durante os eventos de precipitação.

O resultado do preenchimento dos dados falhos nos postos Fluviométricos pode servir futuramente para a calibração de modelos distribuídos e semi-distribuídos nas bacias. Além disso, os dados desses postos podem servir de subsídio para facilitar o processo de alocação de água e estudo do comportamento hidrológico dos açudes próximos a eles.

Futuros estudos podem considerar a propagação de vazão entre as bacias hidrográficas e a influência da operacionalização das barragens nos hidrogramas. Por outro lado, torna-se necessário realizar a regionalização dos parâmetros obtidos para o SMAP diário para outras bacias circunvizinhas que não possuam dados suficientes.

Conclui-se que o modelo é eficiente e eficaz para a modelagem concentrada de bacias no Ceará. Entretanto, a disponibilidade de dados ainda é um fator limitante que pode ser vencida através da regionalização de parâmetros.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S. P. R. Regionalização de Vazões Médias de Longo Período Para o Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p.93-102, 2005a. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p93-102>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/a7bbd0057fc5ab9daa43a733da4ba656_e6cbcc1062f90d3146f685db5604e797.pdf>. Acesso em: 21 maio 2017.
- ALVAREZ-BENITEZ, J. E.; EVERSON, R. M.; FIELDSEND, J. E. A MOPSO Algorithm Based Exclusively on Pareto Dominance Concepts. **Lecture Notes In Computer Science**, Guanajuato, México, p.459-473, 2005. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-31880-4_32.
- ANA. Agência Nacional de Águas. A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 64 p. (Edição comemorativa do Dia Mundial da Água), 2002.
- ARNOLD, J. G. *et al.* Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. **Journal Of The American Water Resources Association**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.73-89, fev. 1998. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ranjan_Muttiah/publication/227647461_Large_Area_Hydrologic_Modeling_and_Assessment_Part_I_Model_Development/links/0deec53c6985fdf9c1000000/Large-Area-Hydrologic-Modeling-and-Assessment-Part-I-Model-Development.pdf>. Acesso em: 21 maio 2017.
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. 2002. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia de Sistemas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260313/1/Arroyo, Jos? Elias C.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260313/1/Arroyo, Jos%20Elias%20C.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2017.
- BARROS, F. V. F. **Uso de algoritmos evolucionários na calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios**. 2007. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16723/1/2007_dis_fvfbarros.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2017.
- BRAZ, M. M. A. **Águas para o Ceará: experiências de trabalhadores a partir da construção do complexo Castanhão**. 2011. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sociologia, Departamento de Ciências Sociais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/6288/1/2011-TESE-MMABRAZ.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling**: the primer. 2. ed. Chichester: Wiley-blackwell, 2012. 488 p.

BOUGHTON, W C. Effect of data length on rainfall–runoff modelling. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.406-413, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.001>.

BRIANEZI, T. R. **Aplicação do SMAP para a Bacia do Rio Tietê**. 2015. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia, Faculdade de Tecnologia - FT, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Limeira - SP, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267742/1/Brianezi,%20Thais%20Rocha_M.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2017.

CÂMARA, R. K. C. *et al.* Modelagem Hidrológica Estocástica Aplicada ao Rio Tocantins para a Cidade de Marabá-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.11-23, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140092>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v31n1/0102-7786-rbmet-31-01-0011.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú** / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza: INESP, 2009a. 116p.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Alto Jaguaribe** / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza: INESP, 2009b. 119p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología aplicada**. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994.

COGERH. Relatório do IX Seminário de Planejamento e Operação das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú. Fortaleza: COGERH, 2002.

COLLISCHONN, Bruno *et al.* Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p.119-133, 2011. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p119-133>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/bd2d29be94798b6bb084aa1d11ef6f66_e97796eac6001e296bbf9d65b6375f5.pdf>. Acesso em: 22 maio 2017.

DANTAS, S. P. *et al.* Análise da distribuição dos recursos hídricos do Açude Orós: bacia hidrográfica do Jaguaribe/CE - Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, San José, v. 2, n. 47, p.1-11, jul. 2011. Semestral. Disponível em: <<http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2714>>. Acesso em: 23 maio 2017.

DINIZ, L. S.; CLARKE, R. T. (2001). “Regionalização de parâmetros de modelo chuva vazão usando redes neurais” In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V

Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Aracajú: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

DOOGE, J. C. I. Problems and methods of rainfall-runoff modelling. **Mathematical Methods for Surface Water Hydrology**. Eds. Ciriani, TA, Maione, U., and Wallis, JR Chichester: Wiley, p. 71-108, 1977.

FADIGA JUNIOR, F. M. *et al.* Modelos de Previsão de Vazões para a Bacia Incremental à UHE Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p.65-75, 2008. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH.
<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n2.p65-75>. Disponível em:
 <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/4cdeb8b170b02be42512d53b05bcc0cb_4b7d1c966b1cc590faa98dcfc9aeb20f.pdf>. Acesso em: 21 maio 2017.

FALLAH-MEHDIPOUR, E.; HADDAD, O. B.; MARIÑO, M. A.. MOPSO algorithm and its application in multipurpose multireservoir operations. **Journal Of Hydroinformatics**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.794-811, out. 2011. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2010.105>.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p.556-569, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>. Disponível em:
 <<http://www.scielo.br/pdf/rbrh/v21n3/2318-0331-rbrh-21-3-556.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

FUCK JÚNIOR, S.C. F. Subsídio à Gestão Ambiental: descrição fisiográfica e análise funcional das bacias hidrográficas do Ceará. **Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Jataí - UFG**. Jataí, GO, N.10. jan-jun. 2008.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil**. Fortaleza: FUNCEME, 2008.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapeamento do uso e ocupação das áreas de entorno dos reservatórios Orós, Banabuiú, Araras, Forquilha, Ayres de Souza, e Edson Queiroz no Estado do Ceará**/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos; Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Fortaleza: FUNCEME, 2010.

Governo do Estado do Ceará; Secretaria dos Recursos Hídricos; **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará**. 2015. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

_____. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental Açude Banabuiú**. Fortaleza, Ceará, 2011a. 111 p.

_____. **Inventário Ambiental Açude Castanhão**. Fortaleza, Ceará, 2011b. 142 p.

_____. **Inventário Ambiental Açude Orós**. Fortaleza, Ceará, 2011c. 125 p.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.135-143, abr. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135)).

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering In Agriculture**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.96-99, 1985. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>. Disponível em: <<http://libcatalog.cimmyt.org/download/reprints/97977.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

HOLLANDA, M. P. *et al.* Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 19, n. 5, p.489-496, maio 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p489-496>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v19n5/1415-4366-rbeaa-19-05-0489.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

KAVISKI, E. *et al.* Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.57-68, 2007. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p57-68>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/5ae44aa3bf5c6c1aa5df923fb4605c94_3862d994fda8fb9cc96219e0c09ddf68.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2017.

KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. *Journal of Civil Engineering*, v.10, n.6, p. 362, 1940.

KLING, H.; GUPTA, H. On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 373, n. 3-4, p.337-351, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.031>.

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

LALWANI, S. *et al.* A comprehensive survey: Applications of multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm. **Transactions on Combinatorics**, v. 2, n. 1, p. 39-101, 2013.

LATUF, M. O. **Modelagem hidrológica aplicada ao planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Acre**. 2011. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LINS, C. S. Gerenciamento dos recursos hídricos no estado do Ceará: princípios e práticas. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, São Paulo, v. 07, n. 02, p.349-365, 2011.

LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999. Disponível em: <http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acesso em: 26 mar. 2017.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.

LOURENÇO, A. M. G. *et al.* Análise e modelagem hidrológica no ambiente R. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal - RN. Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/xiisrh/anais/papers/PAP018361.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2017.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu- Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.308-322, set. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862009000300005>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v24n3/a05v24n3.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

MACHADO, A. R.; MELLO JUNIOR, A. V.; WENDLAND, E. C. Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016145177>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/2017nahead/1809-4457-esa-s1413-41522016145177.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

MADSEN, H. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.205-216, fev. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1708\(02\)00092-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1708(02)00092-1).

MARINHO FILHO, G. M. *et al.*, Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268/761>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

MOLLE, F. **Marcos históricos e Reflexões sobre a Açudagem e seu Aproveitamento**. Recife: SUDENE, 1994. 193 p. Convênio SUDENE/ORSTOM/TAPI. Disponível em: <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010033410.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2017.

MOREIRA, J.; GUILHON, L.; ROCHA, V. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos**

Hídricos, [s.l.], v. 12, n. 3, p.13-20, 2007. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p13-20>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/fcc2c4f2d82904f7f8062d7debfaf847_3f9c177c8e7f0d8f3a6936e63466a73c.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2017.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOSTAGHIM, S.; TEICH, J. Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). **Proceedings Of The 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. Sis'03 (cat. No.03ex706)**, [s.l.], p.26-33, 2003. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/sis.2003.1202243>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NUNES, F. M. S. *et al.* Modelagem hidrológica via SMAP para estimativa de vazões mensais na bacia do rio Piancó. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 9, n. 3, p.289-295, jul-set, 2014. Trimestral. Disponível em:<<http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2948/2453>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

OLIVEIRA FILHO, R. L. **Metodologia de elaboração de base de informações para alocação negociada de água: aplicação ao açude Arneiroz II**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11189/1/2013_dis_rloliveirafilho.pdf>. Acesso em: 25 maio 2017.

PAIVA, R. C. D.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Estimativa das vazões naturais nas sub-bacias do Vacacaí Mirim através de modelo simplificado. In: I SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 1 2006 b, Curitiba. Anais. Curitiba, 2006.

PORTO, R.Q. *et al.* Avaliação da escolha de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico SMAP. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 29, n. 1, p.27-36, jun. 2008. Semestral. UNIFOR. Disponível em: <<http://periodicos.unifor.br/tec/article/download/34/4473>>. Acesso em: 22 maio 2017.

REFSGAARD, J.C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 198, n. 1-4, p.69-97, nov. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(96\)03329-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(96)03329-x).

REIS JUNIOR, D. S.; MARTINS, E. S. P. R.; NASCIMENTO, L. S. V. Avaliação do Algoritmo Evolutivo MOPSO na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p.85-97, 2009. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v14n1.p85-97>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/d1b291f21296e603d657058d02c5049a_a7a88cbcb6341f3d54b43930b00363a8.pdf>. Acesso em: 21 maio 2017.

REIS JUNIOR, D. S. *et al.* Monthly streamflow forecasts for the State of Ceará, Brazil. In: XXIV IUGG Assembly, 2007, Perugia, Itália. Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007). IAHS Publ. 313, 2007. Wallingford: IAHS Press, 2007. p. 158-166. Disponível em: <http://www.academia.edu/download/41422762/Avaliao_do_Algoritmo_Evolutivo_Mopso_na_20160122-21215-1ozoqt8.pdf#page=83>. Acesso em: 26 mar. 2017.

RIBEIRO, F. M.; MENDES, E. M. A. M.; LEMOS, A. P. **Sistema de previsão de afluência utilizando árvore de regressão linear evolutiva nebulosa.** In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2014/PDF/1569935497.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

ROZANTE, J. R. *et al.* Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. **Weather And Forecasting**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.885-894, jun. 2010. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/2010waf2222325.1>. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010WAF2222325.1>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

SANTOS, B. V. C. D.; FONTES, A. S. Modelagem hidrológica de sistema hídrico complexo do Semiárido Baiano. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s.l.], v. 2, n. 1, p.152-162, 4 set. 2014. Revista GESTA. <http://dx.doi.org/10.17565/gesta.v2i1.10090>. Disponível em: <<https://portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/10090/8656>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p.01-19, set-dez, 2009. Quadrimestral. UFPE. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/50/58>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

SINGH, V. P. Hydrologic systems. Volume I: Rainfall-runoff modeling. **Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey. 1988. 480**, 1988.

SCHULER, A. *et al.* Propriedades Físicas dos Solos na Parametrização de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.61-70, 2003. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p61-70>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/ea2d4101b880b05d15b74a4d9c6a84dc_d45df4743c90a5175db8d43178c5e667.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2017.

SHULTZ, M. J. **Comparison of Distributed versus Lumped hydrologic simulation models using stationary and moving storm events applied to small synthetic rectangular basins and an actual watershed basin.** 2007. 394 f. Tese (Doutorado) - Curso de Phd em Engenharia Civil, Faculty Of The Graduate School, The University Of Texas At Arlington, Arlington, 2007.

SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; AQUINO, S. H. S (Org.). **Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2013. 646p.

SOUZA FILHO, F. A *et al.* **Relatório final**: Projeto de Avaliação da Segurança Hídrica de Fortaleza – FORTALEZA 2040. PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA: Fortaleza, 2016.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

STUDART, T. M. Carvalho. **Bacia Hidrográfica**. In: STUDART, T. M. C. Hidrologia. Fortaleza, 2006.

TEIXEIRA, F. A. A. **Estudo da transformação precipitação-deflúvio para a subbacia do Arneiroz II**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em:
<http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11704/1/2009_dis_fasteixeira.pdf>. Acesso em: 25 maio 2017.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, [s.l.], v. 39, n. 7, p.1082-1089, jul. 1911. American Meteorological Society.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)392.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1911)392.0.co;2). Disponível em:
<<https://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/039/mwr-039-07-1082b.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

TSOU, C. Multi-objective inventory planning using MOPSO and TOPSIS. **Expert Systems With Applications**, [s.l.], v. 35, n. 1-2, p.136-142, jul. 2008. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2007.06.009>.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de vazão em curto prazo com base na precipitação: Modelos conceituais. In: Workshop Previsão de Vazão, 2007. Disponível em:
<http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o06.pdf>. Acesso em: 21 maio 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002. 256 p.

WILLMOTT, C.J. **On the validation of models**. *Physical Geography*, v.2, p. 1984 – 1994. 1981.

XU, C. **Hydrologic Models**. Uppsala: Uppsala University, 2002. 168 p.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 204, n. 1-4, p.83-97, jan. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(97\)00107-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(97)00107-8).

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. **R package version 0.3-8**, v. 28, 2014.