



**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

GUSTAVO FRANZOI MARCON

**MODELAGEM CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O MODELO MATEMÁTICO
SMAP PARA UM TRECHO DA SUB-BACIA RIO CARREIRO - RS**

CAXIAS DO SUL - RS

2019

GUSTAVO FRANZOI MARCON

**MODELAGEM CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O MODELO MATEMÁTICO
SMAP PARA UM TRECHO DA SUB-BACIA RIO CARREIRO - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Professor Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL - RS

2019

GUSTAVO FRANZOI MARCON

**MODELAGEM CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O MODELO MATEMÁTICO
SMAP PARA UM TRECHO DA SUB-BACIA RIO CARREIRO - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em / /

Banca examinadora

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Tiago Panizzon
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Juliano Rodrigues Gimenez
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

A modelagem hidrológica se apresenta como um instrumento fundamental para as dificuldades encontradas na gestão dos processos hidrológicos, tendo em vista que há uma crescente demanda por água e conseqüentemente sua escassez. Dentre os vários modelos hidrológicos conhecidos se destaca os do tipo chuva-vazão em que utiliza dados de entrada de precipitação e gera uma saída, a vazão. Assim, o presente trabalho tem como objetivo modelar o comportamento de vazões de um trecho da sub-bacia rio Carreiro através do modelo matemático hidrológico chuva-vazão SMAP (*Soil Misture Accounting Procedure*) utilizando diferentes funções-objetivo, a fim de determinar se o modelo é capaz de modelar as vazões máximas e mínimas e por fim estimar a recarga subterrânea. O trecho foi modelado a partir de duas versões do modelo a diária e a mensal, para ambas foram utilizadas um período de três anos para calibração e dez anos para a validação. Os dados de precipitação foram retirados do posto pluviométrico Trinta e Cinco que se encontra fora da área do trecho estudado e não apresentou falhas, os dados de vazão foram retirados do posto fluviométrico Passo Migliavaca que se encontra no exutório da área, já os dados de evapotranspiração foram retirados do posto meteorológico Lagoa Vermelha. O modelo em sua versão diária apresentou resultados satisfatórios para o coeficiente RNSlog tanto na calibração (0,85) quanto na validação (0,84) indicando sensibilidade às vazões mínimas que ocorrem na sub-bacia no período estudado. Já a sua versão mensal apresentou resultados satisfatórios para o coeficiente RNSlog na fase de calibração (0,87) e validação (0,84), e para o coeficiente RNS na fase de calibração apresentou valor de 0,84 e na validação 0,83, demonstrando sensibilidade em modelar vazões mínimas e máximas. A comparação entres as vazões calculadas em ambas versões demonstrou que o modelo se torna mais preciso para períodos maiores, neste caso na fase de validação. Com os resultados positivos foi possível estimar a recarga subterrânea e vazão calculada no exutório a partir da precipitação observada.

Palavras-chave: Modelo hidrológico. SMAP. Chuva-vazão.

ABSTRACT

The hydrological modeling is presented as a fundamental instrument for the difficulties encountered in the management of hydrological processes, considering that there is an increasing demand for water and consequently its scarcity. Among the several known hydrological models, rain-discharge type is used, in which precipitation input data is generated and output is generated, the flow rate. Thus, the present work aims to model the flow behavior of a section of the rio Carreiro sub-basin through the Soil-Mixture Accounting Procedure (SMAP) using different objective functions in order to determine if the model is capable of modeling the maximum and minimum flows and finally estimating the underground recharge. The section was modeled from two versions of the daily and monthly models, both of which used a three-year calibration period and ten years for validation. The precipitation data were taken from the Trinta e Cinco rain gauge that is outside the studied area and did not present any faults, the flow data were taken from the station Passo Migliavaca that is in the mouth of the area, already the evapotranspiration data were removed from the Lagoa Vermelha weather station. The model in its daily version presented satisfactory results for the RNSlog coefficient in both the calibration (0.85) and the validation (0.84) indicating sensitivity to the minimum flows that occur in the sub-basin in the studied period. However, its monthly version presented satisfactory results for the RNSlog coefficient in the calibration phase (0.87) and validation (0.84), and for the RNS coefficient in the calibration phase presented a value of 0.84 and in the validation 0.83, demonstrating sensitivity in modeling minimum and maximum flows. The comparison between the flows calculated in both versions showed that the model becomes more accurate for longer periods, in this case in the validation phase. With the positive results it was possible to estimate the underground recharge and calculated flow in the exudate from the observed precipitation.

Keywords: Hydrological model. SMAP. Rain-flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico	14
Figura 2 - Bacia hidrográfica.....	15
Figura 3 - Hidrograma tipo.....	22
Figura 4 - Representação de um modelo hidrológico.....	24
Figura 5 - Discretização dos modelos hidrológicos chuva-vazão	27
Figura 6 - Versão horária (à esquerda), versão diária (ao centro) e versão mensal (à direita). 31	
Figura 7 – Delimitação do trecho da sub-bacia estudado.....	34
Figura 8 - Versão diária.....	38
Figura 9 - Versão mensal.....	42
Figura 10 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão diária através do coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.	47
Figura 11 - Curva de permanência na fase de calibração do modelo na versão diária.....	48
Figura 12 - Dispersão entre vazões observados e calculados na fase de calibração.	48
Figura 13 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão diária através do coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.	50
Figura 14 - Curva de permanência na fase de validação do modelo versão diária.....	51
Figura 15 - Dispersão entre vazões observadas e calculadas na fase de validação.	51
Figura 16 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.	53
Figura 17 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe.....	54
Figura 18 - Curva de permanência na fase de calibração através da Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	54
Figura 19 - Curva de permanência na fase de calibração através da Coeficiente Nash-Sutcliffe.	55
Figura 20 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de calibração utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	56
Figura 21 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de calibração utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe.	56
Figura 22 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.	57

Figura 23 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe.....	57
Figura 24 - Curva de permanência na fase de validação através da Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	58
Figura 25 - Curva de permanência na fase de validação através da Coeficiente Nash-Sutcliffe.	58
Figura 26 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de validação utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	59
Figura 27 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de validação utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe.	59
Figura 28 - Comparação gráfica entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de calibração utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.	62
Figura 29 - Comparação gráfica entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de validação utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.	63
Figura 30 - Recarga gráfico subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.	65
Figura 31 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.	66
Figura 32 - Recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.	67
Figura 33 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal utilizando RNSlog.	68
Figura 34 - Recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS.....	69
Figura 35 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal utilizando RNS.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados fisiográficos de uma bacia hidrográfica.	16
Quadro 2 - Alguns modelos hidrológicos utilizados	26
Quadro 3 - Resumo das funções-objetivo.	30
Quadro 4 - Classificação hidrológica do solo para condições brasileiras.	33
Quadro 5 - Parâmetros versão diária do modelo SMAP.	40
Quadro 6 - Funções-objetivo utilizadas para calibração e validação para a versão diária do modelo SMAP.	41
Quadro 7 - Parâmetros para a versão mensal do modelo SMAP.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros característicos da sub-bacia para versão diária do modelo.....	37
Tabela 2 - Parâmetros característicos da sub-bacia para versão mensal do modelo.	42
Tabela 3 - Calibração utilizando diferentes funções-objetivo para a versão diária.....	45
Tabela 4 - Parâmetros calibrados pelo modelo SMAP em sua versão diária utilizando a função-objetivo Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	46
Tabela 5 - Resultados do Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo (RNSlog) na fase de validação do modelo.....	49
Tabela 6 - Calibração utilizando diferentes funções-objetivo para a versão mensal.....	52
Tabela 7 - Parâmetros calibrados pelo modelo SMAP em sua versão mensal utilizando separadamente a função-objetivo coeficiente RNSlog e RNS.	52
Tabela 8 - Comparação entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de calibração utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.	61
Tabela 9 - Comparação entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de validação utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.....	61
Tabela 10 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.	64
Tabela 11 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.	65
Tabela 12 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.....	67
Tabela 13 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.....	68
Tabela 14 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS.....	69
Tabela 15 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS.....	70

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	14
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	14
3.2	BACIA HIDROGRÁFICA	15
3.3	VARIÁVEIS DO BALANÇO HÍDRICO	17
3.3.1	Evapotranspiração.....	17
3.3.2	Precipitação.....	18
3.3.3	Infiltração	20
3.3.4	Vazão	21
3.3.4.1	Hidrograma.....	21
3.3.4.2	Vazões máximas, médias e mínimas	22
3.4	MODELOS HIDROLÓGICOS	23
3.4.1	Modelos chuva-vazão	26
3.4.1.1	Modelo SMAP.....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	ÁREA DE ESTUDO	34
4.2	DADOS DE ENTRADA	35
4.3	MODELO HIDROLÓGICO SMAP	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1	VERSÃO DIÁRIA.....	45
5.2	VERSÃO MENSAL.....	52
5.3	APLICAÇÕES	64
5.3.1	Versão Diária	64
5.3.2	Versão mensal	66

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

1. INTRODUÇÃO

A escassez de recursos hídricos, devido à demanda populacional por água, coloca em discussão a necessidade de adoção de planos para o gerenciamento e planejamento destes recursos (GOVERNO DO BRASIL, 2011), tornando-se assim, de grande importância a compreensão desta temática. Além da problemática da escassez, o conhecimento sobre os processos hidrológicos é fundamental em estudos ambientais, projetos de obras hidráulicas, bem como diagnósticos de impacto ambiental (FILHO et al., 2012).

A modelagem hidrológica se apresenta como um instrumento fundamental para as dificuldades encontradas na gestão de recursos hídricos. Através da aplicação de princípios de uma ou mais teorias e conceitos, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes do fluxo hidrológico, anteriormente desconhecidos ou não quantificados (FILHO et al., 2012).

Por meio destes princípios e conceitos, é possível caracterizar as potencialidades e vulnerabilidades do limite operacional da região em questão (AVELINO, 2006), ou seja, o estudo hidrológico das bacias hidrográficas auxilia no planejamento dos seus recursos, tendo em vista que a bacia pode ser considerada como o palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social (YASSUDA, 1993).

Uma das formas de se estudar e caracterizar a bacia é utilizando modelos matemáticos hidrológicos, que são, resumidamente, representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos (FAN; COLLISCHOON, 2014). Dentre os diversos modelos existentes, tais como vazão-vazão, fluxo saturado, hidrodinâmico, se destaca os modelos de transformação chuva-vazão.

Segundo Almeida et al. (2016), modelos hidrológicos chuva-vazão permitem por meio de séries de precipitação a obtenção de séries de vazões, podendo, também, prever vazões futuras ou em locais sem informação, assim auxiliando em projetos hídricos, uso da bacia ao longo dos anos, entre outros.

Para o presente trabalho foi escolhido o modelo matemático hidrológico chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), desenvolvido por Lopes, Braga e Conejo (1982), para modelar um trecho da sub-bacia do rio Carreiro inserida na bacia Rio Taquari-Antas. Os dados de entrada foram calibrados e validados utilizando funções-objetivo e ao final foi avaliado se o modelo é adequado para estimar as vazões máximas, médias e mínimas e recarga subterrânea que ocorrem na sub-bacia.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal do trabalho é modelar através do modelo matemático hidrológico SMAP o comportamento de vazões de um trecho da sub-bacia rio Carreiro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Delimitar o trecho da sub-bacia de estudo e calibrar os parâmetros morfométricos;
- b. Calibrar e validar os parâmetros de escoamento do modelo SMAP para o trecho da sub-bacia de estudo utilizando diferentes funções-objetivo;
- c. Estimar as vazões máximas, mínimas e recarga subterrânea;
- d. Comparar modelo SMAP em sua versão diária e mensal.

3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

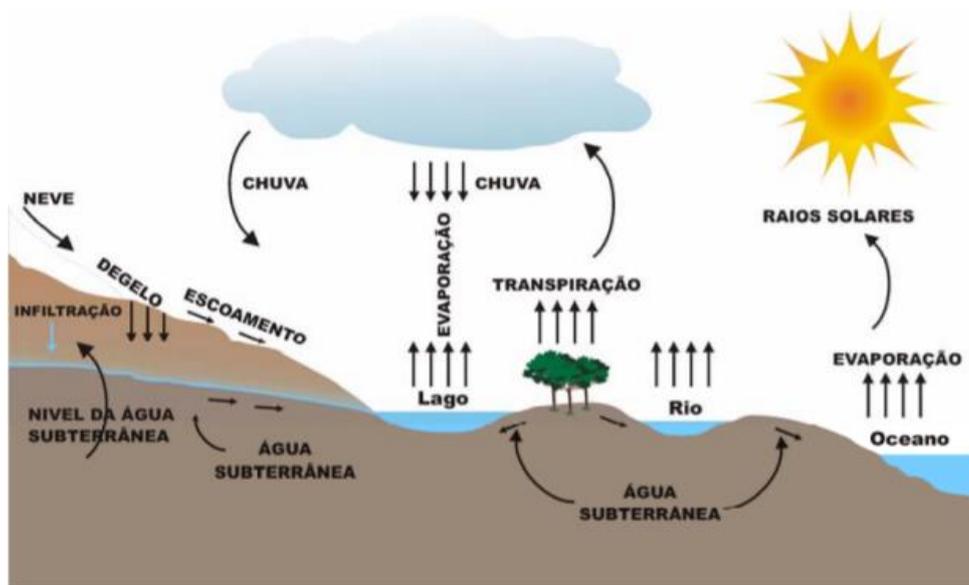
Neste capítulo são apresentados os principais tópicos para o embasamento teórico do trabalho em questão.

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera (SILVEIRA, 2009). Esse fenômeno é impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (CARVALHO; SILVA, 2006).

Resumidamente, o ciclo hidrológico, como mostrado na Figura 1, é iniciado pela evapotranspiração, que consiste na transformação da água que está no estado líquido em vapor (SILVEIRA, 2009). O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar e condensa formando as nuvens que por sua vez pode resultar em precipitação, sendo sua forma mais comum a chuva (VILLELA; MATOS, 1975) A massa precipitada pode ser retida pela vegetação da região e ao chegar ao solo sofre o processo de infiltração, onde parte da água é absorvida pelas raízes das plantas e o restante percola até o lençol freático. À medida que o solo tem seus vazios preenchidos por água, a taxa de infiltração diminui e o excedente de água não infiltrada gera o escoamento superficial. O volume escoado deságua em rios e nos oceanos reiniciando assim, um novo ciclo (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010; SILVEIRA, 2009).

Figura 1 - Ciclo hidrológico



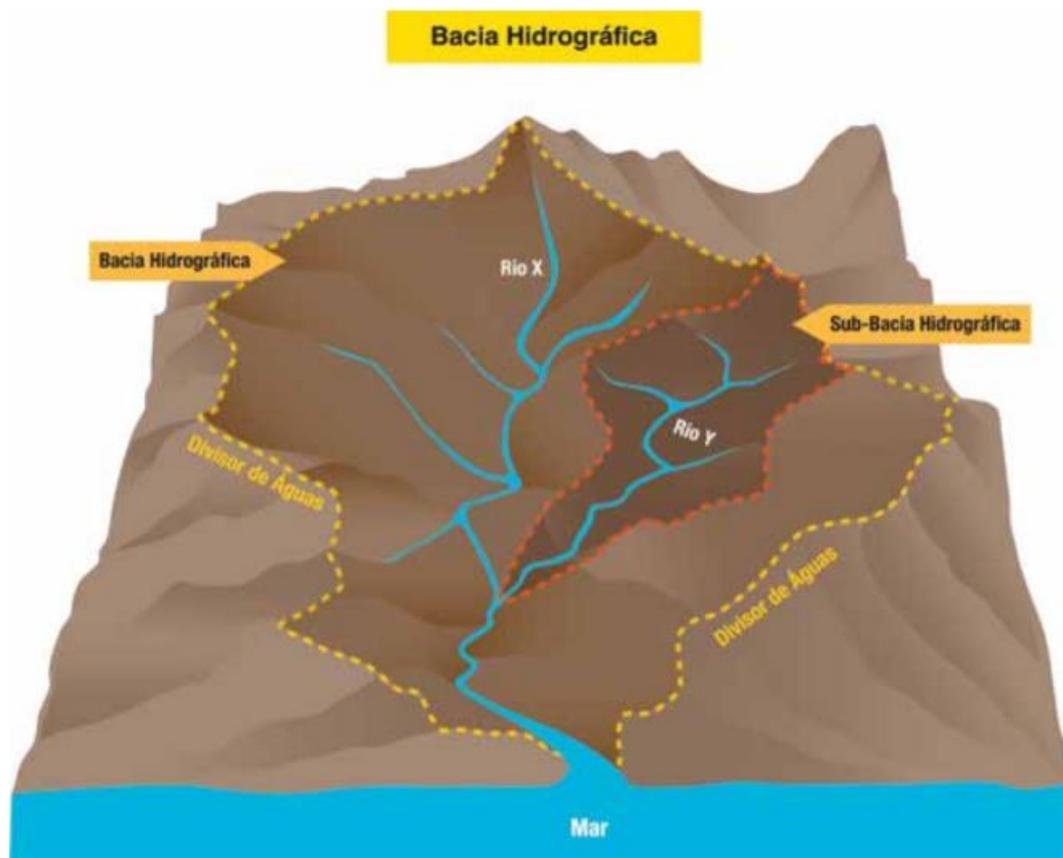
Fonte: BUCHINERI (2004).

Segundo Silveira (2009), o ciclo hidrológico pode ser considerado fechado somente a nível global, pois o balanço hídrico regional é caracterizado como aberto, visto que as precipitações que ocorrem em determinada região não foram geradas necessariamente pela evapotranspiração local. Localmente, este ciclo é avaliado a partir de uma região denominada bacia hidrográfica.

3.2 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica consiste em uma região de captação natural da água oriunda da precipitação que faz afluir os escoamentos, por meio de um grupo de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem, para um único ponto de saída denominado de exutório (SILVEIRA, 2009), (Figura 2).

Figura 2 - Bacia hidrográfica



Fonte: ATLAS AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ (2015).

A classificação em bacia ou sub-bacia, conforme Santana (2003), se torna relativa diante do contexto, visto que as bacias podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias sendo que cada bacia hidrográfica é interligada com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia.

A partir das características físicas de uma bacia ou sub-bacia, é possível realizar a avaliação de seu comportamento hidrológico, uma vez que, ao se estabelecerem relações e comparações entre eles e os dados conhecidos, consegue-se definir indiretamente valores hidrológicos em locais nos quais não há dados (VILLELA; MATTOS, 1975).

Para a caracterização da bacia é essencial o levantamento das características fisiográficas como uso do solo, tipo de solo, área, forma, declividade da bacia, elevação, declividade do curso d'água, tipo da rede de drenagem e densidade de drenagem. Todos estes fatores terão influência direta nas fases de escoamento, infiltração e armazenamento de água em uma bacia hidrográfica. O Quadro 1 apresenta as características fisiográficas e quais são os principais impactos e influências sobre a bacia.

Quadro 1 - Dados fisiográficos de uma bacia hidrográfica.

(continua)

Características fisiográficas	
Uso do solo	Impacto direto na geração do escoamento superficial, visto que, lugares com alta taxa de urbanização e desmatamento tende a ter maior escoamento superficial e menor infiltração da água no solo.
Tipo de solo	Influencia diretamente o escoamento superficial, escoamento subsuperficial, escoamento subterrâneo, infiltração e recarga subterrânea.
Área da bacia	Dado fundamental para definir o potencial hídrico da bacia e um elemento básico para o cálculo de outras características.
Forma da bacia	Importante fator para o cálculo do tempo de concentração da bacia. Três índices podem determinar a forma da bacia coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de conformação. O primeiro relaciona a bacia a um círculo, o segundo a um retângulo e o terceiro a um quadrado.

(conclusão)

Declividade da bacia	Controla boa parte a velocidade do escoamento superficial o que afeta a infiltração, a umidade do solo, a erosão do solo e a contribuição de água subterrânea ao escoamento do curso d'água.
Elevação	Influência sobre a precipitação, perdas de água por evapotranspiração e sobre o deflúvio médio.
Declividade do curso d'água	Indica a velocidade do escoamento, ou seja quanto maior a declividade mais veloz será o curso d'água.
Tipo de rede de drenagem	Ordem dos cursos d'água e densidade de cursos d'água definem o tipo da rede de drenagem. A primeira classifica a rede quanto ao grau de ramificação e a segunda relaciona o número de cursos da água com a área total da bacia.
Densidade de drenagem	Define a eficiência da drenagem na bacia, quanto mais eficiente o sistema mais rapidamente a água atingirá o exutório.

Fonte: Adaptado de Villela; Mattos (1975), Porto; Filho; Silva (1999), Campana; Eid (2001) e Silveira (2009).

3.3 VARIÁVEIS DO BALANÇO HÍDRICO

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico sujeito a entradas de água (precipitação) que gera saídas como infiltração, escoamento e evapotranspiração (COLLISCHONN; TASSI, 2011).

3.3.1 Evapotranspiração

Os processos de evaporação e transpiração ocorrem quando a água líquida é transformada em vapor e transferida para a atmosfera, os quais são conjuntamente denominados de evapotranspiração (BELTRAME; TUCCI, 2009). A evapotranspiração tem uma importante função dentro do ciclo hidrológico, pois dela se inicia todo o processo de carregamento da água em forma de vapor da superfície do solo até atmosfera e em seguida o movimento contrário em forma de precipitação (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Segundo Martins (1976), a evaporação é o conjunto dos fenômenos físicos que transformam a água presente no solo, rios, reservatórios e mares em vapor. Há inúmeros fatores que estão fortemente ligados com a intensidade da evaporação como grau de umidade relativa do ar atmosférico, vento, temperatura, radiação solar, pressão barométrica, salinidade da água, evaporação na superfície do solo e transpiração (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

A transpiração, como Balbinot et al. (2008) explica, é basicamente um processo de evaporação, porém é regido pelo chamado "controle biológico da transpiração", ou seja, o controle que a própria planta exerce sobre a transpiração, através da dinâmica de seus estômatos. Esse fenômeno é influenciado por inúmeros fatores, como, clima, solo, idade da floresta, disponibilidade de água no solo e a própria espécie dos vegetais.

Segundo Beltrame e Tucci (2009), a evapotranspiração pode ser distinguida em evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR). A ETP é a máxima evapotranspiração que ocorreria se o solo dispusesse de suprimento de água suficiente e a planta em questão estivesse no auge da quantidade de folhas (PORTO; FILHO; SILVA, 2003). Já a ETR é a quantidade de evaporação e transpiração transferida para a atmosfera em condições reais de fatores atmosféricos e umidade de solo (BELTRAME; TUCCI, 2009).

A ETP pode ser obtida de forma direta e indireta. Direta por meio de lisímetro de percolação e lisímetro de pesagem mecânica e indireta por meio de métodos empíricos como Método do Tanque de "Classe A", Método de Thornthwaite (1948), Método de Blaney-Criddle, Método de Penman-Monteith (padrão FAO/1991), Método de Camargo, Método de Hargreaves & Samani, Método de Priestley-Taylor, Método de Turc, entre outros (CARVALHO; STIPP, 2004; PORTO; FILHO; SILVA, 2003).

Já a ETR pode ser obtida somente de forma indireta por meio do método do balanço hídrico e método dos coeficientes de cultura (PORTO; FILHO; SILVA, 2003).

O estudo comparativo dos métodos empíricos para o cálculo da evapotranspiração de Fernandes et al. (2010), mostrou que não há um método único recomendado para determinada situação, pois os valores gerados por cada método dependem da região e situação em que se encontra a bacia e os dados disponíveis.

3.3.2 Precipitação

Conforme Bertoni e Tucci (2009), precipitação é toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, tendo características principais para estudo seu total, duração e distribuição temporal e espacial. Salgueiro e Montenegro (2008) acrescentam que o conhecimento quantitativo da sua variabilidade espacial sobre as regiões, ou bacias hidrográficas, é fundamental para o eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

A medição da precipitação pode ser feita pontualmente por meio de pluviômetro (manual) ou pluviógrafo (automático), ou espacialmente por meio de radares e satélites. Seus

dados devem ser criteriosamente analisados, manipulados e caso apresentem erros devem ser corrigidos (CHEVALLIER, 2009).

Para realizar as medições se utilizam os postos pluviométricos que tem como objetivo a medição ininterrupta das precipitações ocorridas ao longo do ano, porém, não raramente, essas séries apresentam descontinuidades, seja por preenchimento errado do valor na caderneta, soma errada do número de provetas (quando a precipitação é alta), valor erroneamente estimado pelo observador (quando não presente), crescimento da vegetação ou obstrução do posto, danificação do aparelho ou problemas mecânicos no registrador gráfico (BERTONI; TUCCI, 2009).

Os métodos utilizados para o preenchimento de falhas segundo Bertoni e Tucci (2009) são descritos abaixo.

- Método de ponderação regional: é calculado a partir de dados observados de três estações vizinhas e a média de precipitação do próprio posto. É utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações.
- Método de regressão linear: consiste em utilizar as regressões linear simples ou múltipla. Na regressão simples o posto que apresenta falhas é correlacionado com o seu vizinho e as estimativas dos parâmetros da equação podem ser obtidas graficamente ou através do critério de mínimos quadrados. Já na regressão múltipla a correlação ocorre entre o posto que apresenta falhas com vários postos vizinhos.
- Método de ponderação regional com base em regressões lineares: este método é uma combinação dos dois métodos anteriormente descritos.

A necessidade de analisar a consistência dos resultados obtidos após o preenchimento das falhas, tem importância para a comprovação da homogeneidade dos dados disponíveis num posto com relação a dados observados em postos vizinhos.

Um dos métodos utilizados é o método de Dupla-Massa que consiste em comparar através de um gráfico cartesiano a consistência entre os valores de precipitação acumulados de dois postos, um a ser consistido com outro confiável (BERTONI; TUCCI, 2013).

Como Oliveira et al. (2010) explica, a tendência linear entre os dois postos (o analisado e o vizinho) indica a consistência dos dados, podendo ser verificada essa linearidade através do ajuste da equação da reta e do coeficiente de determinação, obtidos pela técnica da minimização da soma dos quadrados dos desvios.

O entendimento da precipitação numa bacia hidrográfica é muito amplo, pois a precipitação dificilmente segue um padrão físico idêntico. Além disso, a variação espacial muda

rapidamente, junto com a variação temporal e intensidade da chuva (MARCIANO; BARBOSA; SILVA, 2018).

Desta forma, é necessário utilizar métodos para o cálculo da chuva média que atinge a bacia, os pluviômetros medem a precipitação que ocorre em um determinado ponto, porém, em geral é necessário saber a altura da chuva que ocorreu em uma dada área, para isso é necessário utilizar as observações dentro dessa superfície e nas suas vizinhanças. Mesmo sendo uma abstração e que a chuva real obedeça a distribuições espaciais e temporais variáveis (SANCHEZ, 1986). Há pelo menos três métodos amplamente utilizados e aceitos para determinar a precipitação média em uma área são eles Método das Isoietas, Método dos Polígonos de Thiessen e Interpolador pelo inverso da distância. (GENOVEZ, 2001; BERTONI; TUCCI, 2009; GIRARDI et al., 2012).

3.3.3 Infiltração

A infiltração é o fenômeno em que a água proveniente da precipitação penetra nas camadas do solo, movendo-se para baixo, sob a ação da gravidade até atingir uma camada de suporte (MARTINS, 1976). Ainda segundo o autor, a infiltração é dependente do tipo de solo, grau de umidade do solo, ação da precipitação sobre o solo, utilização do terreno, cobertura vegetal, temperatura do ambiente e presença de ar nos vazios do solo.

Este fenômeno pode ser distinguido em três fases: fase de intercâmbio, fase de descida e fase de circulação. A primeira ocorre na camada superficial do terreno onde a água está sujeita a retornar à atmosfera através da aspiração capilar ou devido à transpiração das plantas. Na segunda a ação da gravidade supera as forças capilares e água começa o movimento de descida. A terceira, ocorre quando o terreno já está saturado e formam-se os lençóis subterrâneos, assim a água flui devido a declividade do terreno (ALVAREZ; GARCEZ, 1988). Molinari e Vieira (2004) acrescentam que a parcela de precipitação que infiltra recarrega o reservatório de água subsuperficial ou subterrânea e pode convergir lentamente para as correntes de fluxos de água subterrâneo sendo capaz de alimentar rios durante longos períodos de estiagem.

O conhecimento da capacidade de infiltração do solo e sua lei de variação espacial e tempo, é importante na representação do ciclo hidrológico e para modelos chuva-vazão que utilizam como dado de entrada a infiltração e assim necessitam de subsídios para a avaliação de parâmetros em concordância com as condições físicas da bacia (PAIVA et al., 2004).

O movimento da água em meio poroso foi primeiramente descrito por Henry Darcy em 1856 por meio de equações, a partir disso foi possível deduzir equações que hoje são mais

amplamente utilizadas para o cálculo de infiltração como Equação de Horton (1939), Algoritmo de Berthelot (1970), Equação de Green e Ampt, entre outras (SILVEIRA; LOUSADA; BELTRAME, 2009).

A infiltração no solo ocorre até o ponto em que o solo se encontra saturado, ou seja, todos os vazios do solo estão preenchidos com água. Após essa saturação o excedente de água gera o escoamento (vazão).

3.3.4 Vazão

Vazão é o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio dividido por um intervalo de tempo e é o resultado da interação entre a precipitação e a bacia (COLLISCHONN; TASSI, 2011).

3.3.4.1 Hidrograma

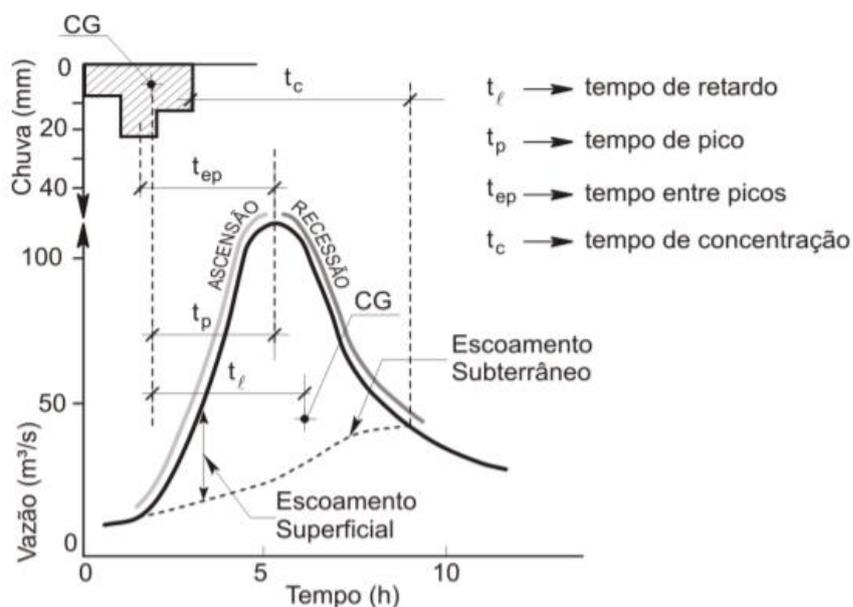
Dados hidrológicos como os de chuva e vazão são importantes para a gestão dos recursos hídricos (SILVA; ARAUJO, 2011) e para a caracterização da bacia. Como esses dados são escassos ou de difícil precisão, vários métodos foram criados para facilitar o entendimento dessa relação.

Essa relação pode ser representada pelo hidrograma que consiste em uma representação gráfica integrada das características fisiográficas, climáticas e vegetais que governam as relações entre a precipitação e a vazão na bacia, esse último caracterizado pelo escoamento (LIMA, 2008).

O escoamento que se nota em uma seção da rede de drenagem em uma bacia hidrográfica, na maioria dos casos, não é todo das precipitações que se registam sobre a mesma. Sendo assim são distinguíveis em um hidrograma dois escoamentos, o escoamento subterrâneo ou de base e escoamento superficial ou direto. O primeiro é em consequência do esgotamento das reservas subterrâneas e o segundo provém do deslocamento da água precipitada sobre o terreno. Há também um terceiro tipo de escoamento, o subsuperficial ou hipodérmico, que é a parcela da água que se infiltra, não atinge nenhuma zona de armazenamento subterrâneo e volta a surgir à superfície do terreno. Esse último apresenta menores velocidade quando comparado a outros escoamentos (PAÇO, 2008). Pela dificuldade de se determinar o escoamento subsuperficial, geralmente ele é contabilizado junto com uns dos outros dois tipos de escoamento (TUCCI, 2009).

A Figura 3 representa um hidrograma tipo, no qual são mostrados todos os componentes que o formam.

Figura 3 - Hidrograma tipo



Fonte: COLLICHONN; TASSI (2011).

Segundo Pinto et al. (1976), inúmeras são as características da bacia que influenciam o hidrograma dada uma precipitação, tais como, área, declividade, dimensões e rugosidade do canal, densidade de drenagem, densidade da rede de drenagem, forma, recobrimento vegetal, tipo de solo, capacidade de acumulação do volume escoado.

3.3.4.2 Vazões máximas, médias e mínimas

A vazão de uma bacia ocorre em duas fases importantes, o período de cheia, que está relacionado ao início e término da estação chuvosa e é caracterizado pela elevação dos níveis d'água, chamada enchente, ao período de redução, denominada vazante, retornando para a vazão de base que é alimentada pelo lençol freático, caracterizando o período de estiagem (CAVALCANTE, 2017)

O estudo das vazões de enchente (máximas) tem importância para o controle e atenuação das cheias que podem produzir perdas econômicas e comprometer ou retardar o desenvolvimento de regiões (FERREIRA; MANDONÇA; REIS, 2015). Pode ser determinada por fórmulas empíricas, métodos estatísticos, método racional e métodos hidrometeorológicos.

Segundo Silveira e Silveira (2001), o conhecimento e previsão das vazões mínimas é relevante para o estudo de disponibilidade hídrica, visto que é um período vinculado à oferta crítica d'água. Genz et al. (2008) complementa que a vazão mínima é de grande importância para os períodos de seca, em que a precipitação (chuva) possui uma menor intensidade o que pode acarretar problemas relacionados ao abastecimento de água urbano e de pequenas centrais hidrelétricas.

As vazões mínimas são difíceis de ser medidas, tendo em vista a complexidade dos processos hidrológicos da bacia e o conhecimento precário da conexão entre aquíferos e rios, e dessa forma as vazões mínimas são mensuradas exclusivamente por medidas fluviométricas (SILVEIRA; SILVEIRA, 2001).

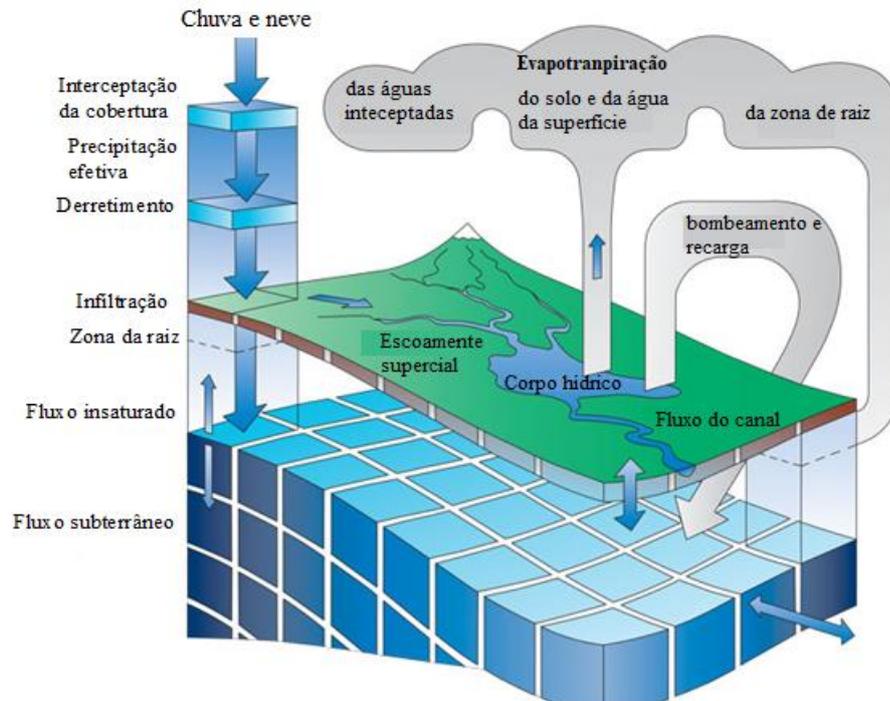
A vazão média da bacia está intimamente relacionada à disponibilidade máxima da bacia, visto que é a maior vazão que pode ser regularizada. Essa vazão pode ser mensal e/ou diária dependendo para que será utilizada seus valores, como, navegação, inundações, cálculo prévio de potência e energia hidrelétrica (GARCEZ; NOGUEIRA, 1988; TUCCI, 2009).

Todas estas variáveis são utilizadas para análise e detalhamento do balanço hídrico da bacia, devendo ser cuidadosamente caracterizadas e mensuradas para futuros cálculos utilizando modelos hidrológicos (COLLISCHONN; TASSI, 2011).

3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos simulam um sistema através de equações matemáticas, com dados de entrada relativos a variáveis hidrológicas e como se comportam dentro da bacia e por fim devolvendo como saída um resultado (PONCE, 1989). A Figura 4 apresenta como um modelo hidrológico representa as mais diversas interações da bacia com meio.

Figura 4 - Representação de um modelo hidrológico.



Fonte: Traduzido e adaptado de DHI Worldwide (2018).

A utilização de um modelo hidrológico tem como objetivo o melhor entendimento e representação do comportamento da bacia e a previsão de condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005).

Entretanto, Goodchild (1993) adverte que é importante reconhecer que modelos ambientais são usualmente, no melhor caso, apenas uma representação dos processos do mundo real, podendo apresentar falhas nos seus resultados devido a inúmeros fatores.

Os diversos modelos hidrológicos podem ser classificados quanto ao tipo de variáveis utilizadas na modelagem, estocásticos ou determinísticos; o tipo de relações entre as variáveis, empíricas ou conceituais; forma de representação dos dados, discretos ou contínuos; existência ou não de relações espaciais, concentrado ou distribuídos; e a existência de dependência temporal, estáticos ou dinâmicos (RENNÓ; SOARES, 2000).

- **Estocástico ou determinístico:** o modelo é determinístico quando para uma mesma entrada o sistema gera sempre a mesma saída, ou seja, o modelo não leva em consideração a lei das probabilidades e sim uma lei definida própria. Já o modelo é definido como estocástico, caso a relação entre dados de entrada e saída são estatísticos, isto é um mesmo dado de entrada poderá gerar resultados diferentes (CHOW, 1964 apud TUCCI, 2005; DOOGE, 1973 apud TUCCI, 2005).

- Empírico ou conceitual: o modelo é empírico, quando se utiliza relações baseadas apenas em observações. São pouco robustos e os dados calculados são ajustados através de funções sem relação aos processos físicos envolvidos. O modelo conceitual, geralmente, é mais complexo que o empírico, pois as suas funções empíricas estão relacionadas com a física do sistema (MOREIRA; MINE; FILHO, 2007; TUCCI, 2005).
- Discreto ou contínuo: o sistema contínuo considera os fenômenos continuamente no tempo, porém a maioria dos sistemas trabalha com intervalos de tempo para a representação dos fenômenos. Importante salientar que quanto menor for o intervalo de tempo escolhido mais preciso será os resultados, mas os custos computacionais serão maiores. A escolha do intervalo de tempo depende do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados (RENNÓ; SOARES, 2000; TUCCI, 2005).
- Concentrado ou distribuído: o modelo concentrado (ou pontual) considera que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada, ou seja, não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. O modelo dito distribuído, ao contrário do concentrado, procura representar a variabilidade espacial e/ou temporal da bacia. Os dois modelos podem ter resultados bem parecidos, porém somente o distribuído consegue estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes parte do sistema (RENNÓ; SOARES, 2000; SILVEIRA; DESBORDES, 1999; TUCCI, 2005).
- Estático ou dinâmico: quando os dados de entrada produz um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo o modelo é caracterizado como estático. O modelo dinâmico utiliza o resultado de uma interação como entrada para uma próxima iteração (RENNÓ; SOARES, 2000).

De acordo com Buchianeri (2004), há três definições importantes para melhor entender o sistema e modelos: fenômeno, variável e parâmetro. O primeiro é um processo físico que produz alteração de estado no sistema (precipitação, evapotranspiração e infiltração); o segundo descreve de forma quantitativa um fenômeno que varia no espaço e tempo (vazão - estado do escoamento); por último, é um valor que identifica o sistema, e que também varia no espaço e tempo (rugosidade, área da bacia).

A diversidade dos modelos hidrológicos abrange todas as áreas da hidrologia e se diferenciam por sua aplicabilidade no gerenciamento dos recursos hídricos. O Quadro 2 mostra alguns tipos de modelos e um resumo da sua finalidade.

Quadro 2 - Alguns modelos hidrológicos utilizados

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Precipitação-Vazão	Determinístico Empírico Conceitual	Comportamento	Calcula vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão Dimensionamento Previsão em tempo atual Avaliação do uso da terra
Vazão-Vazão	Determinístico Empírico Conceitual		Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazões Dimensionamento Previsão de cheia
Geração estocástica de vazão	Estocástico		Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo saturado	Determinístico		Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc.	Capacidade de bombeamento Nível do lençol freático Interação rio-aquífero
Hidrodinâmico	Determinístico		Sintetiza vazões em rios e rede de canais	Simulação de alterações do sistema Efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de Água de rios e reservatórios	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água	Impacto de efluentes Eutrofização de reservatórios Condições ambientais
Rede de canais e condutos	Determinístico	Comportamento e otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede de abastecimento de água Rede de irrigação
Operação de reservatórios	Estocástico Determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Estocástico Determinístico	Comportamento, otimização e planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, etc.

Fonte: TUCCI (2005).

3.4.1 Modelos chuva-vazão

Modelos hidrológicos chuva-vazão tem como objetivo quantificar a transformação da chuva em vazão de um curso de água. Essa relação é considerada extremamente complexa, tendo em vista a grande variação temporal e espacial dos muitos elementos do ciclo hidrológico (SEDKI; OUAZAR; MAZOUZI, 2009).

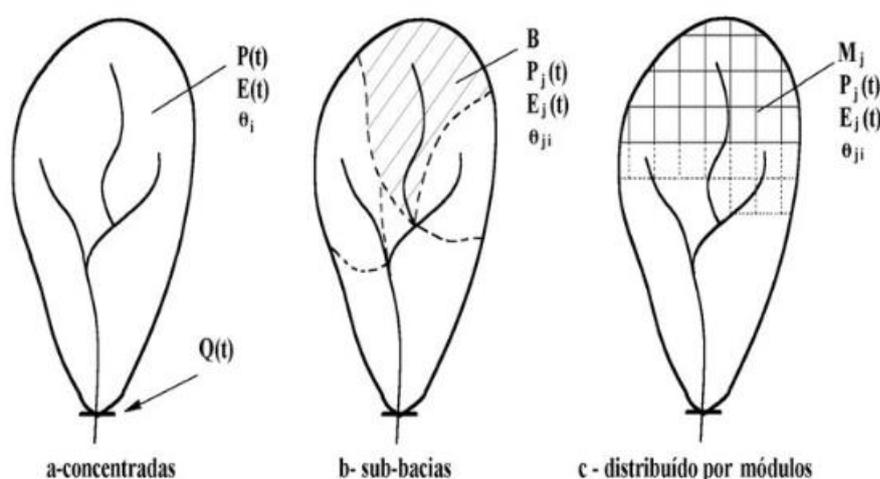
Segundo Lou (2010), os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são importantes para melhor entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos no ponto de exutório da bacia, visto que com a ajuda do modelo se torna possível separar fenômenos e estudar a sensibilidade das variações para bacias com diferentes propriedades. Também é possível prever séries de vazões baseadas nas precipitações e analisar a consistência da curva-chave identificando as alterações no rio e na bacia. O uso do modelo pode ajudar na previsão e controle de cheias, operação de obras hidráulicas, além dos efeitos resultantes da modificação do uso do solo e o dimensionamento e previsão de cenários de planejamento.

Os modelos de chuva-vazão podem ser classificados em três tipologias conforme Neto (2005).

- Modelo concentrado: representa uma bacia hidrográfica como um todo;
- Modelo semidistribuído: representa uma bacia hidrográfica como um conjunto de sub-bacias;
- Modelo distribuído por módulos: representa a bacia hidrográfica como um conjunto de áreas que não constituem, necessariamente, sub-bacias.

A discretização dos três modelos pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Discretização dos modelos hidrológicos chuva-vazão



Fonte: TUCCI (2005).

Dentre os diversos modelos hidrológicos pode-se citar: Modelo MGB-IPH (ADAM et al., 2015; FELIX; PAZ, 2016); Modelo SCS (1975) (CUNHA et al., 2015; TUCCI, 2002); Modelo SMAP (Lopes et al., 1982) (NUNES et al., 2014; RAMPINELLI; COSTA, 2015)

(BORTOLIN et al., 2017); Modelo SWAT (LESSA, 2013; BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016); Modelo Sacramento (BREDA; GONÇALVES; SILVEIRA, 2010).

Adam e Felix (2016) utilizaram o modelo MGB-IPH para a representação da bacia do Rio Piancó (PB) com área de drenagem de 4603 km². O modelo foi executado para um período de 42 anos com dados diários e mensais. Os resultados foram dentro do esperado quando comparados com estudos similares, porém eles enfrentaram dificuldades ao simular os maiores eventos de cheias e a intermitência do rio.

Cunha et al. (2015) comparou a acurácia do modelo SCS com o modelo SCS-CN para o cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. O modelo SCS com valores de CN padrão (retirado de tabelas) demonstrou superestimar os valores de volume escoado e as vazões de pico, já o modelo SCS-CN que ajusta o valor de CN em função da chuva combinada com o hidrograma unitário demonstrou maior precisão nos valores.

Rampinelli e Costa (2015) utilizaram algoritmos PSO e AG associados ao método de busca local Nelder Mead para a calibração do modelo SMAP aplicado a uma bacia do semiárido nordestino. Os dois autores concluíram que os parâmetros de calibração CREC, K e EBin poderiam ser desprezados e o modelo ser calibrado utilizando somente os parâmetros SAT, PES e TUin.

Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016) calibraram e validaram os dados da bacia hidrográfica do Rio Negrinho com aproximadamente 200 km² utilizando o modelo SWAP. Os resultados indicaram que a eficiência do modelo SWAP depende da escala espacial e do período de calibração e que para cenários climáticos e mudanças de uso do solo deve-se calibrar e validar o modelo utilizando dados bem distribuídos e séries de vazões representativas, englobando períodos secos e úmidos.

Dentre os modelos mostrados destaca-se o modelo SMAP, que apresenta uma forma relativamente simples e sem a necessidade de um software específico para calcular a vazão no exutório a partir de dados de entrada. Este modelo apresenta algumas limitações, porém é amplamente utilizados por diversos autores e instituições. Dentre eles se destacam Guilhon, Rocha e Moreira (2007) que utilizaram um modelo híbrido SMAP-MEL para a comparações com outros modelos de previsão de vazões naturais afluentes e Bortolin et al. (2017) utilizou o modelo para comparar diferentes funções-objetivo na fase de calibração.

3.4.1.1 Modelo SMAP

É um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) foi criado em 1981 por Lopes, Braga e Conejo (1982), sendo, no início, desenvolvido para intervalo de tempo diário, porém ocorreram adaptações e foram apresentadas versões horária e mensal, posteriormente (CASTANHARO et al., 2007). O modelo teve seu desenvolvimento a partir da experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e modelo Mero em trabalhos realizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (LOPES, 1999).

O modelo é classificado como conceitual e distribuído por sub-bacias que procura representar o armazenamento e os fluxos de água na bacia através de reservatórios lineares fictícios (RAMPINELLI; COSTA, 2015).

O processo de simulação do SMAP pode ser dividido em três fases calibração - fase em que o modelo é ajustado, determinando os seus parâmetros; validação - é a simulação do modelo com os parâmetros estimados, verifica-se a validade do ajuste através e comparação com dados do histórico; previsão - simulação do sistema com os parâmetros ajustados para a quantificação de suas respostas a diferentes entradas (CAVALCANTI, 2017; BUCHIANERI, 2004).

Na calibração os valores são atribuídos aos parâmetros a fim de comparar os resultados simulados pelo modelo com os observados. Essa calibração pode ser feita por método mono-objetivo ou multiobjetivo. O primeiro utiliza uma função-objetivo para comparar os valores, sendo algumas destas funções a relação entre os volumes calculados e observados (ΔV), o erro padrão (RMSE), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (RNS), o coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo (RNElog) e o erro padrão do inverso da vazão (RMSEI). Já o segundo método utiliza de várias funções-objetivo pré-definidas para melhor adequar os parâmetros do modelo, tais como os algoritmos genéticos (AGs), algoritmo evolucionário MOCOM-UA desenvolvido por YAPO et al. (1998), algoritmo SCE-UA desenvolvido por Duan et al. (1992) (COLLISCHONN; TUCCI, 2003 SHINMA, 2011; MÜHLENHOF et al., 2015). O Quadro 3 apresenta um resumo das principais funções-objetivo que podem ser utilizadas.

Quadro 3 - Resumo das funções-objetivo.

Nome	Utilização	Função-objetivo
Volumes calculados e observados (ΔV)	Avalia o desvio geral do volume	$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^{nt}(Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t))}{\sum_{t=1}^{nt}(Q_{obs}(t))}$
Erro padrão (RMSE)	Sensível aos erros nas vazões máximas	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{n}}$
Coefficiente de Nash-Sutcliffe (RNS)	Sensível aos erros nas vazões máximas	$RNS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}$
Coefficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo (RNSlog)	Sensível aos erros nas vazões mínimas	$= 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt}(\log(Q_{obs}(t)) - \log(Q_{cal}(t)))^2}{\sum_{t=1}^{nt}(\log(Q_{obs}(t)) - \overline{\log(Q_{obs}(t))})^2}$
Erro padrão do inverso da vazão (RMSEI)	Sensível aos erros nas vazões máximas	$RMSEI = \sqrt{\frac{\sum(\frac{1}{Q_{obs}(t)} - \frac{1}{Q_{cal}(t)})^2}{n}}$
Erro relativo médio (MARE)	Avalia o desvio geral	$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{Q_{obs} - Q_{cal}}{Q_{obs}} \right]}{n}$
Soma do resíduos absolutos (SAR)	Avalia o desvio geral	$SAR = \sum_{i=1}^n Q_{obs} - Q_{cal} $
Quadrado médio da raiz ponderada (WRMS)	Avalia o desvio geral	$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2 * \frac{Q_{obs} + Q_{obsm}}{2Q_{obsm}}}{n}}$
Soma do quadrado do resíduo da função-objetivo (SSR)	Avalia o desvio geral	$SSR = \sum_{i=1}^n w(Q_{obs} - Q_{cal})^2$

Fonte: Adaptado de Collischonn e Tucci (2003); Collischonn et al. (2006); Mata-Lima (2011).

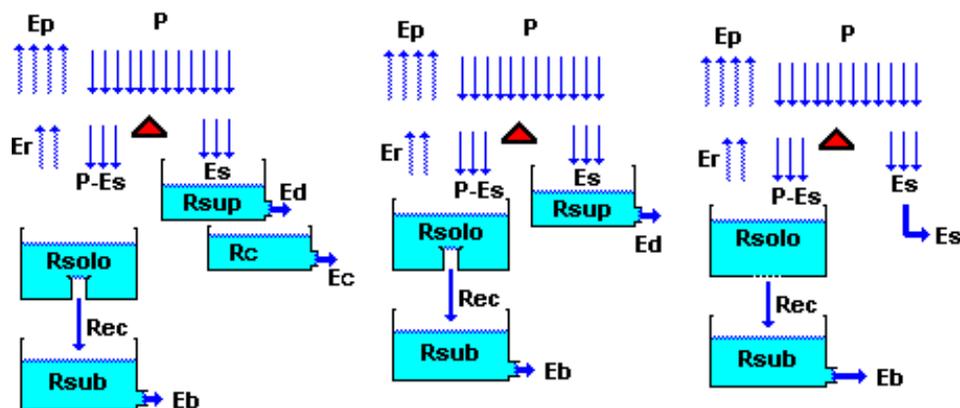
Conforme Shinma (2011), a validação é a fase em que os dados previamente calibrados são avaliados perante os resultados calculados pelo método e os dados reais, com o intuito de comprovar a eficiência do modelo. A avaliação dos resultados passam pelas mesmas funções-objetivo utilizadas na calibração.

Tucci (2005) complementa que há quatro métodos para estimar os parâmetros do modelo: estimativa sem dados históricos, ajuste por tentativas, ajuste por otimização e amostragem.

- Estimativa sem dados históricos: é utilizado quando não se tem dados sobre as variáveis do sistema, os valores podem ser estimados através de informações físicas do sistema. Esses valores podem possuir um intervalo de variação que podem ser encontrados na literatura;
- Ajuste por tentativas: os parâmetros são definidos por tentativa e erro, sendo assim os parâmetros são ajustados em relação aos valores de entrada e saída, já conhecidos;
- Ajuste por otimização: muito similar ao método por tentativas, porém utiliza métodos matemáticos otimizando uma função objetivo que retrata a diferença entre os valores observados e os calculados do modelo;
- Amostragem: os valores dos parâmetros são obtidos por meio de medições específicas no sistema.

Como apresentado anteriormente, o modelo SMAP tem três versões, diária, mensal e horária apresentadas na Figura 6.

Figura 6 - Versão horária (à esquerda), versão diária (ao centro) e versão mensal (à direita).



Fonte: Adaptado de Lopes (1999).

onde:

- R_{SOLO} - reservatório do solo (zona aerada)
- R_{SUP} - reservatório da superfície da bacia
- R_{SUB} - reservatório subterrâneo (zona saturada)
- R_C - reservatório do canal
- P - chuva

E_S - escoamento superficial

E_d - escoamento direto

E_C - escoamento do canal

E_P - evaporação potencial

E_R - evapotranspiração real

Rec - recarga subterrânea

E_b - escoamento básico

Segundo Tucci (1998), o modelo SMAP utiliza a separação do escoamento baseada nos parâmetros do US Soil Conservation. Essa separação entre a precipitação que infiltra, percola até os aquíferos e escoam superficialmente depende das características do solo da bacia.

A classificação do solo utilizada no modelo SMAP se baseia nos quatro grupos de solos hidrológicos (HSGs), apresentado por Mockus (1972). As características dos grupos são: Grupo A, apresenta baixo potencial de escoamento quando completamente molhado, é formado basicamente por até de 10% de argila e até 90% de areia e brita e a água percola livremente pelo solo. Grupo B, os solos desse grupo apresentam moderada/baixa taxa de escoamento quando completamente molhados, a água percola com um pouco mais de dificuldade e é formado por 10% a 20% de argila e 50% a 90% de areia. Grupo C, apresenta solos com moderado/alto potencial de escoamento (quando completamente molhados), apresentam entre 20% a 40% de argila e menos de 50% de areia e a água percola com um pouco mais de dificuldade por seu perfil. Grupo D, solo com alto potencial de escoamento quando completamente molhado, a percolação é restrita ou quase restrita e é formado por mais de 40% de argila e menos de 50% de areia.

Baseando-se na classificação americana de solos e na classificação para o solo brasileiro apresentado por Lombardi Neto et al. em 1989, Sartori (2004) propôs uma nova classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras, apresentado resumidamente no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação hidrológica do solo para condições brasileiras.

Grupo Hidrológico	Taxa de Infiltração	Grau de Resistência/ Erosão	Alguns tipos de solo
A	Alta	Alto	Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho.
B	Moderada	Moderado	Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Bruno, Nitossolo Vermelho, Neossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo.
C	Baixa	Baixo	Argissolo, Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, Cambissolo, Cambissolo Háplico ou Húmico, Latossolos, Espodossolo Ferrocárbico, Neossolo Flúvico.
D	Muito Baixa	Muito Baixo	Neossolo Litólico, Organossolo, Gleissolo, Chernossolo, Planossolo, Vertissolo, Alissolo, Luvisolo, Plintossolo, solos de mangue, Afloramentos de rocha, demais cambissolos que não se enquadram no grupo c, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo.

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

A classificação proposta por Sartori (2004), baseada na classificação do solo brasileiro apresentada por Lombardi Neto et al. (1989), pode ser amplamente utilizada para solos brasileiros semelhantes, mas para regiões em que o solo é extremamente úmido ou seco, a utilização dessa classificação deve ser feita com cautela (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005).

Os itens apresentados foram estudados e utilizados para o embasamento da metodologia, tendo em vista as características da bacia e do modelo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

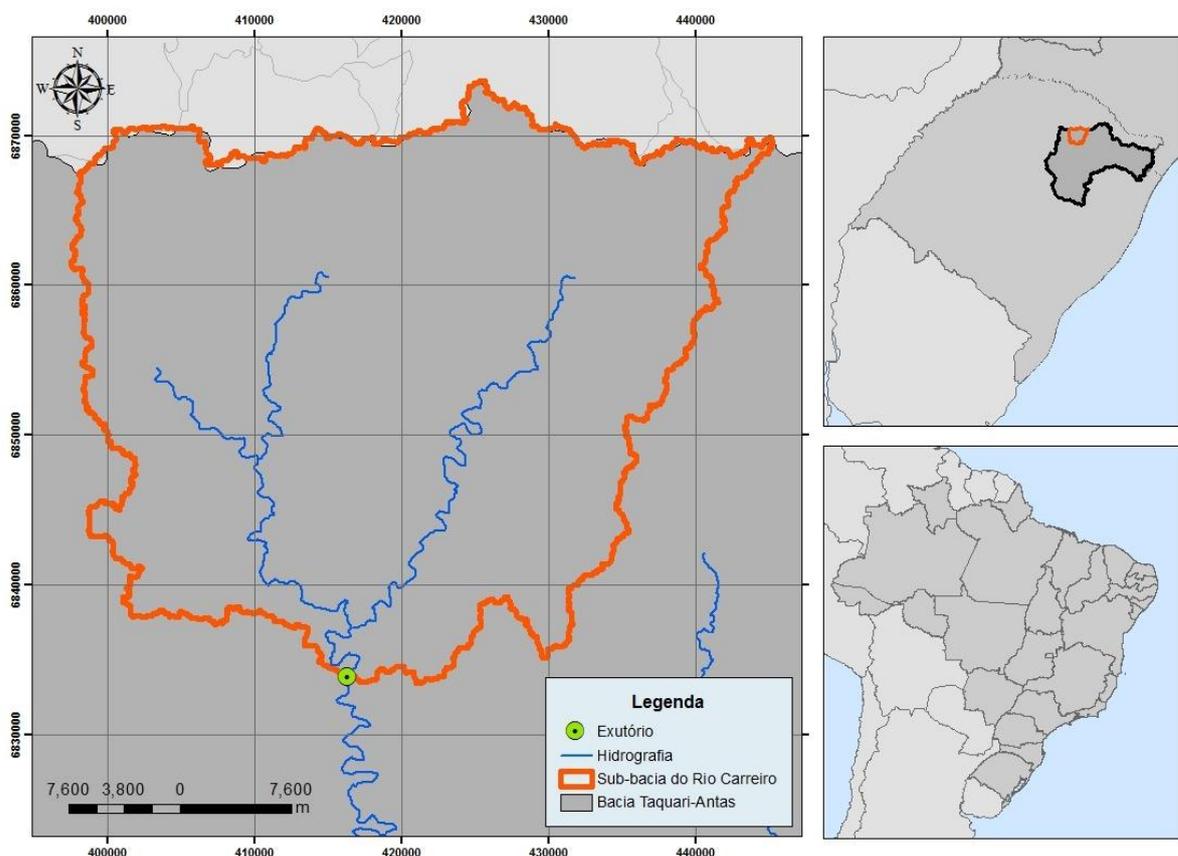
Nesse capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a elaboração do trabalho, que consiste na calibração e validação do modelo SMAP para um determinada sub-bacia.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a um trecho da sub-bacia Rio Carreiro com área de drenagem de 1281,90 km² inserida na bacia Rio Taquari-Antas no estado do Rio Grande do Sul, tendo seu exutório o posto fluviométrico Passo Migliavaca.

O trecho estudado apresenta solos do tipo Cambissolo, Nitossolo e Neossolo (CEPEDRS, 2019) que pela classificação apresentada no Quadro 4 se encontram nos grupos B e C, tendo a taxa de infiltração e grau de resistência entre moderado e baixo, respectivamente. A Figura 7 apresenta a localização e delimitação do trecho estudado.

Figura 7 – Delimitação do trecho da sub-bacia estudado.



Fonte: do autor (2019).

4.2 DADOS DE ENTRADA

O método utilizado para a determinação da evapotranspiração foi Método de Thornthwaite-Camargo (DANTAS et al., 2017) Os resultados são obtidos através da equação 1.

$$ETP = ETp * COR \quad (1)$$

onde:

ETP - evapotranspiração potencial (mm)

ETp - evapotranspiração padrão (mm)

COR é obtido através da equação 2.

$$COR = \frac{N}{12} * \frac{NDP}{30} \quad (2)$$

onde:

NDP - dias do período em questão

N - fotoperíodo do mês em questão

N é obtido através da equação 3

$$N = \frac{2H}{15^\circ} \quad (3)$$

O parâmetro H é obtido através da equação 4 que por sua vez necessita da declinação solar (δ), obtida pela equação 5.

$$H = \arccos(-\operatorname{tg}\delta * \operatorname{tg}\phi) \quad (4)$$

$$\delta = 23,45^\circ * \operatorname{sen}\left(\frac{360^\circ}{365} * (284 + D)\right) \quad (5)$$

onde:

D - quantidade de dias Julianos

ϕ - latitude

δ - declinação solar

ETp depende de duas condições relacionadas apresentada na equação 6.

$$T_{ef} = 0,36 (3 * T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

onde:

T_{max} - temperatura máxima mensal

T_{min} - temperatura mínima mensal

T_{ef} - temperatura específica

se:

- a. ($0 \leq T_{ef} < 26,5^\circ\text{C}$) aplica-se a equação 7

$$ETp = 16 * \left(\frac{10 * T_{ef}}{I}\right)^a \quad (7)$$

onde:

I - índice de calor (equação 8)

$$I = 12 * (0,2 * T_a) * 1,514 \quad (8)$$

T_a - temperatura média anual normal

a - apresentado na equação 9

$$a = 0,49239 + 1,7912 * 10^{-2} * I - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 6,75 * 10^{-7} * I^3 \quad (9)$$

b. ($T_{ef} \geq 26,5^\circ\text{C}$) aplica-se a equação 10

$$ETp = -415,85 + 32,24 * Tef - 0,43 * Tef^2 \quad (10)$$

Para facilitar os cálculos foi utilizado uma aplicação web desenvolvida por Santos et al. (2018), em que se calcula a evapotranspiração por diferentes métodos. Os dados de ETP foram retirados do Posto meteorológico de Lagoa Vermelha (código 83916), localizado na latitude -28.2225° e longitude -51.512778° . O período utilizado foi de 2002 a 2012.

Os dados de precipitação foram retirados do posto Trinta e cinco (código 2851028) por apresentar menos falhas diárias quando comparado com outros postos. A série histórica utilizada foi de 2002 a 2012 e não apresentou nenhuma falha, assim não foi necessário o preenchimento de falhas e nem a homogeneização dos dados.

Os dados de vazão foram retirados do posto fluviométrico Passo Migliavaca, exutório da bacia, no período de 2002 a 2012.

4.3 MODELO HIDROLÓGICO SMAP

Foram utilizadas duas versões no trabalho a mensal e a diária.

A versão diária do modelo além dos dados de evapotranspiração, precipitação e vazão foram definidos os valores dos parâmetros característicos, que inicialmente foram determinados através das características da sub-bacia. Os parâmetros abstração inicial (A_i) e capacidade de campo ($Capc$) foram predeterminados e aferidos manualmente para a melhor calibração. Já os parâmetros constante de recessão do escoamento básico (K_{kt}) e teor de umidade inicial (T_{uin}) foram aferidos manualmente sem valores previamente determinados, somente respeitando os limites preestabelecidos. Os parâmetros são apresentados na Tabela 1.

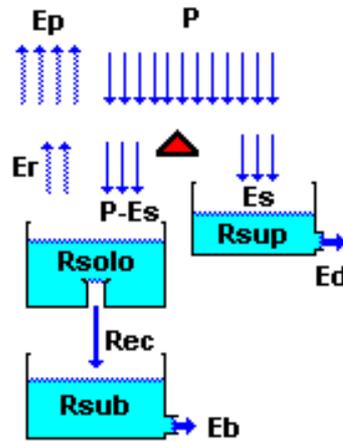
Tabela 1 - Parâmetros característicos da sub-bacia para versão diária do modelo.

Parâmetros característicos	
A_i (mm)	3
$Capc$ (%)	30
K_{kt} (dia)	38
T_{uin} (%)	70

Fonte: do autor (2019).

Essa versão é representada na Figura 8, tendo seus reservatórios atualizados diariamente pelas equações 11, 12 e 13.

Figura 8 - Versão diária.



Fonte: LOPES (1999).

$$R_{SOLO}(i+1) = R_{SOLO}(i) + P - E_s - E_r - Rec \quad (11)$$

$$R_{SUP}(i+1) = R_{SUP}(i) + E_s - E_d \quad (12)$$

$$R_{SUB}(i+1) = R_{SUB}(i) + Rec - E_b \quad (13)$$

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_d - escoamento direto
- E_r - evapotranspiração real
- Rec - recarga subterrânea
- E_b - escoamento básico

A inicialização dos reservatórios se dá pelas equações 14, 15 e 16.

$$R_{SOLO}(1) = T_{UNIN} * Str \quad (14)$$

$$R_{SUP}(1) = 0 \quad (15)$$

$$R_{SUB}(1) = E_{BIN}/(1 - kk)/(Ad * 86,4) \quad (16)$$

onde:

T_{UNIN} - teor de umidade inicial (adimensional)

E_{BIN} - vazão básica inicial (m³/s)

A_d - área de drenagem (km²)

Essa versão é formada por cinco funções de transferência representadas pelas equações 17, 18, 19, 20 e 21. Essa transferência é baseada na separação de escoamento do método SCS, para o presente trabalho será utilizado a classificação apresentada por Sartori (2004).

se $P > A_i$, então: (17)

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

$$E_S = (P - A_i)^2 / (P - A_i + S)$$

caso contrário:

$$E_S = 0$$

se $(P - E_S) > E_P$, então: (18)

$$E_R = E_P$$

caso contrário:

$$E_R = (P - E_S) + (E_P - (P - E_S)) * T_U$$

$$T_U = R_{SOLO} / Str$$

se $R_{SOLO} > (Capc * Str)$, então: (19)

$$Rec = C_{REC} * T_U * (R_{SOLO} - (Capc * Str))$$

$$T_U = R_{SOLO} / Str$$

caso contrário:

$$Rec = 0$$

$$E_d = R_{SUP} * (1 - K2) \quad (20)$$

$$E_b = R_{SUB} * (1 - Kk) \quad (21)$$

A versão diária apresenta seis parâmetros apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros versão diária do modelo SMAP.

Parâmetro	Valores limites
Capacidade de saturação do solo (mm)	100 < 2000
Constante de recessão do escoamento superficial (dias)	0,2 < 10
Parâmetro de recarga subterrânea (%)	0 < 20
Abstração inicial (mm)	2,5 - Campo 3,7 - Mata 5,0 - Floresta densa
Capacidade de campo (%)	30 - Arenoso 40 - Misto 50 - Argiloso
Constante de recessão do escoamento básico (dias)	30 < 180

Fonte: Adaptado de Lopes (1999).

onde:

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

$$Kk = 0,5 \left(\frac{1}{K_{kt}} \right)$$

$$K2 = 0,5 \left(\frac{1}{K_{2t}} \right)$$

C_{REC} e $Capc$ - são multiplicados por 100

O transbordo do reservatório do solo (R_{SOLO}) é tratado como escoamento superficial (E_s). A determinação da vazão é calculada utilizando a equação 22.

$$Q = (E_s + E_b) * Ad/86,4 \quad (22)$$

onde:

Q - Vazão calculada (m³/s)

Foram utilizados dados de três anos (01/01/2005 - 31/12/2008) para calibrar o modelo na versão diária e dez anos (01/01/2002 - 31/12/2012) para a validação. As funções-objetivo utilizadas para a verificação dos dados tanto de calibração quanto de validação estão apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Funções-objetivo utilizadas para as fases de calibração e validação para a versão diária do modelo SMAP.

Nome	Utilização	Função-objetivo
Volumes calculados e observados (ΔV)	Avalia o desvio geral do volume	$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^{nt} (Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t))}{\sum_{t=1}^{nt} (Q_{obs}(t))}$
Erro padrão (RMSE)	Sensível aos erros nas vazões máximas	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{n}}$
Coefficiente de Nash-Sutcliffe (RNS)	Sensível aos erros nas vazões máximas	$RNS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}$
Coefficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo (RNSlog)	Sensível aos erros nas vazões mínimas	$= 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} (\log(Q_{obs}(t)) - \log(Q_{cal}(t)))^2}{\sum_{t=1}^{nt} (\log(Q_{obs}(t)) - \overline{\log(Q_{obs}(t))})^2}$
Soma dos resíduos absolutos (SAR)	Avalia o desvio geral absoluto	$SAR = \sum_{i=1}^n Q_{obs} - Q_{cal} $

Fonte: Adaptado de Collischonn; Tucci (2003), Collischonn et al. (2006).

onde:

Q_{cal} - vazão calculada (m³/s)

Q_{obs} - vazão observada (m³/s)

$\overline{Q_{obs}}$ - média da vazão observada (m³/s)

n - número de dados (dias ou meses)

Já a versão mensal do modelo apresenta três parâmetros característicos da bacia, a constante de recessão (k_{kt}), o teor de umidade inicial (T_{uin}) e vazão básica inicial (E_{bin}). Os três parâmetros foram determinados empiricamente, onde um valor inicial foi definido e aferido manualmente, sendo apresentados na Tabela 2.

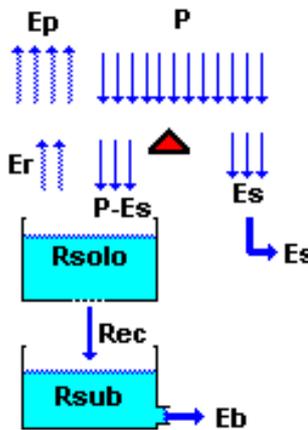
Tabela 2 - Parâmetros característicos da sub-bacia para versão mensal do modelo.

Parâmetros característicos	
K_{kt} (mês)	3
T_{uin} (%)	70
E_{bin} (m ³ /s)	1

Fonte: do autor (2019).

Essa versão apresentada na Figura 9 sendo formada por dois reservatórios matemáticos tendo suas variáveis de estado atualizadas mensalmente pelas equações 23 e 24.

Figura 9 - Versão mensal.



Fonte: LOPES (1999).

$$R_{SOLO}(i+1) = R_{SOLO}(i) + P - E_s - E_r - Rec \quad (23)$$

$$R_{SUB}(i+1) = R_{SUB}(i) + Rec - E_b \quad (24)$$

As equações 25 e 26 apresentam os valores de inicialização e as funções 27, 28, 29 e 30 demonstram as quatro funções de transferência do modelo na versão mensal.

$$R_{SOLO}(1) = T_{UIN} * Str \quad (25)$$

$$R_{SUB}(1) = E_{BIN}/(1 - Kk)/(Ai * 2630) \quad (26)$$

$$E_S = f1 * P \quad (27)$$

$$f1 = T_U^{Pes}$$

$$T_U = R_{SOLO}/Str$$

$$E_r = f2 * E_p \quad (28)$$

$$f2 = T_U$$

$$T_U = R_{SOLO}/Str$$

$$R_{REC} = f3 * R_{SOLO} \quad (29)$$

$$f3 = C_{REC} * T_U^4$$

$$T_U = R_{SOLO}/Str$$

$$E_b = f4 * R_{SUB} \quad (30)$$

$$f4 = 1 - Kk$$

A versão mensal só há quatro parâmetros, apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Parâmetros para a versão mensal do modelo SMAP.

Parâmetro	Valores limites
Capacidade de saturação do solo (mm)	400 < 5000
Parâmetro de escoamento superficial (ad.)	0,1 < 10
Coefficiente de recarga (ad.)	0 < 70
Constante de recessão (mês ⁻¹)	1 < 6

Fonte: Adaptado de Lopes (1999).

onde:

K_{kt} - expressos em dias que a vazão cai a metade de seu valor

$$Kk = 0,5^{\left(\frac{1}{Kkt}\right)}$$

C_{REC} e T_U - são multiplicados por 100

A vazão é calculada utilizando a equação 31.

$$Q = (E_s + E_b) * Ad / 2630 \quad (31)$$

onde:

Q - Vazão calculada (m^3/s)

Foram utilizados dados totais mensais de precipitação e ETP e dados médios mensais de vazão. A calibração utilizou um período de três anos (jan/2005 - dez/2012) e dez anos (jan/2002 - dez/2012) para a validação.

Nas avaliações dos dados foram utilizadas as funções-objetivo apresentadas no Quadro 6.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em duas seções, sendo na primeira o modelo na versão diária e na segunda o modelo na versão mensal.

5.1 VERSÃO DIÁRIA

Após a determinação dos parâmetros característicos, a calibração foi refinada utilizando a ferramenta Solver do Excel. O modelo foi rodado para cada função-objetivo e seu resultados analisados de forma isolada (mono-objetivo). Os valores dos coeficientes encontrados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Calibração utilizando diferentes funções-objetivo para a versão diária.

	Período	Função-objetivo				
		Volumes calculados e observados (ΔV)	Erro padrão	Coefficiente de Nash-Sutcliffe	Coefficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo	Soma do resíduos absolutos (SAR)
Calibração	01/01/2005 - 31/12/2008	-0,22	34,38	0,71	0,85	19543,15

Fonte: do autor (2019).

Analisando os resultados preliminares utilizando as diferentes funções-objetivo foi possível constatar que o coeficiente que demonstrou maior eficiência foi o Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo, alcançando valor de 0,85, tendo em vista que valores de RNSlog entre 0,75 e 1 são considerados muito bons (MORIASI et al., 2007), demonstrando que o modelo é sensível às vazões mínimas.

A fase de calibração estabeleceu, também, os parâmetros do modelo, são eles: capacidade de saturação do solo (Str), constante de recessão do escoamento superficial (k2t) e parâmetro de recarga subterrânea (Crec), apresentados na Tabela 4.

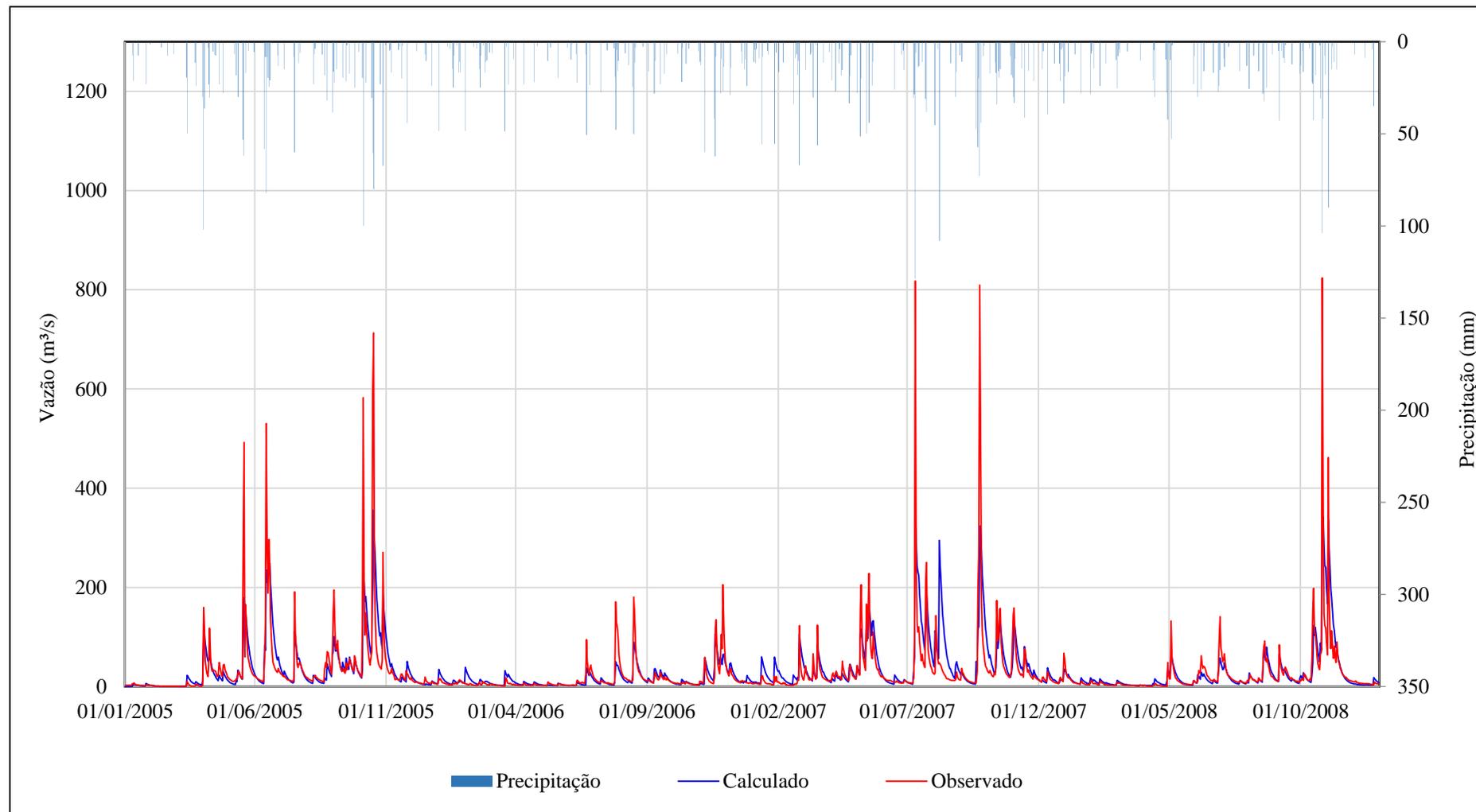
Tabela 4 - Parâmetros calibrados pelo modelo SMAP em sua versão diária utilizando a função-objetivo Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.

Parâmetros calibrados	
Str (mm)	388,52
K _{2t} (dias)	3,81
C _{rec} (%)	0,10

Fonte: do autor (2019).

O bom desempenho do modelo em ajustar as vazões mínimas calculadas com as vazões mínimas observadas é apresentado de forma geral na Figura 10. É possível observar que vazões muito acima da média e de pico não são satisfatoriamente modeladas, mostrando que o modelo não ajusta às vazões máximas quando utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo na versão diária como função objetivo. Isso se explica pelo fato de o coeficiente RNSlog ser sensível as vazões baixas que ocorrem na bacia diferentemente do coeficiente RNS que apresenta melhor previsões para as vazões máximas (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007).

Figura 10 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão diária através do coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.

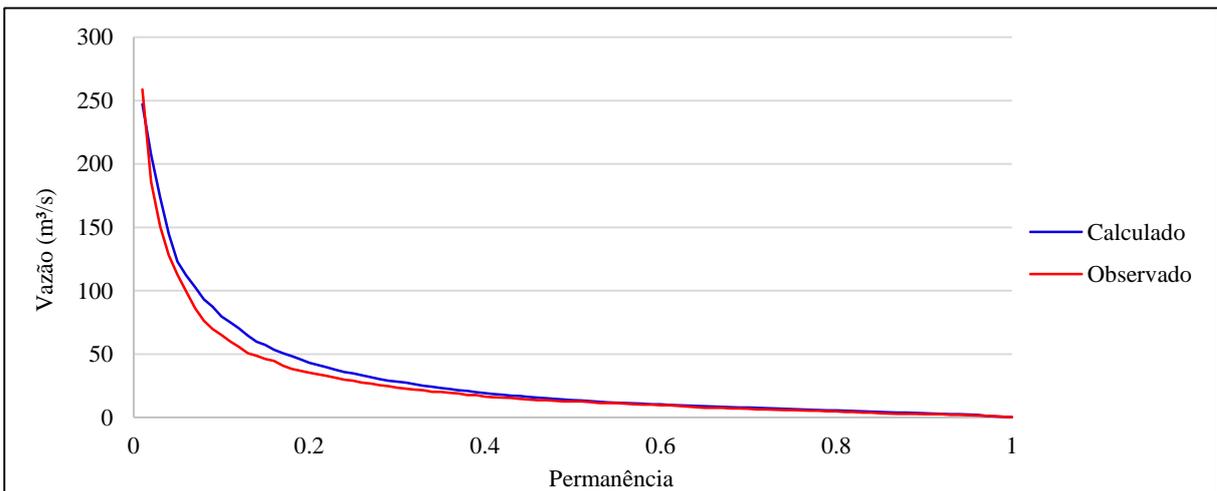


Fonte: do autor (2019).

Outro importante resultado pode ser analisado na curva de permanência (Figura 11), onde se relaciona a frequência e magnitude em que as vazões são igualadas ou superadas no período de tempo estudado (PINTO, 2006). É possível observar que quanto mais próximo do valor de 100% de permanência as curva se aproximam, denotando que as vazões mínimas (mais igualadas ou superadas) calculadas se ajustam com as vazões mínimas observadas.

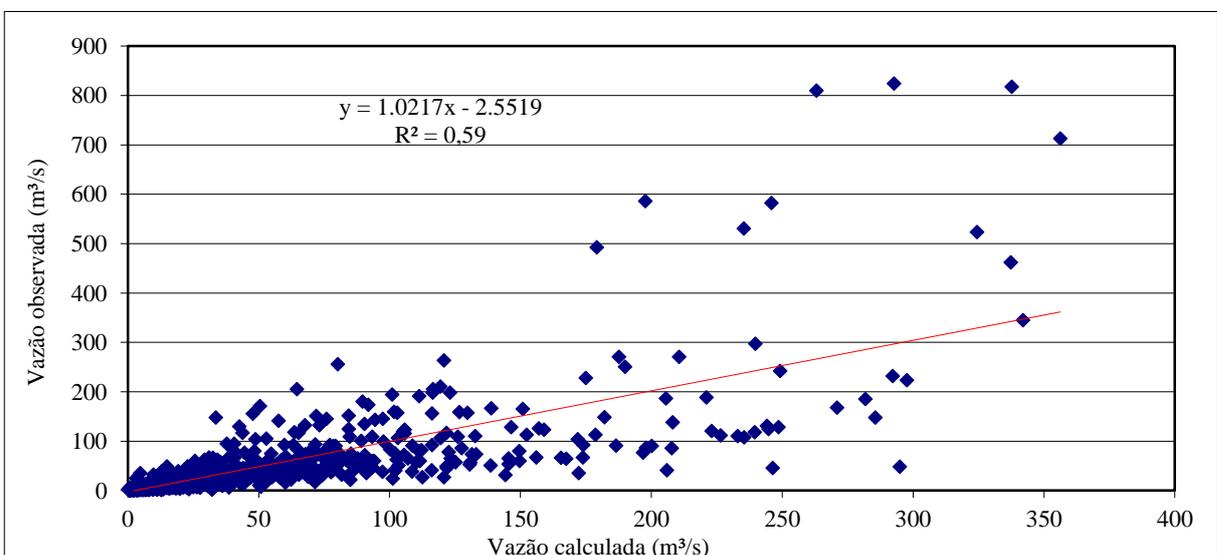
A dispersão dos dados pelo coeficiente R^2 apresentou valor considerado baixo (0,59), decorrente do modelo ter sido calibrado através da FO sensível às vazões mínimas que ocorrem na sub-bacia e as vazões máximas não serem calculadas de forma eficaz pelo modelo. Essa ineficácia pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 12 onde é visível o distanciamento das vazões máximas que ocorrem no período da linha de tendência dos resultados.

Figura 11 - Curva de permanência na fase de calibração do modelo na versão diária.



Fonte: do autor (2019).

Figura 12 - Dispersão entre vazões observados e calculados na fase de calibração.



Fonte: do autor (2019).

Com os parâmetros calibrados foi possível validar o modelo em um período maior, os resultados apresentados foram muito próximos aos resultados da calibração em relação ao coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo como pode ser observado na Tabela 5.

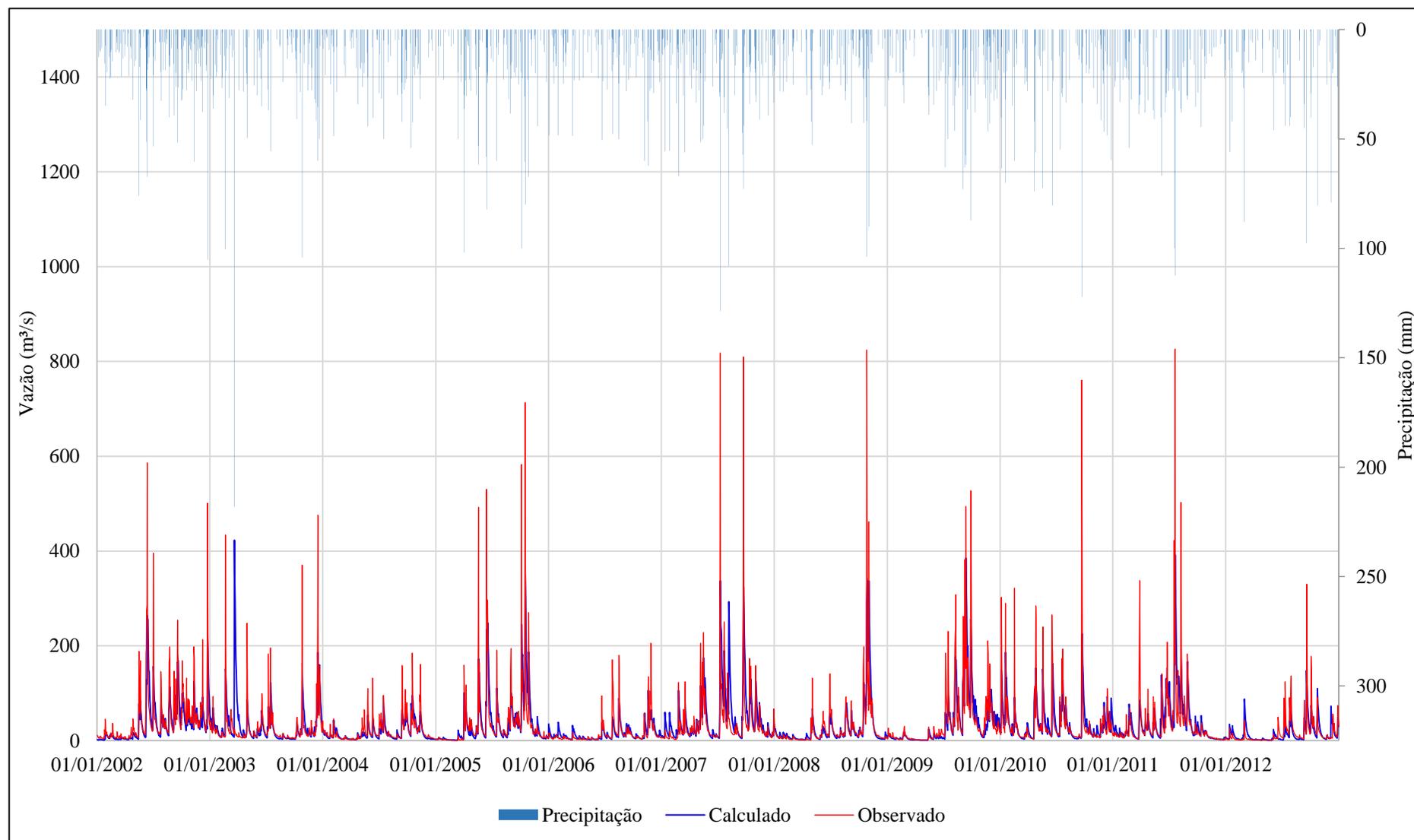
Tabela 5 - Resultados do Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo (RNSlog) na fase de validação do modelo.

	Período	Função-objetivo				
		Volumes calculados e observados (ΔV)	Erro padrão	Coeficiente de Nash-Sutcliffe	Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo	Soma do resíduos absolutos (SAR)
Validação	01/01/2002 - 31/12/2012	-0,01	38,70	0,57	0,84	59627,51

Fonte: do autor (2019).

A sensibilidade do modelo às vazões mínimas na fase de validação pode ser observado mais detalhadamente na Figura 13.

Figura 13 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão diária através do coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.

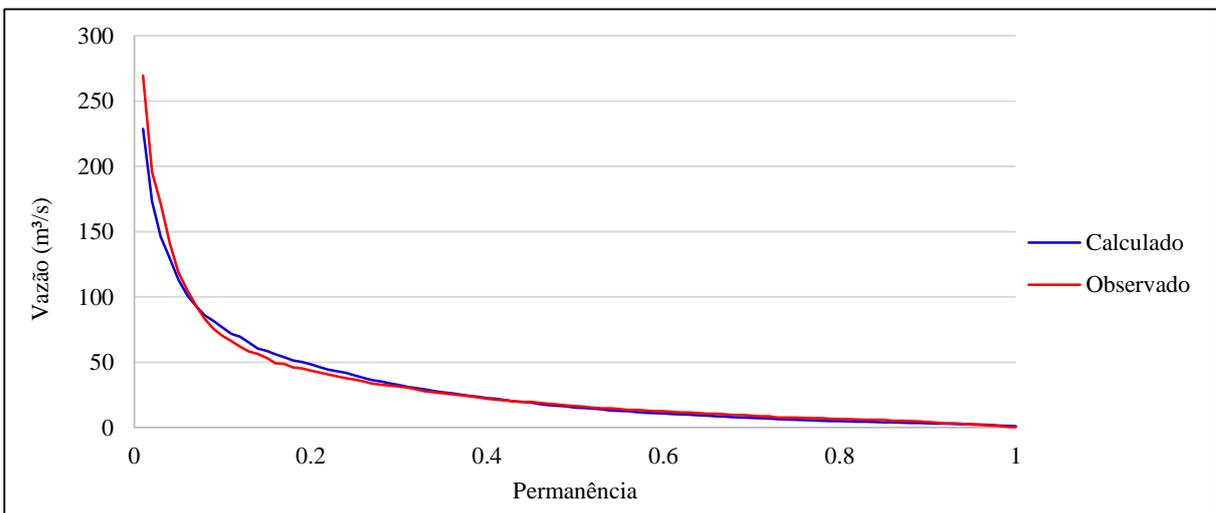


Fonte: do autor (2019).

Como na fase de calibração o modelo gerou a curva de permanência para os resultados obtidos na validação, apresentados na Figura 14. Novamente, percebe-se a aproximação das linhas que representam as vazões (calculada e observada) a medida que a permanência aumenta mostrando que para as vazões mínimas as diferenças entre dados observados e calculados é pequena.

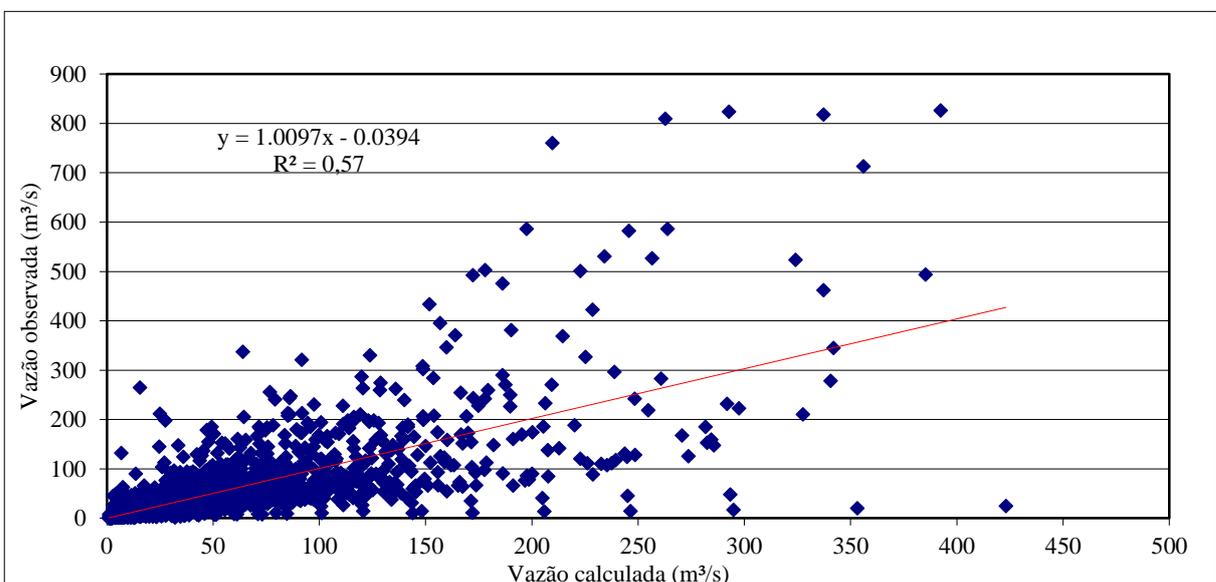
Utilizando um período maior foi possível notar que o modelo tende a prever melhor as vazões, ou seja, além das vazões mínimas já esperadas por usar a FO RNSlog, as vazões médias, entre 0,3 e 0,6, são modeladas satisfatoriamente. Porém, mesmo para um período maior a dispersão de dados (Figura 15) apresenta valor do coeficiente R^2 baixo (0,57), explicado pelas diferenças entre as vazões máximas calculadas e as vazões máximas observadas.

Figura 14 - Curva de permanência na fase de validação do modelo versão diária.



Fonte: do autor (2019).

Figura 15 - Dispersão entre vazões observadas e calculadas na fase de validação.



Fonte: do autor (2019).

5.2 VERSÃO MENSAL

Após a determinação dos parâmetros característicos a calibração foi refinada utilizando a ferramenta Solver do Excel. O modelo foi calibrado em relação a cada função-objetivo e cada resultado analisado de forma isolada (mono-objetivo), os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Calibração utilizando diferentes funções-objetivo para a versão mensal.

	Período	Função-objetivo				
		Volumes calculados e observados (ΔV)	Erro padrão	Coefficiente de Nash-Sutcliffe	Coefficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo	Soma do resíduos absolutos (SAR)
Calibração	jan/2005 - dez/2008	0,01	145,07	0,84	0,87	19543,15

Fonte: do autor (2019).

Dentre as FO calibradas as duas que apresentaram os melhores resultados foram o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (0,84) e o Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo (0,87), perante esses resultados a análise da calibração e posterior validação foram feitas para ambos os casos.

Como na versão diária a fase de calibração da versão mensal gerou três parâmetros, entre eles, capacidade de saturação do solo (Str), parâmetro de escoamento superficial (Pes) e coeficiente de recarga (Crec). Os coeficientes calibrados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros calibrados pelo modelo SMAP em sua versão mensal utilizando separadamente a função-objetivo coeficiente RNSlog e RNS.

	Parâmetros calibrados	
	RNSlog	RNS
Str (mm)	697,28	871,89
Pes (ad.)	6,97	5,03
C _{rec} (ad.)	1,00	1,22

Fonte: do autor (2019).

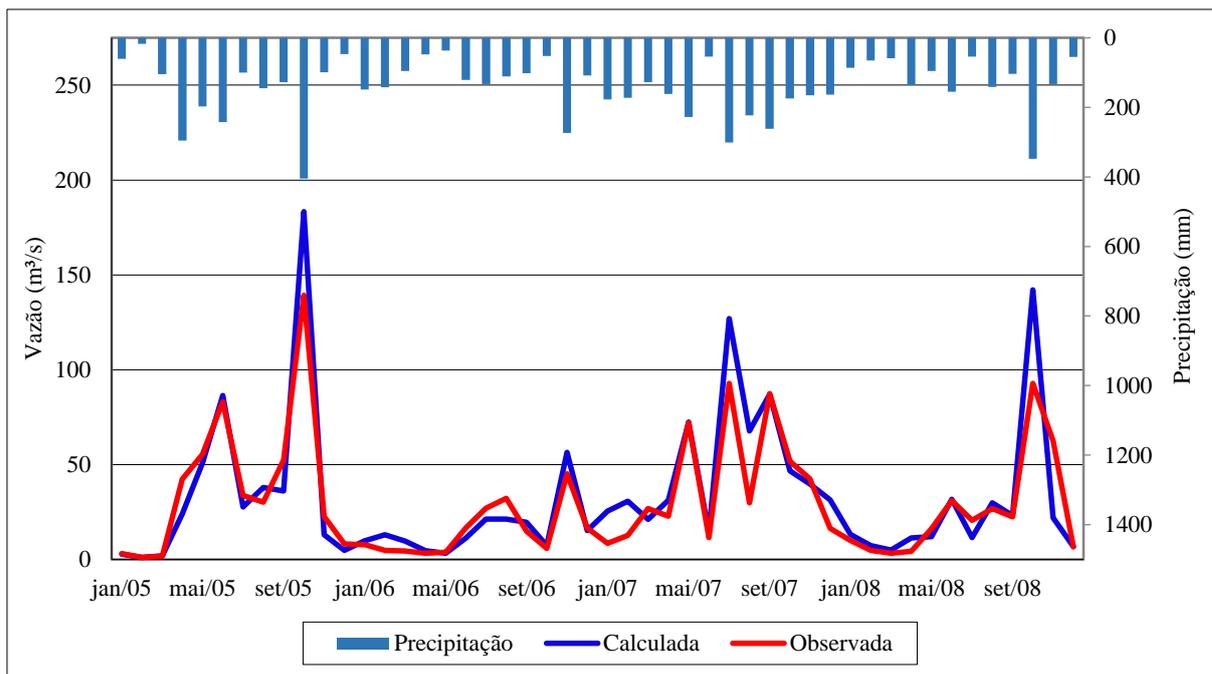
A calibração através da FO RNSlog é sensível às vazões mínimas que ocorrem na sub-bacia, ou seja, as linhas que representam as vazões observadas e calculadas tendem a ser mais próximas em seus valores mínimos, como pode ser visto na Figura 16. Já o modelo calibrado

através da FO RNS torna-se sensível às vazões máximas, resultados expostos pelo gráfico da Figura 17, onde as linhas que representam as vazões observadas e as calculadas ficam mais próximas à medida que os valores se aproximam de seus máximos.

A análise do gráfico da Figura 16 indicou que mesmo utilizando a FO RNSlog, vazões máximas de alguns períodos foram satisfatoriamente modeladas, como pode ser observado entre maio/2007 e junho/2007 e setembro/2007 e outubro/2007.

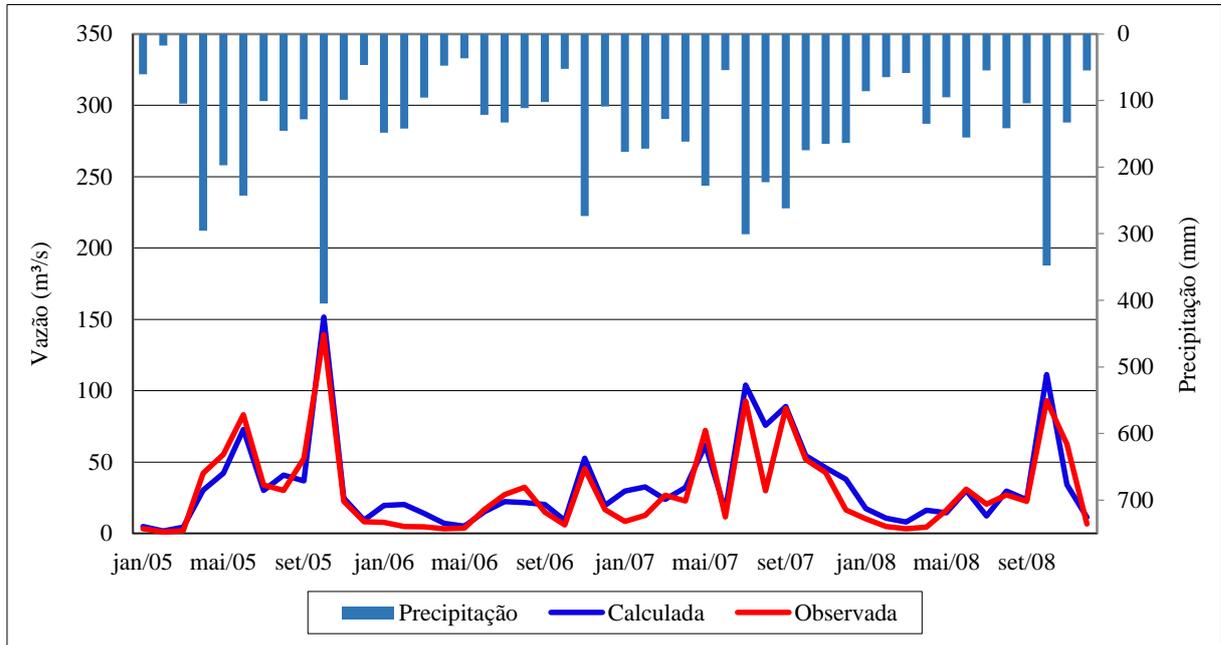
Em contrapartida, ambas calibrações apresentaram gráficos em que algumas vazões de pico foram superestimadas, como em outubro/2005, novembro/2006, julho/2007 e outubro/2008. Nota-se que todas as superestimações aconteceram em meses em que a chuva observada foi muito acima da média, denotando que o modelo apresentou inconsistências ao modelar chuvas não muito comuns para a região.

Figura 16 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

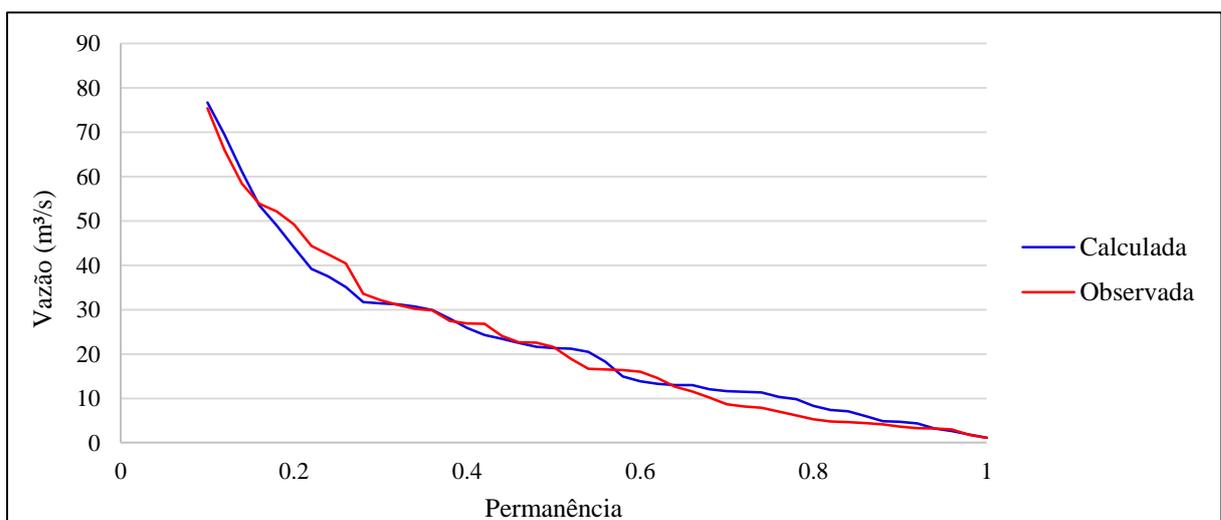
Figura 17 - Resultado gráfico da calibração do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

A curva de permanência (Figura 18) apresenta linhas muito próximas entre os valores de 90% a 100% de permanência, denotando que a calibração através do coeficiente RNSlog modela de forma satisfatória vazões mínimas que ocorrem na sub-bacia e vazões cuja a permanência está abaixo de 20% também são modeladas de forma satisfatória, mesmo que a Figura 16 apresente vazões de pico superestimadas.

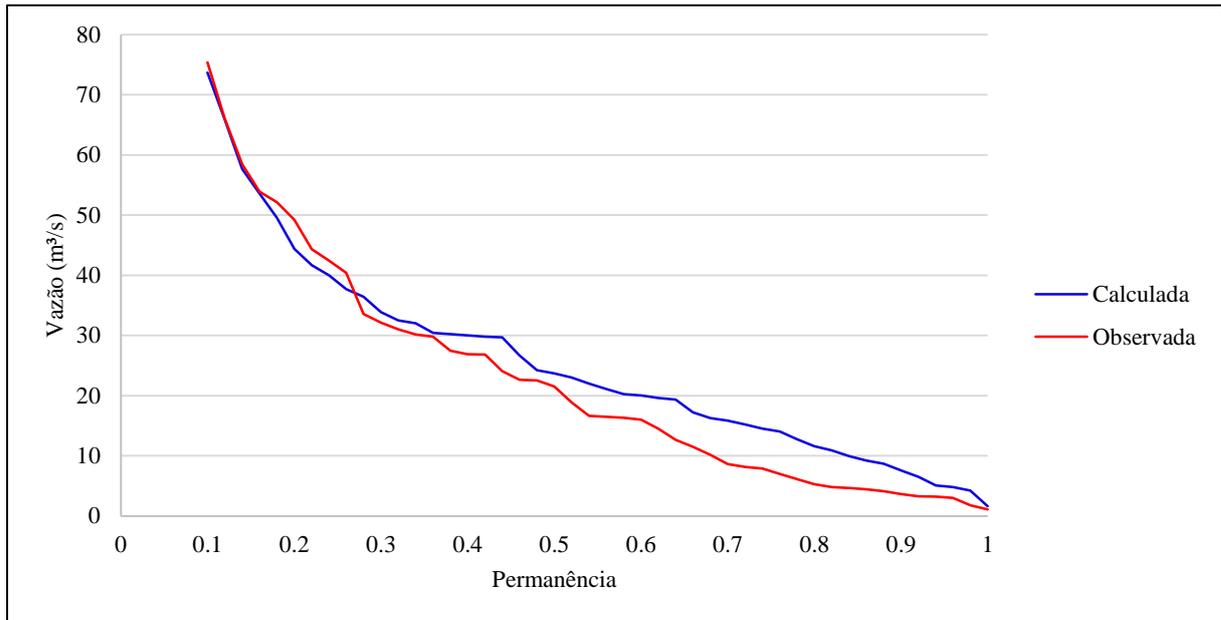
Figura 18 - Curva de permanência na fase de calibração através da Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

Já a versão calibrada através do coeficiente RNS apresentou curva de permanência (Figura 19) em que as vazões com permanência abaixo de 20% apresentam valores observados e calculados próximos e vazões com permanência acima de 30% resultados mais distantes entre si, demonstrando que as vazões máximas são melhores ajustadas do que as vazões mínimas.

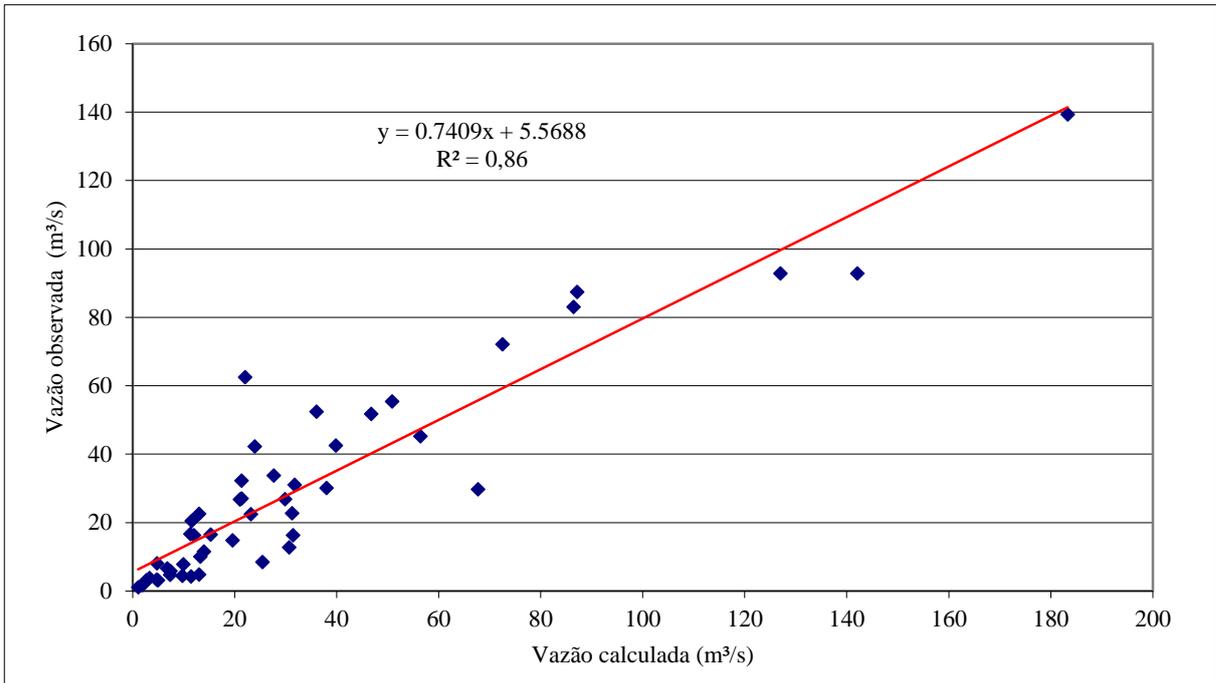
Figura 19 - Curva de permanência na fase de calibração através da Coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

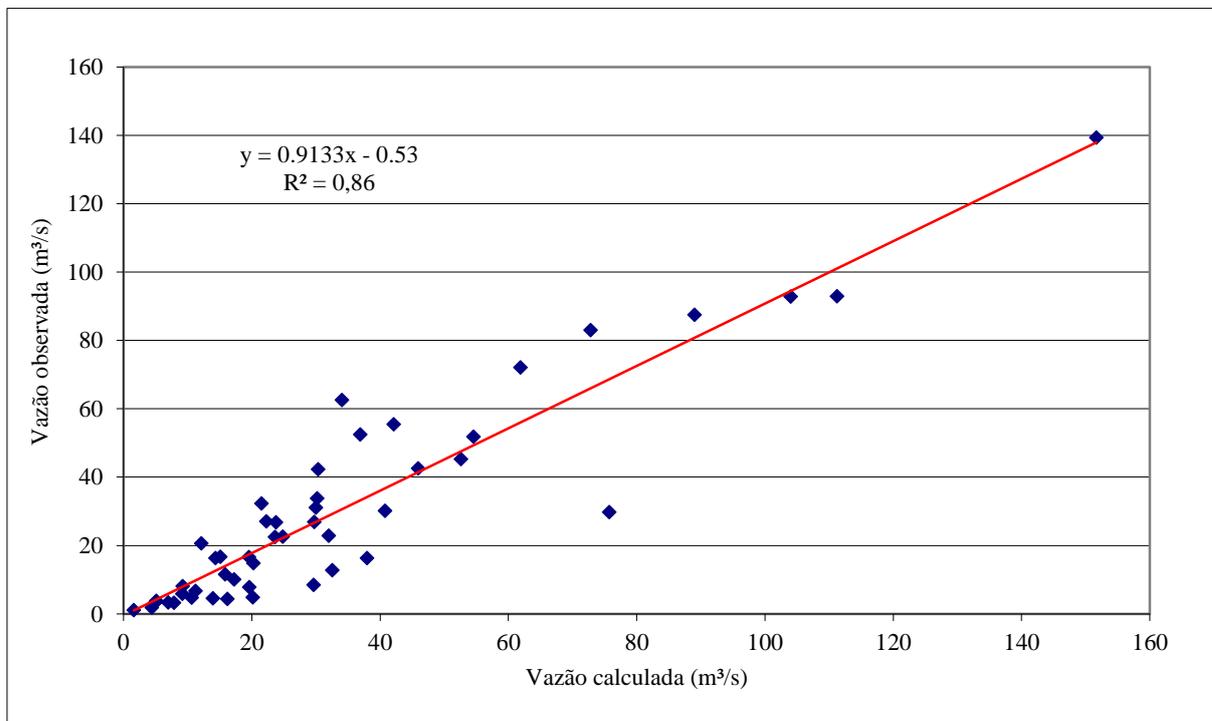
Os satisfatórios resultados apresentados pela versão mensal calibrada por ambas funções-objetivo podem ser observados na Figura 20 e Figura 21 através do coeficiente R^2 com valor de 0,86. Assim, demonstrando que as vazões observadas e calculadas, seja elas mínimas ou máximas, seguem uma linha de tendência, ou seja, os dados calculados e observados são satisfatoriamente modelados.

Figura 20 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de calibração utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

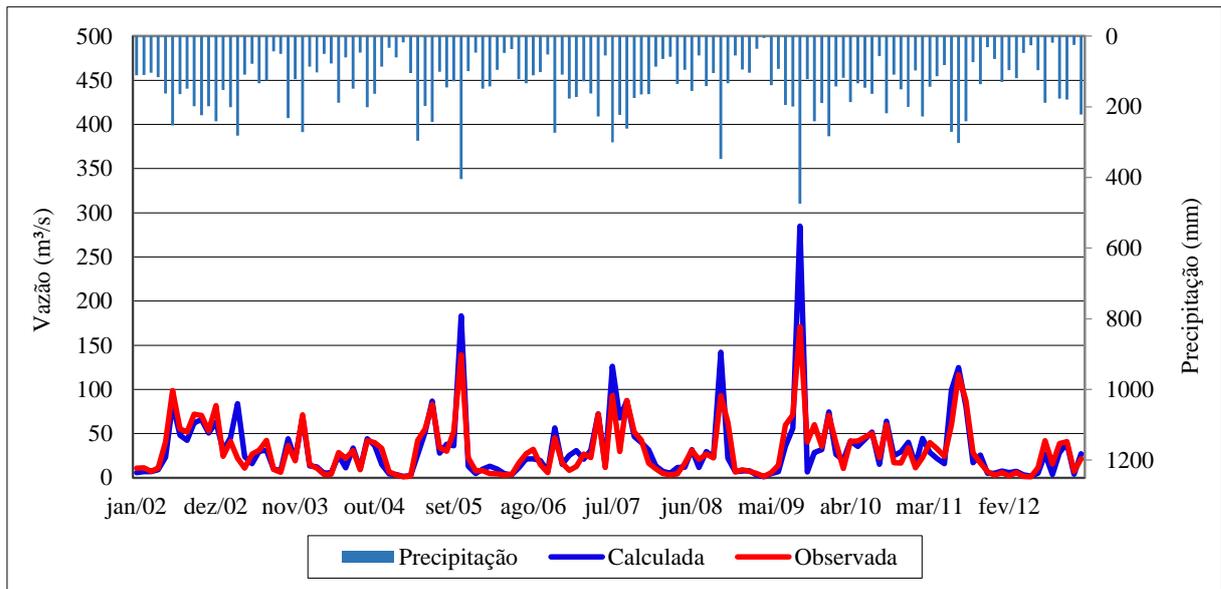
Figura 21 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de calibração utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

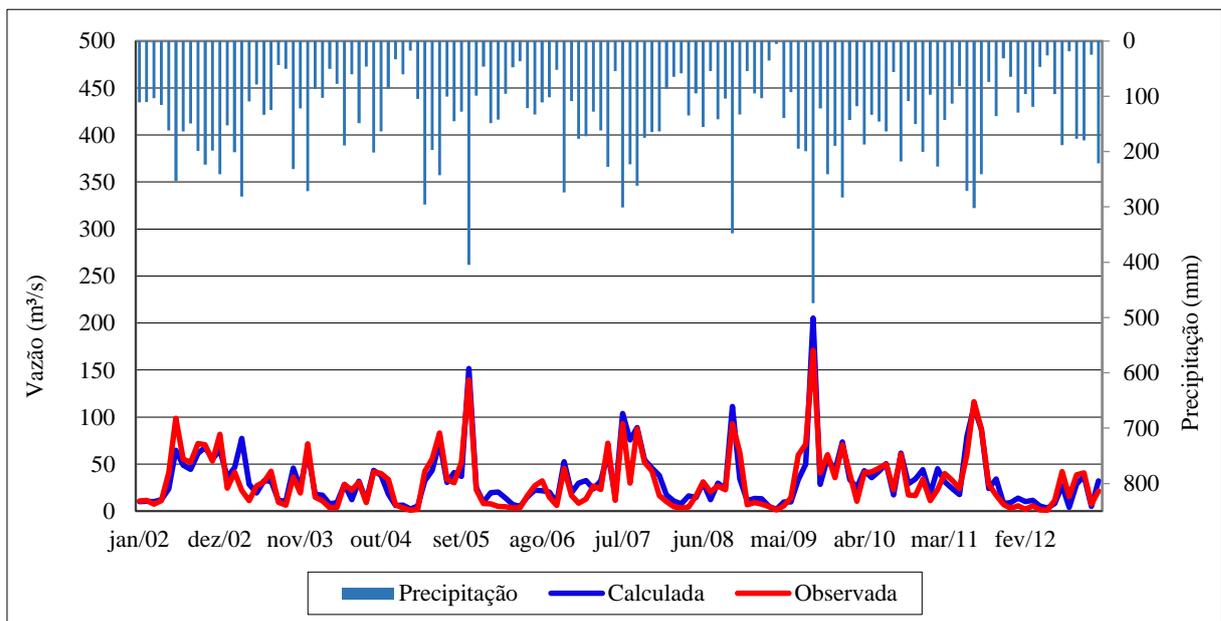
A fase de validação gerou coeficientes com valores considerados satisfatórios, tanto para o RNSlog (0,84) quanto para o RNS (0,83), os gráficos gerados são apresentados na Figura 22 e na Figura 23. Mesmo com os bons resultados, é possível notar que em ambas validações algumas vazões de pico foram superestimadas, mesma falha apresentada na fase de calibração, denotando que o modelo apresenta erros ao estimar vazões muito acima da média mesmo quando modelados períodos maiores.

Figura 22 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

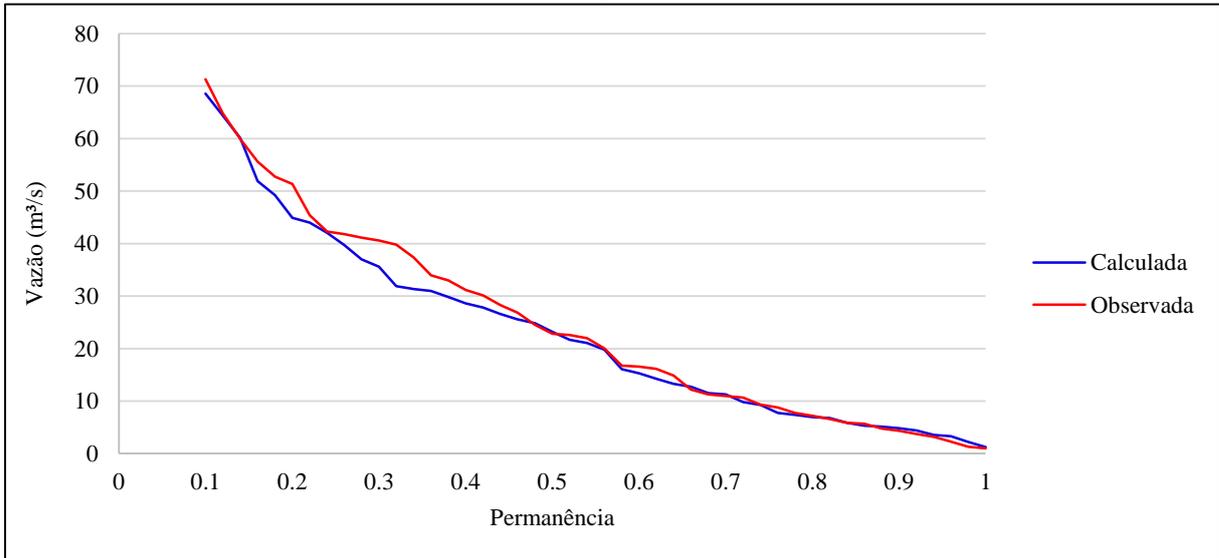
Figura 23 - Resultado gráfico da validação do modelo na versão mensal utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

A validação através do coeficiente RNSlog apresentou curva de permanência (Figura 24) com linhas mais próxima entre 65% e 100% de permanência, demonstrando que o aumento do período estudado melhorou a previsão do modelo.

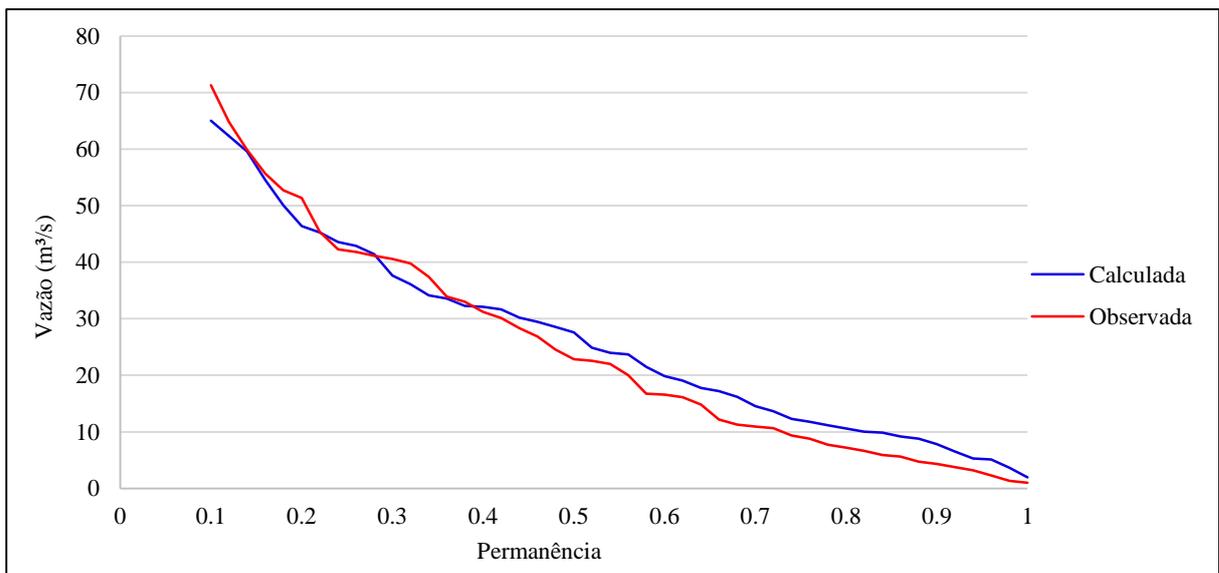
Figura 24 - Curva de permanência na fase de validação através da Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

Contudo o modelo validado através da FO RNS apresentou curva de permanência (Figura 25) muito parecida com a da fase de calibração, demonstrando que a extensão do período estudado não melhorou os valores apresentados, ou seja, o padrão de modelagem se mantém tanto em períodos mais curtos quanto em períodos mais longos.

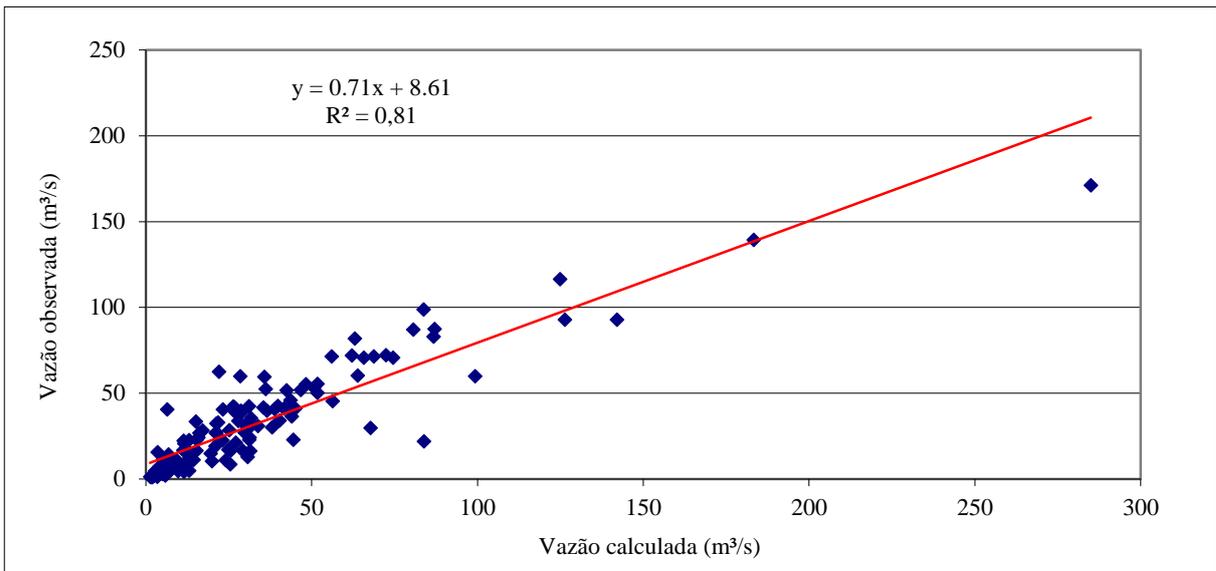
Figura 25 - Curva de permanência na fase de validação através da Coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

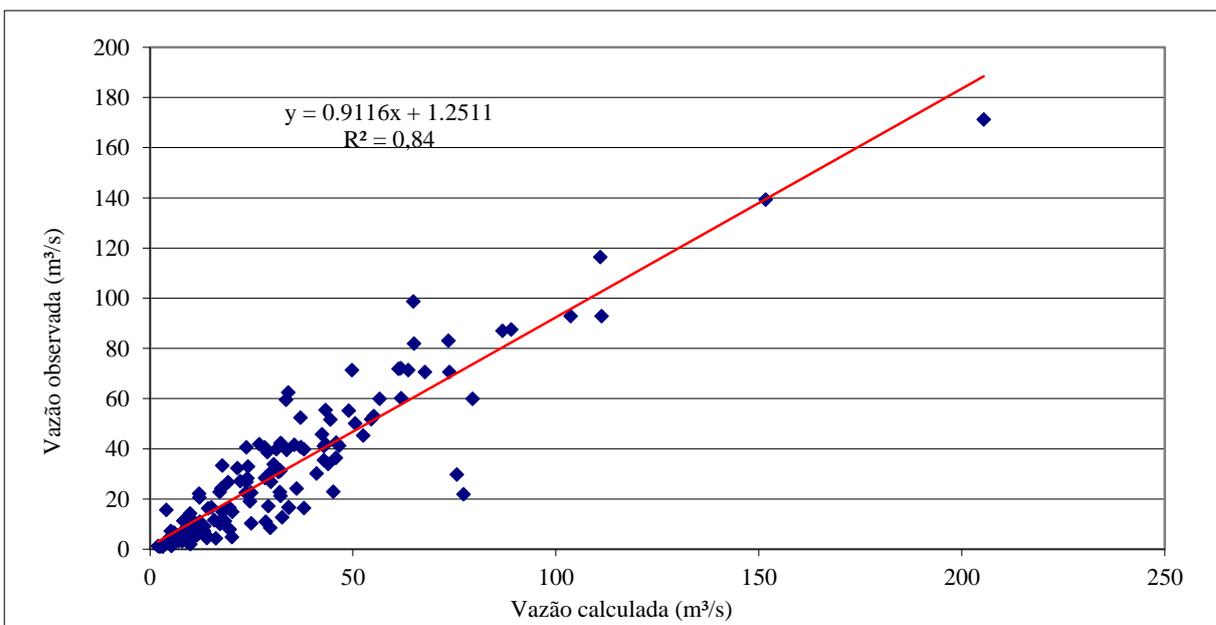
A fase de validação gerou, também, os gráficos de dispersão de dados apresentados nas Figura 26 e Figura 27, onde os valores encontrados para o coeficiente R^2 foram de 0,81 e 0,84 utilizando a FO RNSlog e RNS, respectivamente. Ambos coeficientes considerados satisfatórios e que confirmam a boa modelagem apresentada pelo modelo em sua versão mensal.

Figura 26 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de validação utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

Figura 27 - Dispersão dos resultados entre vazões observadas e calculadas na fase de validação utilizando coeficiente Nash-Sutcliffe.



Fonte: do autor (2019).

A calibração e validação do modelo em sua versão diária apresentou resultados gráficos e numéricos apropriados para a previsão (modelagem) das vazões mínimas que ocorrem na sub-bacia. Já o modelo em sua versão mensal apresentou resultados apropriados tanto na modelagem de vazões mínimas quanto na modelagem de vazões máximas. Todavia, ambos expuseram erros nos cálculos das vazões muito acima da média e vazões de pico, sendo minoradas (no caso da versão diária) e majoradas (em ambas calibrações e validações do modelo na versão mensal).

Essa modelagem errônea pode ser explicada pela característica concentrada do modelo, onde a sub-bacia é considerada homogênea, não levando em consideração diferentes tipos de solo, uso, relevo e declividades ao longo da área estudada. Com isso características da sub-bacia intrinsicamente relacionadas ao volume de água observado no exutório, como tempo de concentração, forma da bacia, capacidade de infiltração e velocidade de escoamento superficial são negligenciadas.

Além da característica do modelo as séries de dados de precipitação também podem ser causadoras de erros, tendo em vista que foram obtidas de um único posto pluviométrico, ou seja, a intensidade e distribuição da chuva foi considerada a mesma para toda a área da sub-bacia. Isso acarreta em discrepâncias nos volumes de precipitação que realmente contribuíram para as vazões medidas no exutório da região estudada.

Quando se compara os resultados apresentados nas duas versões (diária e mensal), onde foi utilizado a mesma função-objetivo (RNSlog) para a calibração e validação, pode-se notar discrepâncias em relação a média mensal histórica das vazões calculadas. A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam os resultados de cada fase (calibração e validação) e os erros absolutos encontrados.

Tabela 8 - Comparação entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de calibração utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.

Mês	Vazão calculada média histórica m ³ /s		Erro absoluto
	Versão diária	Versão mensal	
Janeiro	12,15	12,84	0,69
Fevereiro	11,63	13,04	1,41
Março	12,73	9,42	3,32
Abril	17,26	17,82	0,56
Mai	36,35	34,66	1,69
Junho	31,99	35,87	3,88
Julho	43,17	46,88	3,70
Agosto	38,11	39,22	1,10
Setembro	40,98	41,48	0,50
Outubro	73,35	94,89	21,55
Novembro	50,57	32,81	17,76
Dezembro	12,47	14,56	2,09

Fonte: do autor (2019).

Tabela 9 - Comparação entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de validação utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.

Mês	Vazão calculada m ³ /s		Erro absoluto
	Versão diária	Versão mensal	
Janeiro	19,04	18,79	0,25
Fevereiro	15,95	18,32	2,37
Março	18,29	17,51	0,78
Abril	15,64	16,41	0,77
Mai	26,14	23,78	2,35
Junho	35,43	38,50	3,07
Julho	46,51	48,99	2,48
Agosto	35,76	34,03	1,73
Setembro	50,03	61,33	11,31
Outubro	51,08	56,48	5,40
Novembro	32,89	25,88	7,01
Dezembro	27,77	27,10	0,67

Fonte: do autor (2019).

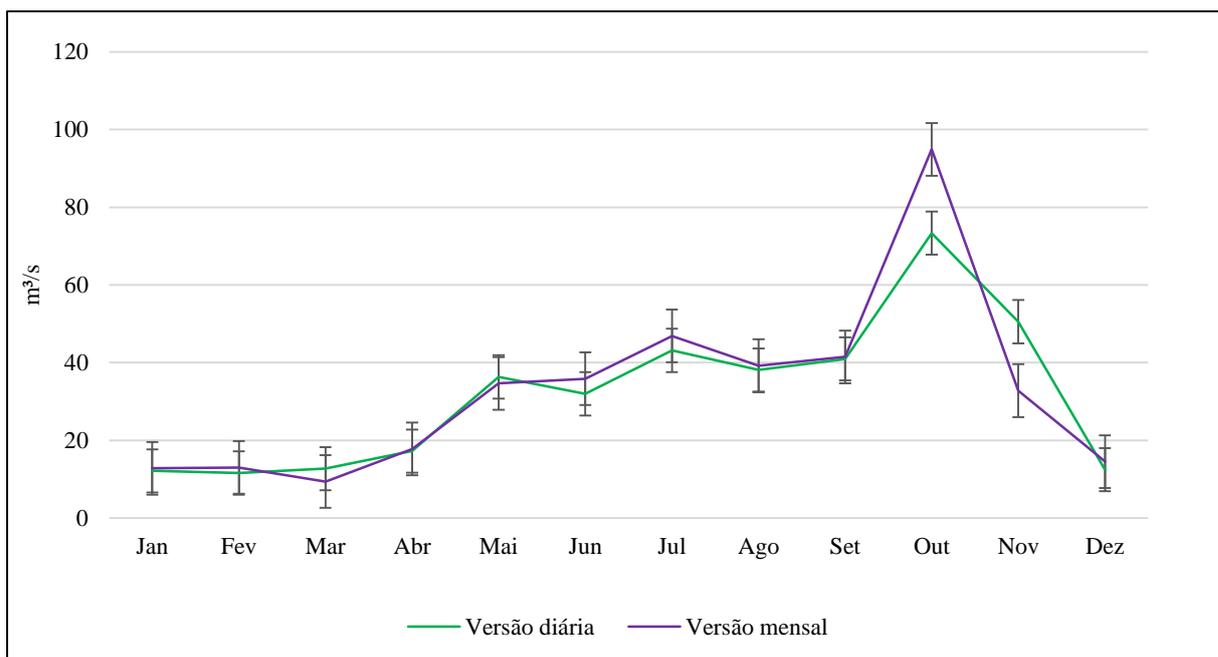
Na fase de calibração os modelos apresentaram maiores erros absolutos nos meses de outubro (21,55) e novembro (17,76), já a fase de validação apresentou maiores erros absolutos nos meses de setembro (11,31) e novembro (7,01). Comparando-se as duas fases a validação apresentou erro padrão de 1,78 e a calibração 8,32, demonstrando, novamente, que o aumento

do período estudado melhora a precisão do modelo quando comparado com a vazões observadas e, também, em relação as diferentes versões.

As Figura 28 e Figura 29 expõem as comparações apresentadas nas Tabela 8 e Tabela 9, respectivamente, destaca-se que as maiores discrepâncias ocorrem em meses que as médias de vazões são máximas, denotando, novamente, a sensibilidade da função-objetivo (RNSlog) às vazões mínimas.

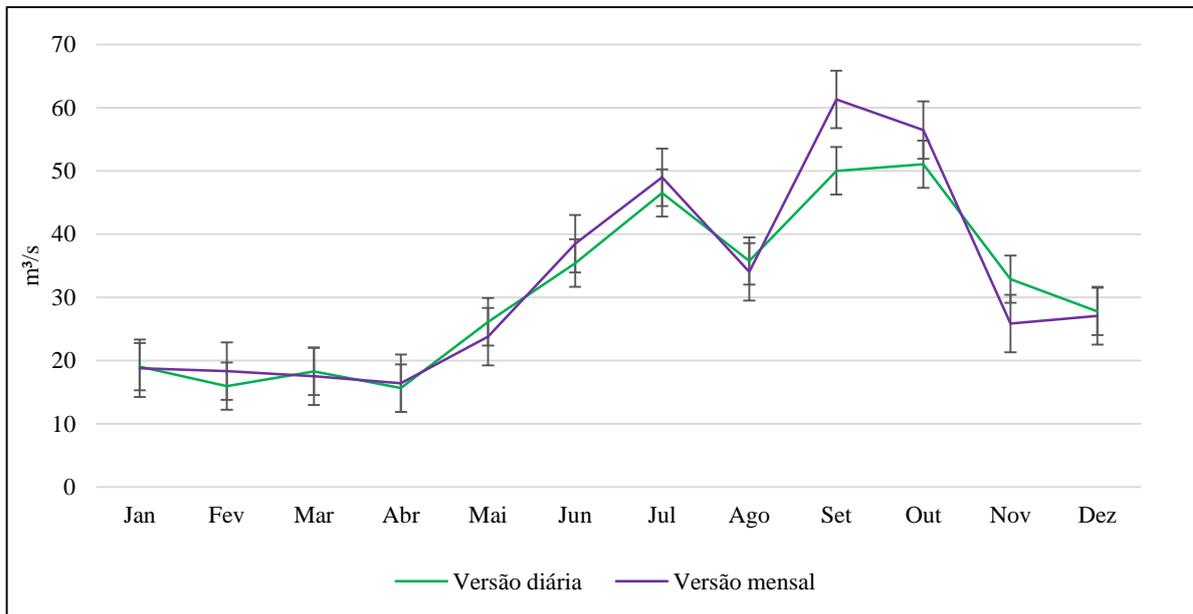
Os erros apresentados podem ser explicados por a versão diária e mensal terem funções de transferência diferentes o que acarreta em erros iniciais serem acumulados de forma distinta ao decorrer da modelagem. Outro motivo provável é que a versão diária utiliza os valores de vazão total diário, já a versão mensal utiliza a média da soma das vazões que ocorrem ao decorrer do mês estudado.

Figura 28 - Comparação gráfica entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de calibração utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do Autor (2019).

Figura 29 - Comparação gráfica entre média mensal histórica das vazões calculadas pela versão diária e mensal na fase de validação utilizando a função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo.



Fonte: do autor (2019).

Mesmo com os erros apresentados, os resultados são satisfatórios em ambas as versões podendo, assim, ser utilizado o SMAP para os mais diversos estudos na sub-bacia, como a estimativa de recarga subterrânea relacionada com a precipitação do período e a precipitação e a vazão calculada pelo modelo.

5.3 APLICAÇÕES

As aplicações foram divididas em dois grupos, primeiro utilizando os resultados do modelo diário validado através do coeficiente RNSlog e o segundo utilizando os resultados do modelo na versão mensal calibrado e validado através do coeficiente de RNSlog e o modelo mensal calibrado e validado através do coeficiente de RNS.

5.3.1 Versão Diária

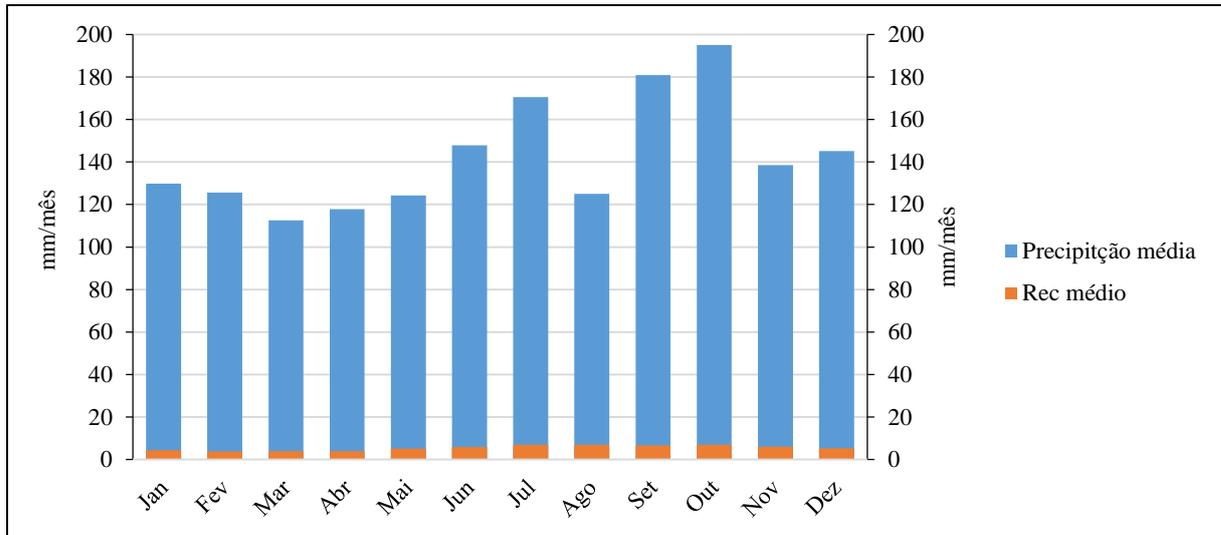
Os resultados satisfatórios possibilitaram relacionar os dados de precipitação médio mensal histórico versus a recarga subterrânea média mensal histórica para o período analisado, apresentado na Tabela 10 e na Figura 30. Os resultados demonstraram que agosto apesar de historicamente não ter as precipitações máximas anuais é o mês em que a recarga subterrânea atinge o maior valor de 5,63% da precipitação de 125,06 mm ocorrida no mês. Já o mês de fevereiro apresentou recarga de 3,00% de uma precipitação de 125,57 mm. A média para o período foi 3,87%, tendo em vista que os totais de precipitação e recarga são 18.842,00 mm e 729,59 mm, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.

	REC médio mm/mês	Precipitação média mm/mês	REC correspondente à precipitação
Janeiro	4,46	129,78	3,44%
Fevereiro	3,77	125,57	3,00%
Março	4,02	112,55	3,57%
Abril	4,00	117,77	3,40%
Mai	5,23	124,27	4,21%
Junho	5,89	147,82	3,99%
Julho	7,01	170,55	4,11%
Agosto	7,05	125,06	5,63%
Setembro	6,64	180,85	3,67%
Outubro	6,95	194,99	3,56%
Novembro	6,03	138,60	4,35%
Dezembro	5,27	145,08	3,64%
		Média	3,87%

Fonte: do autor (2019).

Figura 30 - Recarga gráfico subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.



Fonte: do autor (2019).

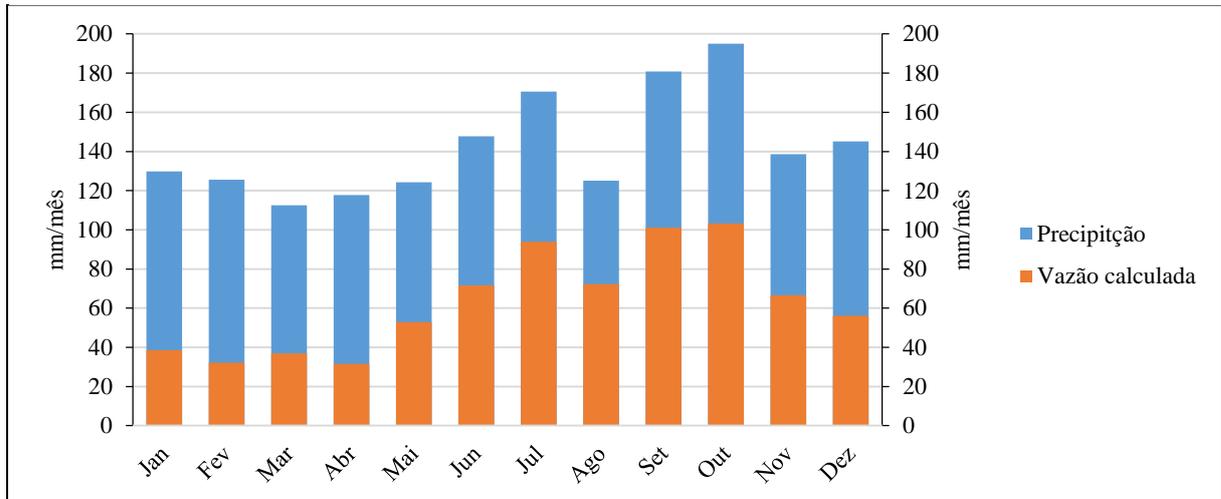
Outra análise a ser feita é a relação entre a precipitação ocorrida e a vazão calculada, Tabela 11 e Figura 31 apresentam as médias totais mensais históricas da precipitação e as médias totais mensais históricas da vazão calculada no exutório do trecho estudado.

Tabela 11 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.

Mês	Vazão calculada média mm/mês	Precipitação média mm/mês	Vazão correspondente à precipitação
Janeiro	38,49	129,78	29,66%
Fevereiro	32,25	125,57	25,68%
Março	36,99	112,55	32,86%
Abril	31,62	117,77	26,84%
Mai	52,84	124,27	42,52%
Junho	71,64	147,82	48,47%
Julho	94,04	170,55	55,14%
Agosto	72,30	125,06	57,81%
Setembro	101,15	180,85	55,93%
Outubro	103,28	194,99	52,97%
Novembro	66,50	138,60	47,98%
Dezembro	56,16	145,08	38,71%
Média			44,21%

Fonte: do autor (2019).

Figura 31 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão diária.



Fonte: do autor (2019).

O período mostra que em média 44,21% da precipitação ocorrida gerou a vazão calculada no exutório. Nota-se que agosto é o mês em que a relação entre precipitação e vazão atingiu o seu maior valor de 57,81%, já o mês de fevereiro apresentou a menor 25,69%.

5.3.2 Versão mensal

A versão mensal foi calibrada e validada por duas diferentes funções-objetivo, sendo assim para melhor compreender, os resultados foram divididos, primeiro utilizando a FO RNSlog e segundo utilizando a FO RNS.

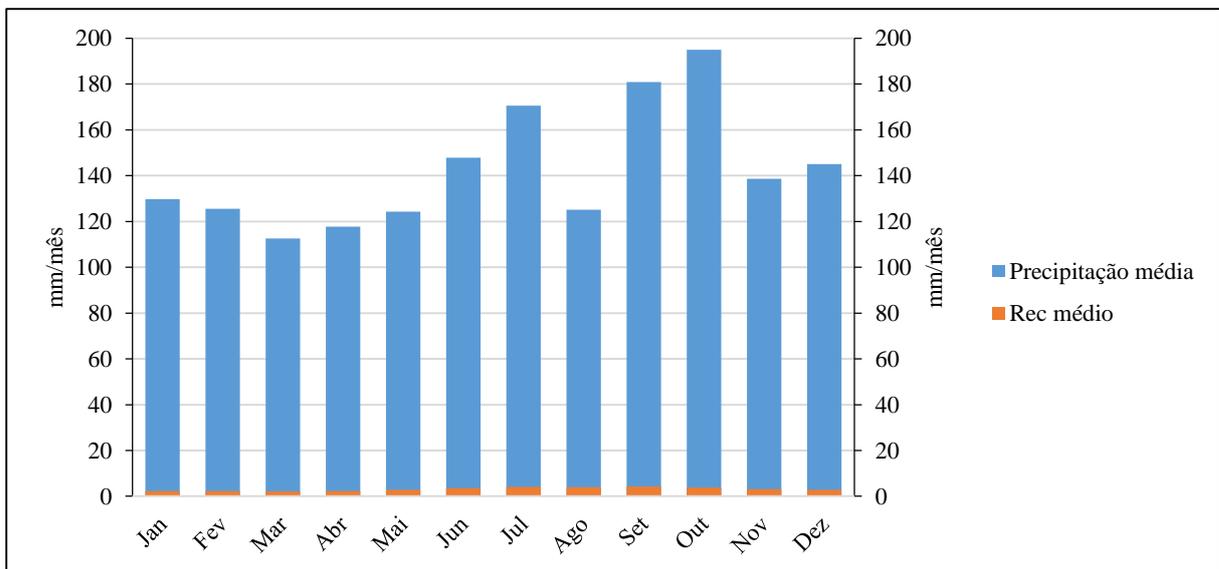
a. O modelo em sua versão mensal validado através da FO RNSlog gerou os resultados apresentados na Tabela 12 e na Figura 32. A média mensal histórica para o período foi 2,19%, o mês de agosto apresentou maior recarga alcançando 3,22% de uma precipitação de 125,06 mm e o mês que apresentou menor recarga foi o mês de fevereiro atingindo 1,80% de uma precipitação de 125,57 mm. A precipitação e recarga total do período foram 18842,00 mm e 413,10 mm, respectivamente.

Tabela 12 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.

Mês	REC média mm/mês	Precipitação média mm/mês	REC correspondente à precipitação
Janeiro	2,35	129,78	1,81%
Fevereiro	2,26	125,57	1,80%
Março	2,22	112,55	1,97%
Abril	2,23	117,77	1,89%
Mai	2,79	124,27	2,24%
Junho	3,53	147,82	2,39%
Julho	4,11	170,55	2,41%
Agosto	4,03	125,06	3,22%
Setembro	4,22	180,85	2,33%
Outubro	3,87	194,99	1,98%
Novembro	3,13	138,60	2,26%
Dezembro	2,82	145,08	1,95%
		Média	2,19%

Fonte: do autor (2019).

Figura 32 - Recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.



Fonte: do autor (2019).

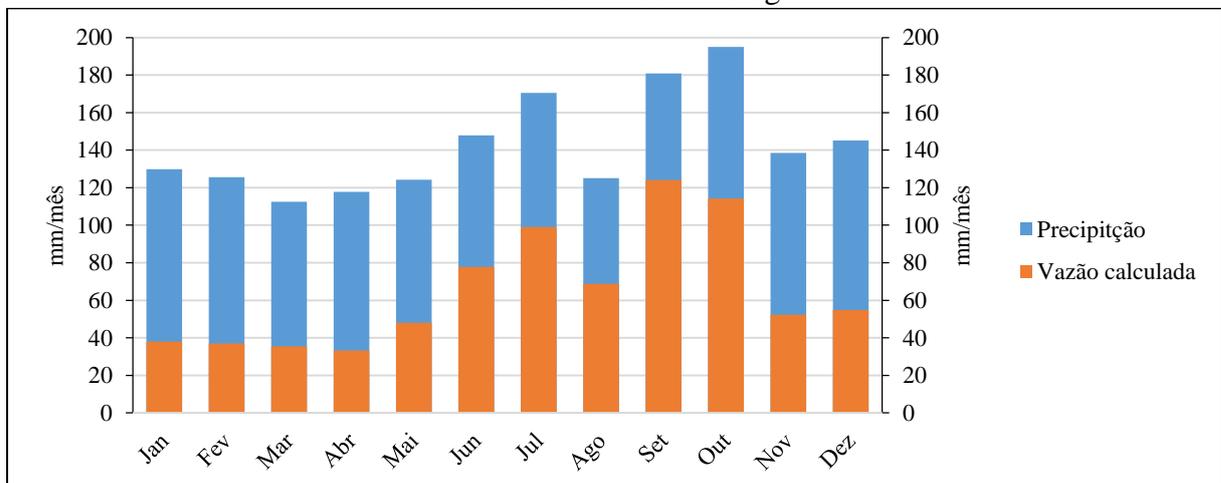
A vazão para o período apresentou média de 45,70% e os meses de setembro e abril apresentaram o maior valor (68,58%) e menor valor (28,17%), respectivamente, referente a vazão versus a precipitação. A Tabela 13 e a Figura 33, apresentam os valores completos para o período estudado.

Tabela 13 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNSlog.

Mês	Vazão calculada média mm/mês	Precipitação média mm/mês	Vazão correspondente à precipitação
Janeiro	37,99	129,78	29,28%
Fevereiro	37,04	125,57	29,50%
Março	35,41	112,55	31,46%
Abril	33,18	117,77	28,17%
Mai	48,09	124,27	38,70%
Junho	77,85	147,82	52,66%
Julho	99,05	170,55	58,07%
Agosto	68,81	125,06	55,02%
Setembro	124,02	180,85	68,58%
Outubro	114,20	194,99	58,57%
Novembro	52,32	138,60	37,75%
Dezembro	54,79	145,08	37,77%
		Média	43,79%

Fonte: do autor (2019).

Figura 33 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal utilizando RNSlog.



Fonte: do autor (2019).

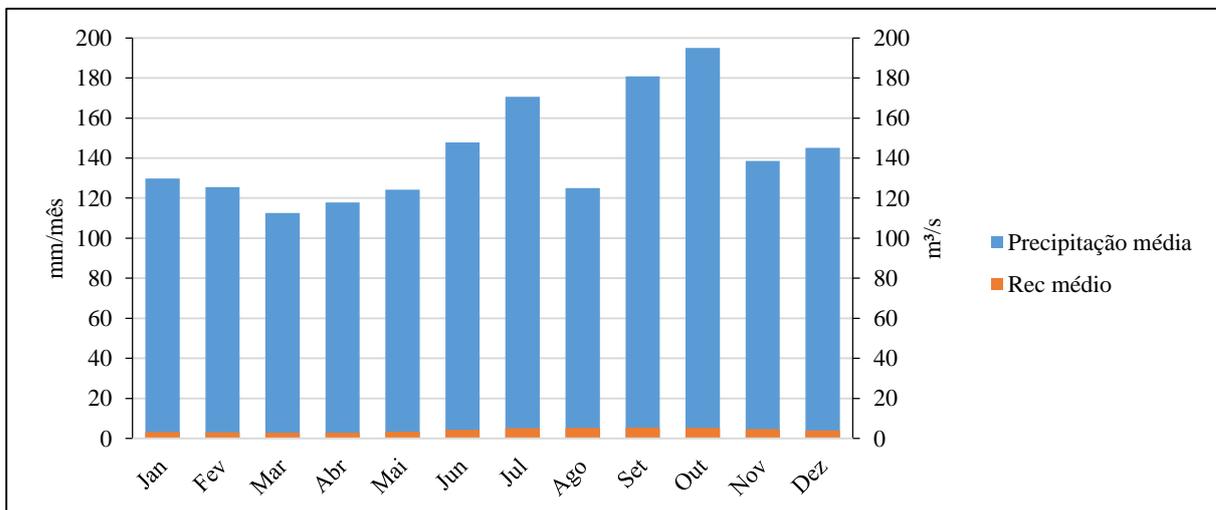
b. O modelo mensal validado através do coeficiente RNS gerou resultados diferentes de recarga subterrânea mostrados na Tabela 14 e na Figura 34. A média de recarga para o período foi de 2,91%, o mês de agosto, novamente, apresentou maior recarga alcançando 4,26% de uma precipitação de 125,06 mm e o mês de fevereiro apresentou a menor recarga 2,42% de uma precipitação de 125,57 mm.

Tabela 14 - Resultados da recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS.

Mês	REC médio mm/mês	Precipitação média mm/mês	REC correspondente à precipitação
Janeiro	3,29	129,78	2,53%
Fevereiro	3,04	125,57	2,42%
Março	2,93	112,55	2,60%
Abril	2,90	117,77	2,46%
Mai	3,41	124,27	2,74%
Junho	4,27	147,82	2,89%
Julho	5,15	170,55	3,02%
Agosto	5,32	125,06	4,26%
Setembro	5,48	180,85	3,03%
Outubro	5,35	194,99	2,74%
Novembro	4,66	138,60	3,36%
Dezembro	3,97	145,08	2,73%
		Média	2,91%

Fonte: do autor (2019).

Figura 34 - Recarga subterrânea média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS



Fonte: do autor (2019).

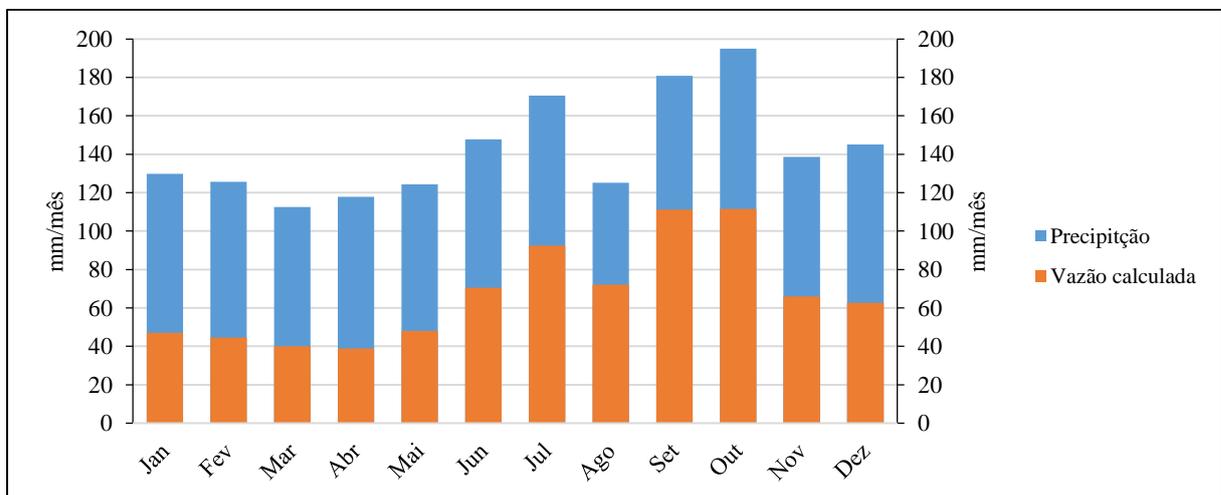
As vazões calculadas versus a precipitação ocorrida são apresentados na Tabela 15 e Figura 35, onde o média mensal histórica foi 46,97%, tendo o mês de setembro maior relação atingindo 61,46% de uma precipitação de 180,85 mm/mês e o mês de abril 32,97% de uma precipitação de 117,77 mm/mês.

Tabela 15 - Resultados da vazão calculada média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal validada através da FO RNS.

Mês	Vazão calculada média mm/mês	Precipitação média mm/mês	Vazão correspondente à precipitação
Janeiro	47,03	129,78	36,24%
Fevereiro	44,45	125,57	35,40%
Março	40,12	112,55	35,64%
Abril	38,83	117,77	32,97%
Mai	48,07	124,27	38,68%
Junho	70,46	147,82	47,67%
Julho	92,47	170,55	54,22%
Agosto	72,06	125,06	57,62%
Setembro	111,15	180,85	61,46%
Outubro	111,48	194,99	57,17%
Novembro	65,91	138,60	47,56%
Dezembro	62,60	145,08	43,15%
		Média	46,97%

Fonte: do autor (2019).

Figura 35 - Vazão média mensal histórica versus precipitação para o modelo em sua versão mensal utilizando RNS.



Fonte: do autor (2019).

Os valores de recarga subterrânea tanto para a versão diária quanto para mensal se mostraram baixos quando comparados com estudos feitos em bacias próximas a área estudada, como apresentado por Bortolin et al. (2017) em que encontrou valor de 19,62% de média anual da recarga para uma sub-bacia introduzida, também, na bacia Rio Taquari-Antas. Isso se deve aos valores de Crec calibrados pelo modelo serem baixos em ambas as versões, visto que esse parâmetro está intimamente relacionado ao cálculo da recarga subterrânea.

A comparação entre os resultados das aplicações podem ser analisados entre a versão diária e mensal validado pela mesma função-objetivo, nesse caso o coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo.

Esses resultados apresentaram diferenças tanto na recarga subterrânea quanto na vazão calculada quando relacionados com a precipitação ocorrida, denotando novamente uma falha talvez do modelo em si, dos parâmetros de entrada (característicos da bacia) e/ou calibrados ou os dados de entrada do modelo (precipitação, evapotranspiração e vazão).

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou a calibração e validação de um trecho da sub-bacia Rio Carreiro através do modelo matemático hidrológico precipitação-vazão SMAP em sua versão diária e mensal utilizando diferentes funções-objetivo.

Os resultados apresentados demonstraram que o modelo calibra e valida de forma satisfatória através da função-objetivo Nash-Sutcliffe do logaritmo (sensível às vazões mínimas) a versão diária e mensal, e através da função-objetivo Nash-Sutcliffe (sensível às vazões máximas) a versão mensal. Mesmo tendo valores de coeficiente próximos o modelo em ambas versões demonstrou maior sensibilidade quando estudados períodos maiores, nesse caso na fase de validação, apresentando erros menores ao se comparar as vazões calculadas na versão diária e mensal.

Inconsistências encontradas ao longo da modelagem podem ser ligadas às limitações do modelo que não leva em consideração mudanças ocorridas ao longo do período modelado, como de solo, uso e relevo. A escassez de dados (precipitação e evapotranspiração), também é um fator determinante para uma eficaz modelagem, tendo em vista que para esse estudo a chuva foi retirada de um posto pluviométrico fora da região da sub-bacia e para a evapotranspiração foi utilizado o método Thornthwaite-Camargo, método menos completo quando comparado com o Penman-Monteith.

Mesmo apresentando erros foi possível aplicar os resultados e determinar a relação entre a precipitação ocorrida com a recarga subterrânea e vazão calculada, resultados importantes para o manejo consciente e futuros projetos relacionados com o rio Carreiro e utilização da água do aquífero da região.

Tendo em vista os erros encontrados e as dificuldades identificadas ao longo do trabalho, abaixo são enumeradas recomendações para trabalhos futuros.

1. Utilizar mais postos pluviométricos, assim podendo homogeneizar melhor as precipitações que ocorrem na sub-bacia.
2. Utilizar o método de Penman-Monteith para determinação da evapotranspiração, tendo em vista que é considerado um método mais completo e que utiliza mais informações para o cálculo da ETP.
3. Fazer um detalhamento mais minucioso da região determinando as características do solo bem como diferentes ocupações encontrados ao longo da área estudada.
4. Estudar períodos maiores tanto para a calibração quanto para validação, bem como modelar toda a área que a sub-bacia Rio Carreiro abrange.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, K. N. et al. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p.999-1007, jun. 2015. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/156/b8a64474d6220a2218e1575774de5c94_2ff93b824084515ac727e49d7d740b68.pdf>. Acesso em: 27 out. 2018.
- ALMEIDA, I. D. de et al. Otimização de parâmetros de modelo hidrológico usando pesquisa harmônica. **Geociências**. v.35, n.1, p.149-156, 2016. Disponível em: <https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/35/volume35_1_files/35-1-artigo-12.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2018
- ARAÚJO, C. E. S. et al. Caracterização dos aquíferos da bacia do Rio Siriri e estimativa de recarga subterrânea com os modelos WEAP e SMAP. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 1, 2009, São Paulo. **Congresso**. São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2009. p. 1 - 20. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22070/14432>>. Acesso em: 7 out. 2018.
- Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé**. 1ª edição. Nova Tríade do Brasil Ltda. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1460067952.pdf>>. Acesso em: 5 mai 2019.
- AVELINO, P. H. M. **Análise geo-ambiental multitemporal para fins de planejamento ambiental: um exemplo aplicado à bacia hidrográfica do rio Cabaçal, Mato Grosso - Brasil. 2006**. p. 236. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de geociências pós-graduação em geografia, 2006. Disponível em <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp074722.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.
- BABAK, O.; DEUTSCH, C. V.; Statistical approach to inverse distance interpolation. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. Canada. v.23, p.543-553, julho 2009. Acesso em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-008-0226-6>>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, ISSN 1808 - 0251, Guarapuava, v. 4, n. 1, p.131-149, nov. 2008. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/294/1892>>. Acesso em: 3 set. 2018.
- BERTONI, J. C., TUCCI, C. E. M. Precipitação. In TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2009. 2, p. 35-51.
- BORTOLIN, T. A. et al. Análise de diferentes funções-objetivo na calibração do modelo chuva-vazão SMAP. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis, 2017. ABRH. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173868>>. Acesso em: 20 abr 2019.

BORTOLIN, T. A. et al. Estimativa de recarga aquífera em uma bacia do sistema aquífero serra geral utilizando o modelo SMAP. **Congresso ABES FENAVAN**. São Paulo. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321106939_ESTIMATIVA_DE_RECARGA_AQUIFERA_EM_UMA_BACIA_DO_SISTEMA_AQUIFERO_SERRA_GERAL_UTILIZANDO_O_MODELO_SMAP>. Acesso em: 25 mai 2019.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B.; Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v. 21, n. 1, p-53-64, jan. 2016. Disponível em: <https://abr.h.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/188/f2bc4abfc9bdcc5dd3fceaf46d47956b_61900ed53ce4c6da707f5e75673d04a2.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2018.

BUCHIANERI, V. C.; **Geração da série histórica de vazão por meio do Modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-14072004-165104/.../viviane.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; **Apostila de Hidrologia**. 2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Capa.pdf>>. Acesso em 09 nov. 2018.

CARVALHO, S. M; STIPP, N. A. F. **Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa**. **Geografia**, ISSN 0102-3888, Londrina, v. 13, n. 1, p.57-71, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/6790/6112>>. Acesso em: 12 set. 2018.

CASTANHARO, G. 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**, Curitiba, v. 12, n. 3, p.57-68, 09 ago. 2007. Disponível em: <https://abr.h.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/18/5ae44aa3bf5c6c1aa5df923fb4605c94_3862d994fda8fb9cc96219e0c09ddf68.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

CASTRO, N. R. P. S. et al. REVISTA UNIARA, n.20, 2007. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Uniara**, Araraquara, v. 11, n. 20, p.136-156, jan. 2007. Disponível em: <https://www.uniara.com.br/legado/revistauniara/pdf/20/RevUniara20_11.pdf>. Acesso em: 05 set. 2018.

CAVALCANTE, Nelson Bernardo Rodrigues. **Modelagem hidrológica chuva- vazão e aferição de garantia física de uma central geradora hidrelétrica no Rio Santana - RJ**. 2017. 116 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019331.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2018.

Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED-RS). Disponível em: <<http://mapa-taquari.ufrgs.br/>>.

CHEVALLIER, P.; Aquisição e processamento de dados. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2009. 2, p. 35-51.

COLLINSCHONN, W. et al. Modelo Hidrológico Distribuído para Previsão de Vazões Incrementais na Bacia do Rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.12, n.3, p.43-55, dez. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238745322_Modelo_Hidrologico_Distribuido_para_Previsao_de_Vazoes_Incrementais_na_Bacia_do_Rio_Paranaiba_entre_Itumbiara_e_Sao_Si_mao>. Acesso em 05 nov. 2018.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; **Introduzindo Hidrologia** - apostila de aula. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/crfj/Pos/Hidrologia/apostila_Completa_2008.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.

COLLINSCHONN, W.; TUCCI, C. E. M; Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 8, n. 3, p.27-39, julho 2003. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/35/105d22f1b90dd6e2f7e0464fb9996726_447f7ba4c53bfe949202501ed0e31335.pdf>. Acesso em 01 nov. 2018.

CUNHA, S. F. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p.837-848, jun. 2015. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/156/3b19fed36cf52712e217179a3483b424_fdc662cf56145d1962c8b009e5280268.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.

DANTAS, A. M. N. et al. **Aplicação do modelo Thornthwaite-Camargo para evapotranspiração potencial em quatro cidades paraibanas**. III Workshop Internacional sobre água no Semiárido Brasileiro. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/revistas/aguanosemiarido/trabalhos/TRABALHO_EV079_MD4_SA1_ID316_14092017215255.pdf>. Acesso em: 02 jun 2019.

DE PAIVA, E. M. C. D. Taxa de infiltração em pequena bacia suburbana. In: **Congresso latino-americano de hidráulica São Pedro, Estado de São Paulo**, 21. 2004. Santa Maria, 2004. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/iurh/index.php/trabalhos?download=36:meller-paiva-paiva-e-paiva&start=20>>. Acesso em: 10 out. 2018.

DHI WORLDWIDE. Kobling af grundvandsmodellen med den regionale klimamodel. Disponível em: <<https://worldwide.dhigroup.com/presences/emea/denmark/news/2015/2/kobling-af-grundvandsmodellen-med-den-regionale-klimamodel>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista brasileira de recursos hídricos**. Porto Alegre. v. 19, n.1,

p.243-254, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/161/170c7ff9bc41f7f845e3bd393b13e7a9_f87a7958332fa277d40514f40c46809a.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2018.

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. 3, n. 21, p.556-569, abr. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbrh/v21n3/2318-0331-rbrh-21-3-556.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

FERNANDES, D. S. et al. **Evapotranspiração - Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos**. Santo Antônio de Goiás, GO. Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 44p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/879913/evapotranspiracao-uma-revisao-sobre-os-metodos-empiricos>>. Acesso em: 14 out. 2018.

FERREIRA, M. M.; REIS, J. A. T.; MANDONÇA, A. S. F. Estimativas de vazões máximas para cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim. **Ciatec**, Passo Fundo, v. 1, n. 7, p.67-78, jun. 2015. Disponível em: <seer.upf.br/index.php/ciatec/article/download/4217/3418>. Acesso em: 2 out. 2018.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed., rev. e atual. São Paulo: E. Blücher, 1988. 291 p.

GENOVEZ, A. M. Vazões Máximas. In PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. [14], 625 p.

GENZ, F.; LESSA, G. C.; CIRANO, M.; Vazão Mínima para Estuários: Um Estudo de Caso no Rio Paraguaçu/BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Bahia, v. 13, n. 3, p.73-82, jul. 08. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/14/a7f66c99aad323b5e031a87058f1b745_4f737c71d31c178627b60f6615bc151c.pdf>. Acesso em: 22 out. 2018.

GONÇALVES, J. E.; SILVEIRA, R. B. Análise de Alterações em Componentes de um Método de Calibração Automática Mono-Objetivo na Qualidade e Eficiência do Ajuste de Parâmetros do Modelo Sacramento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Curitiba, v. 16, n. 2, p.89-100, abr. 2011. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/3/51fc530ba04bb3a583233a02bf2eb9d5_d74ed4ddb11c40847f2c63fb89db537b.pdf>. Acesso em: 24 out. 2018.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C.; Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.12, n.3, p.13-20. julho 2007. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursosohidricos/2007/vol12/no3/2.pdf>>. Acesso em: 07 jun 2019.

GOODCHILD, M. F.; **The State of GIS for Environmental Problem-Solving**. Disponível em: <<http://www.geog.ucsb.edu/~good/papers/193.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

LESSA, L. G. F. et al. Modelo hidrológico SWAT na determinação das perdas de solo na bacia hidrográfica do Rio Pardo - Botucatu / SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n. 3, p.170-178, jul. 2013. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/viewFile/672/845>>. Acesso em: 27 out. 2018.

LIMA, W. P. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas - apostila de aula. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba. São Paulo. 2008. Disponível em: <<http://www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf>>. Acesso em: 05 de set. 2018.

LOPES, J. E. G.; **Apostila Modelo SMAP**. 1999. Disponível em: <http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acesso em: 12 out. 2018.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <www.coc.ufrj.br/en/documents2/mestrado/2010-2/1282-rodrigo-furtado-lou.../file>. Acesso em: 02 out. 2018.

MACHADO, R. E; VETTORAZZI, C. A; CRUCIANI, D. E. Simulação de Escoamento em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Piracicaba, v. 8, n. 1, p.147-155, nov. 2002. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/37/d381fd1f8014af83dee339810ad0e459_cface22597be53aeb056e7d77f15949b.pdf>. Acesso em: 15 out. 2018.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Ambiente e Água**, ISSN 1980-993, Itajubá, v. 13, n. 1, p.1-9, jan. 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v13n1/1980-993X-ambiagua-13-01-e1906.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2018.

MARTINI, E. A.; **Aplicação do modelo SMAP para avaliação de impactos de mudanças climáticas: um estudo de caso para a Bacia de Camargos (MG)**. 2015. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013556.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

MARTINS, J.A. **Evaporação e transpiração**. In PINTO, Nelson L. de Sousa. **Hidrologia básica**. São Paulo: E. Blücher, 1976. 278 p.

MATA-LIMA, H.; Evaluation of the objective functions to improve production history matching performance based on fluid flow behaviour in reservoirs. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. Portugal. v. 78, p.42-53. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410511001136>>. Acesso em 10 nov. 2018.

MIRANDA, A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; DA SILVA, D. F. **Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos.** *Geo Uerj*, ISSN 1981-9021, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p.109-119, jul. 2010. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MOCKUS, V.; **Hydrologic Soil Groups.** Capítulo 07. National Engineering Handbook. 2009.

MOLINARI, D. C.; VIEIRA, A. F. G. Considerações preliminares sobre a capacidade de infiltração de água no solo no distrito industrial II - Manaus (AM). In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 5. 2004, Manaus. **Simpósio** Santa Maria: ICLH, 2004. p. 1 - 16. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/5/5/Deivison%20Carvalho%20Molinari.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2018.

MOREIRA, I. A.; MINE, M.; PEREIRA F.; Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. *Ingenieria del Agua*, Valencia, v. 14, n. 2, p.83-96, mar. 2007. Disponível em: <<https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2904/2907>>. Acesso em: 01 out. 2018.

MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers.** v.50, n.3, p.885-900. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 03 jun 2019.

MÜHLENHOFF, A. P. et al. Avaliação do desempenho de diferentes funções-objetivo na calibração automática do Modelo Hidrológico Sacramento. In: **xxi simpósio brasileiro de recursos hídricos**, 21, 2015, Brasília. Curitiba: ABRH, 2015. p. 1 - 8. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-372_avaliao-do-desempenho-de-diferentes-funcoes-objetivo-na-calibracao-automatica-do-modelo-hidrologico-sacramento>. Acesso em: 30 out. 2018.

NETO, K. R. **Atualização de modelos chuva-vazão- propagação com estimadores de estado.** 2005. 286 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/098-Ricardo_Krauskopf_Neto.pdf>. Acesso em: 02 out. 2018.

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. 2014. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2948/2453>>. Acesso em: 15 out. 2018.

OLIVEIRA, L. F. C. et al. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p.1186-1192, ago. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n11/v14n11a08.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2001. [14], 625 p.

PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z.; SILVA, R. M.; **Evapotranspiração** - apostila de aula de Hidrologia Aplicada. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo. 2003. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3863>. Acesso em: 01 out. 2018.

PAÇO, N. M. S. **Estabelecimento de Hidrogramas Unitários**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137855364/Tese_final.pdf>. Acesso em: 09 out. 2018.

PINTO, J. A. de O. **Avaliação de métodos para a regionalização de curva de permanência de vazões para a bacia do Rio das Velhas**. 2006. 242 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2006.

PINTO, Nelson L. de Sousa. **Hidrologia básica**. São Paulo: E. Blücher, 1976. 278 p.

PONCE, V. M.; **Engineering Hydrology: Principles and Practices**. 1989. Hardbound. Disponível em: <<http://ponce.sdsu.edu/textbookhydrology/chapters.html>>. Acesso em: 16 jun 2019.

RAMPINELLI, C. G.; COSTA, M. G. Calibração do modelo chuva-vazão SMAP em uma estação do Seminário Nordestino com os algoritmos PSO, AG e Nelder MEAD e seus efeitos na definição das séries de vazões médias mensais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 2015, Brasília. **Simpósio**. Brasília: Abrh, 2015. p. 1 - 8. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-441_calibracao-do-modelo-chuva-vazao-smap-em-uma-estacao-do-semiarido-nordestino-com-os-algoritmos-psy-ag-e-nelder-mead-e-seus-efeitos-na-definicao-das-series-de-vazoes-medias-mensais>. Acesso em: 10 out. 2018.

RIO GRANDE DO SUL. **Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/g040-bacia-hidrografica-do-rio-taquari-antas>>. Acesso em 10 nov. 2018.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V.; Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental- Relatório Técnico. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.

SALGUEIRO, J. H. P. de B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico. **Tecnologia**, ISSN: 2318-0730, Fortaleza, v. 29, n. 2, p.174-185, dez. 2008. Disponível em: <<http://periodicos.unifor.br/tec/article/view/27/4489>>. Acesso em: 25 set. 2018.

SANTANA, D. P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas. Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/docume30ID-TUSBRYuXa7.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257875/1/Sartori_Aderson_M.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M.; Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v. 10, n. 4. p. 05-18. Out. 2005. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2005/vol10/no4/1.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

SANTOS, L. M. et al. Desenvolvimento de uma aplicação web para estimativa de evapotranspiração potencial por diferentes métodos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE, 14., 2018, Maceió. **Simpósio**. Maceió: Abrh, 2018. p. 1 - 9.

SEDKI, A.; OUAZAR, D.; MAZOUNDI, E. E.; Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall–runoff forecasting. **Elsevier**. v. 36, n. 1, p.4523-4527, abr. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741740800225X>>. Acesso em: 10 abr 2019.

SHINMA, T. A.; **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18072011-135212/pt-br.php>>. Acesso em: 29 out. 2018.

SILVEIRA, A. L. L.; DESBORDES, M. Modelo hidrológico distribuído urbano com poucos parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 1, p.35-48, jan. 1999. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/arroiodiluvio/conteudo-antigo/copy_of_sobre-o-arroio-diluvio/modelo.pdf>. Acesso em: 09 out. 2018.

SILVEIRA, A. L.L. Ciclo Hidrológico e a bacia hidrográfica. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2009. 2, p. 35-51.

SILVEIRA, A. L.L.; LOUZANA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e armazenamento no solo. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2009. 9, p. 335-372.

TUCCI, C. E. M.. Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p.195-199, mar. 2003. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/arroiodiluvio/conteudo-antigo/copy_of_sobre-o-arroio-diluvio/parametros.pdf>. Acesso em: 15 out. 2018.

TUCCI, C. E. M.; UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGRAW-Hill do Brasil, 1975. 245p

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais.

Revista Adm. Pub., Rio de Janeiro, p. 5-18, abr./jun. 1993. Disponível em:

<<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rap/article/viewFile/8663/7394>>. Acesso em: 22 nov. 2018.