



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO KEVIN PERES MOURÃO**

**MODELAGEM HIDROLOGICA USANDO O MÓDULO SMA DO HEC-HMS NA  
REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

**CRATEÚS**  
**2022**

ANTONIO KEVIN PERES MOURÃO

**MODELAGEM HIDROLOGICA USANDO O MÓDULO SMA DO HEC-HMS NA  
REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

CRATEÚS

2022

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

---

M89m Mourão, Antonio Kevin Peres.  
Modelagem hidrológica usando o módulo sma do hec-hms na região hidrográfica dos sertões de crateús /  
Antonio Kevin Peres Mourão. – 2022.  
52 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

1. Modelagem hidrológica. 2. HEC-HMS. 3. SMA. I. Título.

CDD 620

---

ANTONIO KEVIN PERES MOURAO

**MODELAGEM HIDROLOGICA USANDO O MÓDULO SMA DO HEC-HMS NA  
REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Débora Mithya Barros Alexandre  
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH)

A Deus.

Aos meus pais, Celene e Sandro. Vocês são  
minha razão para continuar a perseverar.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar e permitir avançar mais um degrau.

Ao meu orientador, professor Alan Michell, pela excelente orientação e todos os ensinamentos que levarei para vida. Agradeço bastante pela sua paciência e compromisso.

Aos professores participantes da banca examinadora Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita e Profa. Dra. Débora Mithya Barros Alexandre pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos amigos que fiz e as amizades antigas que foram ainda mais fortalecidas, que direta ou indiretamente me ajudaram durante esse trabalho.

## RESUMO

Estimativas de vazões em bacias hidrográficas baseadas em dados de precipitação pluviométrica são extremamente importantes para atividades relacionadas à gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, vê-se que existe a necessidade de um maior levantamento de dados, e que esta é uma das maiores limitações a utilização de modelos mais complexos, uma vez que esses modelos ainda são pouco difundidos no semiárido nordestino. Assim, o trabalho tem como objetivo analisar a acurácia do modelo *Soil Moisture Account* (SMA) do *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) na produção de séries pseudo-históricas de vazão. Neste trabalho, o enfoque ocorreu na calibração dos parâmetros do modelo de forma manual e automática, usando funções objetivo para analisar o acerto entre as séries calculadas e observadas. Para tanto, o programa utilizado, HEC-HMS, que é um software que foi desenvolvido e projetado para simular os processos hidrológicos de bacias hidrográficas, foi responsável por projetar os hidrogramas de vazões. Uma análise de sensibilidade dos parâmetros foi realizada e foi exposto graficamente como sua variação interfere no valor de *Nash-Sutcliffe*. O estudo foi localizado na região dos sertões de Crateús, em especial na bacia 34750000, onde foram retirados dados fluviométricos. Um conjunto de postos pluviométricos foram utilizados como entrada de dados de precipitação no programa. Esses dados foram tratados e usados na elaboração da média observada pelo método de Thiessen. Dentre os inúmeros modelos utilizados na engenharia, o modelo utilizado nesse trabalho se trata de um modelo contínuo, que é caracterizado por simular eventos de longos períodos. Este tipo de modelo deve considerar algum tipo de acumulação no nível do solo. Além disso, o modelo de distribuição da bacia 34750000 utilizado foi concentrado. O modelo apresentou valores satisfatórios seguindo os critérios de Nash para a região de estudo na fase de calibração ( $NS = 0,51$ ) e na fase de validação ( $NS = 0,42$ ). A análise dos hidrogramas mostram que existe uma boa correlação entre as funções objetivo utilizadas e possuem bom desempenho na determinação de séries de vazões sintéticas. Os resultados foram posteriormente comparados com os resultados de Rosa (2019) que calibrou e validou o modelo SMAP para região hidrográfica dos sertões de Crateús. Desse modo, o modelo SMA demonstrou ser uma ferramenta importante que pode ajudar no planejamento dos recursos hídricos no semiárido brasileiro.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Soil Moisture Account. HEC-HMS. Região hidrográfica dos Sertões de Crateús.

## ABSTRACT

Estimates of flow in watersheds based on rainfall data are extremely important for activities related to water resources management. Thus, it can be seen that there is a need for greater data collection, and that this is one of the biggest limitations to the use of more complex models, since these models are still not widespread in the northeastern semi-arid region. Thus, the objective of this work is to analyze the accuracy of the Soil Moisture Account (SMA) model of the Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) in the production of pseudo-historical flow series. In this work, the focus was on the calibration of the model parameters manually and automatically, using objective functions to analyze the accuracy between the calculated and observed series. Therefore, the program used, HEC-HMS, which is a software that was developed and designed to simulate the hydrological processes of watersheds, was responsible for designing the flow hydrographs. A sensitivity analysis of the parameters was performed and graphically exposed how their variation interferes with the Nash-Sutcliffe value. The study was located in the Crateús sertões region, especially in the 34750000 basin, where fluvioimetric data were taken. A set of rainfall stations were used as input for rainfall data in the program. These data were treated and used in the elaboration of the mean observed by the Thiessen method. Among the numerous models used in engineering, the model used in this work is a continuous model, which is characterized by simulating events over long periods of time. This type of model must consider some type of accumulation at ground level. In addition, the 34750000 basin distribution model used was concentrated. The model presented satisfactory values following the Nash criteria for the study region in the calibration phase and in the validation phase. The analysis of the hydrographs show that there is a good correlation between the objective functions used and they have a good performance in the determination of synthetic flow series. The results were later compared with the results of Rosa (2019) who calibrated and validated the SMAP model for the hydrographic region of the sertões of Crateús. In this way, the SMA model proved to be an important tool that can help in the planning of water resources in the Brazilian semi-arid region.

**Keywords:** hydrological modeling. Soil Moisture Account. HEC-HMS.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Layout do HEC-HMS .....	18
Figura 2 - Fases de cálculo do HEC-HMS .....	19
Figura 3 - Diagrama esquemático do modulo SMA no HEC-HMS. ....	21
Figura 4 - Estimativa do armazenamento dossel de interceptação .....	23
Figura 5 - Estimativa do armazenamento da superfície .....	23
Figura 6 - Estimativa dos Parâmetros do modelo SMA em função do tipo de solo (SCS).....	23
Figura 7 - Estimativa da Taxa de Percolação do solo .....	24
Figura 8 - Regiões hidrográficas do Estado do Ceará .....	26
Figura 9 – Disposição espacial das estações pluviométricas utilizadas no Thiessen .....	27
Figura 10 - Layout do HEC-DSSvue.....	31
Figura 11 – Metodologia de cálculo para parametrização do SMA .....	32
Figura 12– Estatísticas das séries de vazões do modelo SMAP mensal e SMA mensal.....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição temporal da ETP na bacia hidrográfica dos sertões de Crateús .....	30
Gráfico 2- Sensibilidade dos parâmetros .....	37
Gráfico 3- Variação de NASH para parâmetros de menor sensibilidade .....	38
Gráfico 4- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de fevereiro de 1964 a dezembro de 1986 na fase de calibração do SMA. ....	40
Gráfico 5- Hidrograma da vazão simulada e observada mensal e hietograma da precipitação média mensal observada para o período de fevereiro de 1964 a dezembro de 1985 na fase de calibração do SMA. ....	41
Gráfico 6- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1986 a janeiro de 1988 na fase de validação do SMA. ....	42
Gráfico 7- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1986 a janeiro de 1988 na fase de validação mensal do SMA. ....	43
Gráfico 8- Hidrograma de vazões calculadas e observadas para estação 34750000 .....	44
Gráfico 9- Hidrograma de vazões calculadas e observadas para estação 34750000.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores estimados dos Parâmetros do SMA. ....	24
Tabela 2 - Estações pluviométricas utilizadas para realização do Thiessen.....	28
Tabela 3 - Características do Posto Pluviométrico Fazenda Boa Esperança .....	28
Tabela 4 - Características fisiográficas da estação Fazenda Boa Esperança.....	29
Tabela 5 - Evapotranspiração potencial da bacia dos sertões de Crateús.....	29
Tabela 6 - Parâmetros calibrados do modelo hidrológico SMA. ....	39
Tabela 7 - Eficiência da modelagem do SMA.....	39
Tabela 8 – Eficácia da modelagem do SMA na escala Mensal.....	42
Tabela 9 – Calibração dos parâmetros com as funções objetivo.....	44
Tabela 10 – Parâmetros ótimos na calibração do SMA de acordo com as funções objetivo e seus equivalentes para a estação 34750000.....	45
Tabela 11 – Comparação do melhor resultado para cada função objetivo .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DSS	<i>Data Storage System</i>
EAM	Erro Absoluto Médio
ET	Evapotranspiração
FO	Função Objetivo
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
PBIAS	Tendência Percentual
RHSC	Região hidrográfica dos sertões de Crateús
RH	Região hidrográfica
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
SMA	<i>Soil Moisture Accounting</i>
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
RMSE	Erro Quadrático Médio
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NS	Nash-Sutcliffe
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Contextualização .....	12
1.2	Justificativa .....	13
1.3	Objetivos.....	14
1.4	Roteiro Temático.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1	Modelagem Hidrológica .....	15
2.2	Modelos Chuva-vazão .....	16
2.3	HEC-HMS .....	17
2.3.1	<i>Passo a passo do HEC-HMS.....</i>	<i>18</i>
2.4	SOIL MOISTURE ACCOUNTING (SMA).....	20
2.4.1	<i>Estimativa dos parâmetros do SMA.....</i>	<i>22</i>
3	MÉTODO DE PESQUISA .....	25
3.1	Tipo de Pesquisa .....	25
3.2	Área de Estudo.....	25
3.3	Levantamento de Dados.....	26
3.4	Data Storage System (DSS) .....	30
3.5	Modelagem do Sistema Chuva – Vazão (SMA) .....	31
3.6	Análise da eficiência da modelagem hidrológica .....	34
3.6.1	<i>Erro Absoluto.....</i>	<i>34</i>
3.6.2	<i>Raiz do Erro Quadrado Médio.....</i>	<i>34</i>
3.6.3	<i>Tendência Percentual.....</i>	<i>35</i>
3.6.4	<i>Coefficiente de Nash-Sutcliffe.....</i>	<i>35</i>
4	RESULTADOS.....	36
4.1	Análise da Sensibilidade dos Parâmetros.....	36
4.2	Calibração Manual e Validação do Modelo SMA .....	38
4.3	Calibração utilizando as Funções objetivo.....	43
4.4	Comparação com literatura.....	46
5	CONCLUSÃO .....	48
	REFERÊNCIAS .....	50

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

É notório que a gestão das águas de bacias hidrográficas influencia diretamente no desenvolvimento econômico dos estados que a integram. A busca de informações hidrológicas em circunstâncias de dados limitados é comum no cenário atual de estudos nessa área de conhecimento. Nesse aspecto, o desenvolvimento de modelos hidrológicos ganha espaço e a atenção de vários pesquisadores. Somado a isso, percebe-se o crescente avanço computacional na área da hidrologia possibilitando uma maior disponibilidade de dados e preocupação com recursos naturais. Verifica-se o envolvimento de procedimentos de aquisição de dados de observação terrestre por satélite de detecção remota, combinados com técnicas de geoprocessamento, empregados na geração de produtos para alimentar modelos em análise hidrológica.

A modelagem hidrológica é um componente crucial quando se objetiva o estudo da caracterização de um determinado meio hídrico, independente da sua dimensão. Os modelos de simulação hidrológica contínua, ao contrário dos modelos de eventos, levam em consideração o balanço hidrológico da bacia durante um longo período, e são apropriados para simular valores de escoamento médio diário, mensal ou mesmo sazonal (PONCE, 1989).

Os modelos hidrológicos mais utilizados atualmente realizam previsões de vazões, introduzindo fundamentalmente componentes estatísticos sazonais e temporais de curto prazo na previsão, baseando-se na quantidade de água que os rios possuem. A previsão da vazão com base na precipitação observada (mensurada em campo) permite estender o horizonte da previsão, ou ainda melhorar a qualidade da previsão dentro de um determinado período (CABRAL 2014).

Nesse sentido, o modelo do *Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) possui ampla aplicação na engenharia hidrológica para simular eventos de transformação de chuva em vazão. Possibilita gerar hidrogramas e informações referentes ao volume de escoamento superficial; previsão de vazões, com adoção de poucos parâmetros para calibração; combinação de diversos métodos para representar processos hidrológicos; entre outras funcionalidades (FELDMAN, 2000). Assim como, o uso do algoritmo *Soil Moisture Accounting* (SMA) do HEC-HMS permite simular o movimento da água ao longo do tempo através de vários componentes de armazenamento presentes nos aspectos físicos da bacia.

Tendo em vista isso, o conhecimento acerca dessas bacias é considerado fundamental para se garantir a sustentabilidade deste recurso e abrir caminhos para novas propostas de gerenciamento delas. Somado a isso, tem-se a importância de que o bom gerenciamento de recursos hídricos auxilia ainda nos instrumentos de gestão dos mesmos que exigem informações cada vez mais precisas para uma correta alocação de água, constituindo uma outorga dinâmica. Desta forma, podem-se minimizar conflitos pelo uso da água em momentos de escassez.

Nesse contexto, este trabalho está delimitado a avaliação da modelagem hidrológica chuva-vazão diária na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús utilizando o módulo SMA do HEC-HMS. Neste estudo foram utilizados dados fisiográficos da bacia para as estimativas iniciais dos parâmetros do SMA. Em seguida, a calibração e validação paramétrica através de várias funções objetivo e a análise de sensibilidade deles.

## **1.2 Justificativa**

A modelagem hidrológica é um importante componente no gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite equacionar os processos, representar, entender e simular o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Modelos hidrológicos chuva-vazão para séries contínuas são importantes no preenchimento de falhas e extensão de séries de vazões, a partir de dados de precipitação, pois dados observados de vazões são mais escassos que dados de precipitações diárias. O modelo hidrológico HEC-HMS possui um amplo uso em termos nacionais e internacionais para simulação de eventos de cheias, no entanto seu módulo SMA, que trabalha com chuva-vazão em séries temporais contínuas ao passo de tempo diário, pode ser considerado ainda pouco difundido no Brasil. Com o intuito de inserir esse modelo na prática regional, este estudo visa analisar a aplicabilidade e eficiência desse módulo na geração de vazões afluentes aos reservatórios superficiais da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús, localizada no semiárido cearense e altamente dependente destes reservatórios como manancial para suprir as diversas demandas locais. O SMA tem sido utilizado com sucesso por vários autores em várias partes do mundo (Bennett e Peters, 2000; García et al., 2008; Chu e Steinman, 2009; Bashar, 2012; Golian et al., 2012 Gyawali e Watkins, 2013). Baseado nisso, o presente trabalho possui uma significativa relevância para minimizar a carência de dados hidrológicos em termos diários, através do fornecimento de modelos de previsões de vazões utilizadas como suporte para o planejamento e demandas de recursos hídricos, alerta de desastres naturais, agricultura e outros.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a acurácia da modelagem hidrológica chuva-vazão diária na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús utilizando o módulo *Soil Moisture Accounting* (SMA) do *Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS).

Os objetivos específicos são:

- Calibrar e validar os parâmetros do SMA com base na série histórica de vazões da estação fluviométrica Fazenda Boa Esperança (Código ANA-34750000);
- Analisar o comportamento de diferentes Funções Objetivo (FO) no processo de calibração do módulo SMA, através do seu ajuste aos parâmetros e impacto nas estatísticas das variáveis utilizadas.
- Avaliar a sensibilidade dos parâmetros do módulo SMA para a região em estudo.
- Comparar os valores das séries de dados de vazão geradas com resultados obtidos em outros estudos realizados na mesma região de análise.

### 1.4 Roteiro Temático

O presente trabalho está dividido em cinco seções. A primeira seção introduz uma breve contextualização do tema, assim como, a definição da problemática, justificativa, delimitação e objetivos do trabalho em questão. A segunda seção é composta pelo referencial teórico preliminar do estudo, que é constituído por quatro partes onde serão abordados a modelagem hidrológica com ênfase em modelos de chuva vazão. Posteriormente será exposto o modelo do HEC-HMS com foco para seu módulo SMA.

Na terceira seção será exposto a descrição metodológica na qual esclarece os passos necessários para obtenção dos dados e a geração dos resultados. Em seguida serão apresentados os resultados que foram obtidos. Por fim, a última seção expõe as conclusões obtidas através dos resultados deste estudo e sugestões para promover estudos semelhantes além da região hidrográfica dos sertões de Crateús.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão apresentados os conhecimentos necessários para que se atinja uma melhor compreensão acerca do tema abordado e que são essenciais para execução deste trabalho. No primeiro tópico será apresentado um pouco sobre o conceito de modelagem hidrológica e onde suas aplicações são mais propícias no meio hidrológico.

Após isso, temos uma ênfase maior em modelos chuva-vazão, com foco no modelo *Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS). E posteriormente será abordado seu módulo *Soil Moisture Accounting* (SMA) para simular o movimento e armazenamento de água na bacia hidrográfica.

### 2.1 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica pode ser caracterizada como a representação matemática de um objeto ou sistema, objetivando entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes simulações. A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema, através do qual uma variável de entrada, como a precipitação, é transformada numa variável de saída (a vazão), por diversos processos do ciclo hidrológico (CABRAL 2014). Uma das maneiras de representar esse processo é através da modelagem hidrológica. O modelo hidrológico é bastante utilizado para se antecipar a eventos como, por exemplo, o impacto da urbanização de uma bacia antes que ela ocorra, a previsão de uma enchente em tempo real, impacto da alteração de um rio, ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis, tornando possível a realização de medidas preventivas para estas diversas situações. Segundo Tucci (2005) os modelos nasceram dentro da necessidade de dar resposta as diferentes questões práticas e científicas. Inicialmente explicando componentes da relação precipitação-vazão como a infiltração, o escoamento em rios, entre outros, para depois buscar integrar os diferentes componentes causais da natureza e dos fatores antrópicos. Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Dessa forma, não existe um modelo único que seja o melhor, mas sim aquele que melhor descreve um fenômeno.

Segundo Tucci (1998) os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com a aleatoriedade (determinísticos e estocásticos). No caso de modelos determinísticos, os mesmos ainda podem variar de acordo com o espaço (concentrados e distribuídos) e quanto ao tempo (Permanentes e variados). Os modelos permanentes consideram explicitamente a variação do tempo na sua representação. Os modelos que representam a bacia hidrográfica com

um conjunto único de parâmetros são considerados concentrados. Estes são modelos mais robustos, que requerem uma quantidade menor de dados.

Estes modelos possuem parâmetros que caracterizam uma determinada bacia e necessitam ser ajustados com dados observados de vazão. Os valores atribuídos aos parâmetros podem ser vistos como dispositivos de afinação do modelo, sendo através da manipulação destes valores que se torna possível a calibração. Esses valores necessitam ser ajustados para que o modelo possa prever a resposta física do sistema com maior precisão. A integração dos modelos permite avaliar condicionantes complexos em diferentes cenários de recursos hídricos. Por exemplo, na previsão da vazão, pode-se integrar modelo meteorológico e modelo hidrológico para prever a vazão de um determinado local com antecedência, com base na previsão de chuva, na chuva registrada na bacia e nas vazões que permitem atualizar o modelo.

De acordo com Lou (2010) o desempenho de diversos modelos hidrológicos determinísticos do tipo chuva-vazão depende da seleção criteriosa da estrutura do modelo e dos parâmetros adotados na modelagem, respeitada a finalidade e adequada representação dos processos componentes do ciclo hidrológico e das características físicas da bacia em estudo

Para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, um dos métodos mais comuns que podem ser utilizados é o coeficiente de Nash – Sutcliffe (1970), que corresponde a uma combinação entre valores de vazão observada e calculada. Além disso, outras métricas também são importantes para avaliar a eficiência de modelos hidrológicos como raiz do erro quadrado médio (RMSE), tendência percentual (PBIAS) e média absoluta dos erros (MAE).

A previsão hidrológica pode ser feita principalmente por modelos do tipo chuva-vazão. Tais modelos procuram representar os processos físicos do processo de transformação da chuva em vazão.

## **2.2 Modelos Chuva-vazão**

Quando vamos definir o modelo ideal ao nosso estudo, devemos ter a clareza dos dados que serão necessários para sua aplicação (entrada), bem como o objetivo e os resultados que queremos alcançar (saídas) (MERRITT et al., 2003). Modelos que visam transformar precipitação em vazão são importantes pois tentam modelar de forma mais verossímil um fenômeno hidrológico. Eles têm por objetivo estimar o deflúvio em uma bacia qualquer, gerado por uma precipitação. Modelos de chuva vazão reproduzem as fases do ciclo hidrológico desde a precipitação até o escoamento no ponto de interesse. Existe uma grande variedade de modelos-chuva vazão, um dos mais simples e práticos, porém limitado é o método racional,

que é muito utilizado em projetos de drenagem para estimativas de vazão em pequenas bacias. Existem também modelos com diversas entradas distribuídas, que consideram a variabilidade espacial e temporal do evento chuvoso. Geralmente esses últimos modelos tentam representar a variação das características da bacia hidrográfica no espaço, além de fazerem o balanço hídrico localizados, determinando parcelas de evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e subsuperficial para cada unidade de estudo.

### 2.3 HEC-HMS

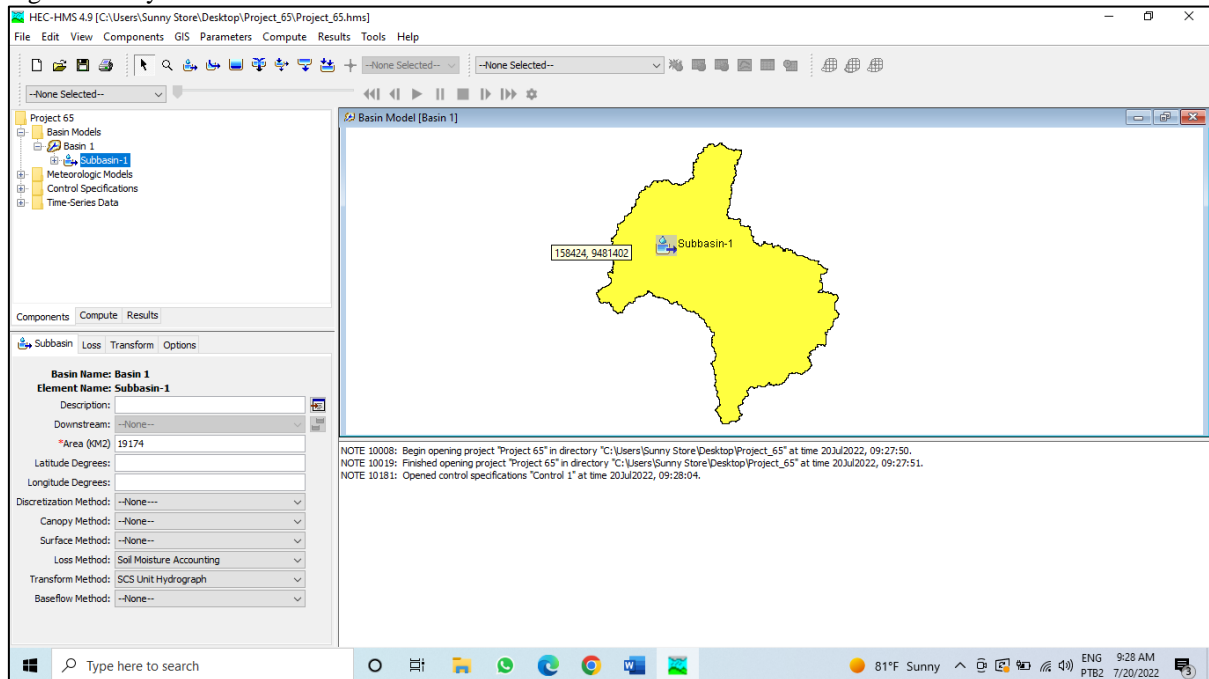
O Sistema de Modelagem Hidrológica, HEC-HMS, é projetado para simular os processos hidrológicos completos de sistemas dendríticos (grande quantidade de afluentes que geram o rio principal) de bacias hidrográficas. O *software* foi desenvolvido pelo centro de engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE-HEC, 2000) e inclui muitos procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como infiltração de eventos, hidrogramas unitários e roteamento hidrológico. O HEC-HMS também inclui procedimentos necessários para modelagem distribuída e simulação contínua, incluindo evapotranspiração, derretimento de neve e contabilidade da umidade do solo. Ferramentas de análise suplementares são fornecidas para otimização do modelo, previsão do fluxo de água, redução da área de profundidade, avaliação da incerteza do modelo, erosão e transporte de sedimentos e qualidade da água.

O HEC-HMS é um programa que pode ser adaptado a um sistema de interesse, através de mudanças nos dados em um banco de dados ou alterações nos parâmetros, nas condições de contorno e nas condições de entrada iniciais (CAMPOS, 2009).

Os hidrogramas produzidos pelo programa são utilizados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto do desenvolvimento da urbanização, dimensionamento de vertedouros de reservatórios, redução de danos de inundação, regime de planícies de inundação e sistemas de operação (USACE-HEC, 2010).

A Figura 1 representa o layout do software HEC-HMS, onde podemos ver a estruturação do programa, bem como as entradas de dados para bacia.

Figura 1 - Layout do HEC-HMS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os diversos processos hidrológicos simulados pelo HEC-HMS, temos a transformação de chuva em vazão em sistemas de bacias hidrográficas tanto urbanas como rurais. Utilizando dados de precipitação conhecidos, é possível simular o comportamento do escoamento superficial da bacia hidrográfica fornecendo informações importantes como vazão máxima, escoamento e tempo de retorno (USACE-HEC, 2016). Além disso, o software inclui várias equações para modelar os processos hidrológicos de uma bacia e diversas estatísticas para serem usadas como FO.

O HEC-HMS também inclui um pacote de calibração automática para estimar os parâmetros do modelo e condições iniciais, dadas as observações das condições hidrometeorológicas (USACE-HEC, 2016).

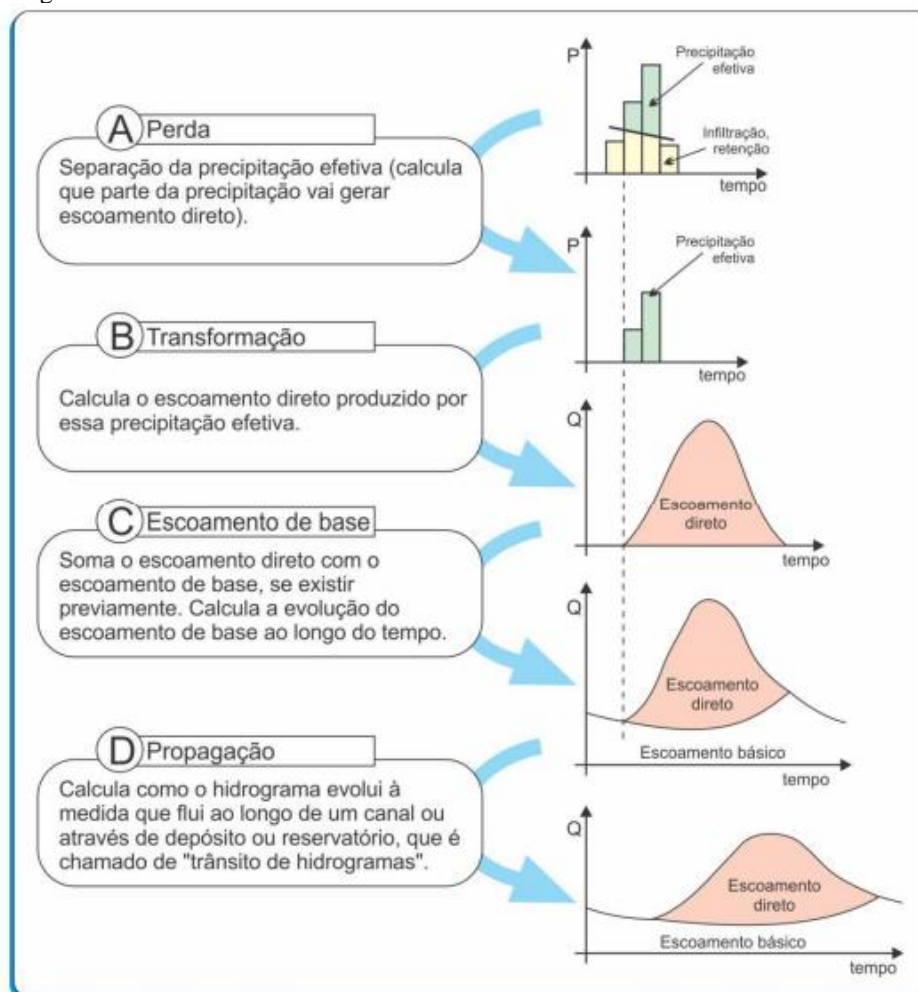
### 2.3.1 Passo a passo do HEC-HMS

O processo de modelagem hidrológica no HEC-HMS requer, inicialmente, uma entrada de dados da bacia hidrográfica e de dados meteorológicos. Para a bacia, são escolhidos os sistemas de unidade, sedimentos e qualidade da água (opcional). Para a sub-bacia são escolhidos os métodos de perdas de transformação de escoamento superficial, escoamento de base, métodos de perda e propagação de cheias. Para esses respectivos métodos, são

determinados seus parâmetros como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros e interceptação.

O cálculo feito pelo programa pode ser descrito em quatro fases de operação do sistema como: (A) Perdas (*Loss*), nessa fase o programa calcula as perdas de acordo com o método adotado, o que resulta na precipitação efetiva, ou seja, a parte da precipitação que irá gerar escoamento superficial; (B) Transformação (*Transform*), nessa etapa o programa calcula o escoamento superficial direto produzido pela precipitação efetiva, produzindo o hidrograma unitário; (C) Fluxo de Base (*Baseflow*), nessa etapa adiciona o escoamento de base, caso exista, ao escoamento direto, calculando a evolução do escoamento de base ao longo do tempo; (D) Propagação (*Routing*), nessa etapa o programa calcula como um hidrograma evolui à medida que corre ao longo do leito de um rio ou através de um reservatório, o que é chamado de “trânsito do hidrograma”, somando as vazões de entrada e descontando as perdas em cada trecho (USACE-HEC, 2010). A Figura 2 representa as fases de cálculo descritas acima do processo usado no HEC-HMS.

Figura 2 - Fases de cálculo do HEC-HMS



## 2.4 SOIL MOISTURE ACCOUNTING (SMA)

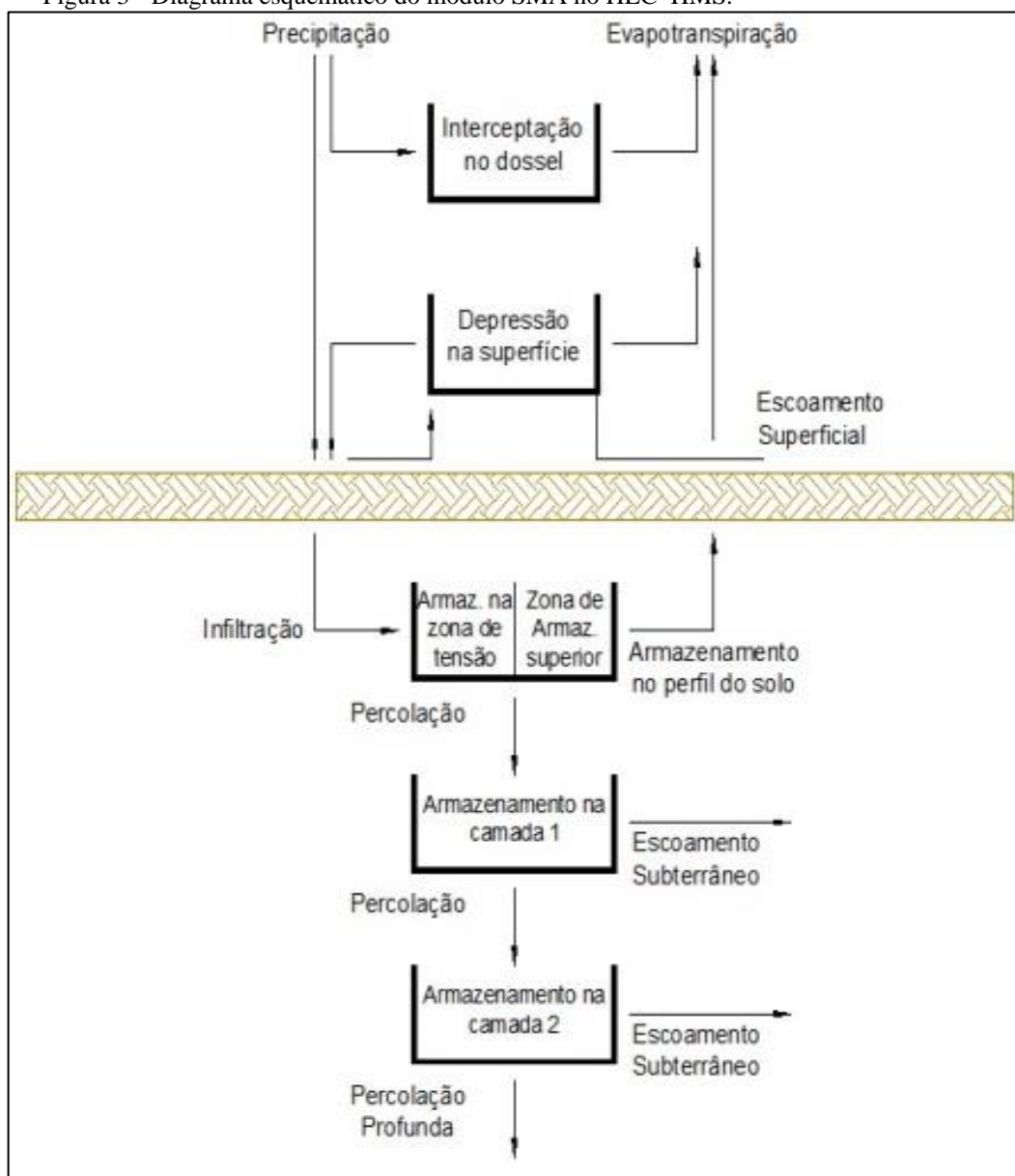
O *Soil Moisture Accounting* (SMA) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACEHEC, 2000).

Quando falamos de modelagem de um sistema chuva-vazão, muitos são os modelos existentes para realizar tal processo. Cada um desses modelos tem sua própria metodologia e aproximação. Contudo, o processo de infiltração e percolação no solo é ainda um procedimento complicado e que implica em resultados sem as aproximações esperadas.

O SMA é um modelo contínuo que simula o comportamento da bacia em clima úmido ou seco. O modelo simula o movimento e o armazenamento da água na vegetação, dossel e em depressões superficiais além da superfície do solo, no perfil do solo e nas camadas subterrâneas (USACE-HEC, 2016). Dada a precipitação e evapotranspiração potencial (ET), o modelo calcula o escoamento superficial da bacia, o fluxo de água subterrânea, as perdas devido a ET e a percolação profunda em toda a bacia. Analisa as taxas de entrada e saída de água da bacia devido as chuvas, evaporação e transpiração. O conteúdo atual do armazenamento de água no solo é calculado durante a simulação e varia continuamente durante e entre as tempestades. A precipitação pode ser uma entrada para o algoritmo do SMA para o primeiro movimento de armazenamento subterrâneo de água na bacia.

Ainda segundo Bennett e Peters (2000), o SMA é um método de taxa de perda associada com uma sub-bacia. A precipitação é calculada separadamente e, em seguida, aplicada à sub-bacia, como uma entrada para o algoritmo SMA. O método de perda do SMA então simula o movimento de água ao longo do tempo através dos vários componentes de armazenamento que representam os aspectos físicos da bacia. A Figura 3 mostra o diagrama esquemático dos processos do módulo SMA no HEC-HMS.

Figura 3 - Diagrama esquemático do módulo SMA no HEC-HMS.



Fonte: Cabral (2014)

Os parâmetros do SMA variam de acordo com o tipo de terreno no qual a bacia se encontra. Kachroo (1992) salienta a vantagem de usar modelos com embasamento físico, pois os parâmetros têm relação direta com as características físicas da bacia e, desta forma, podem ser modificados em função da forma de ocupação do solo. A seguir será comentado a metodologia usada na estimativa dos parâmetros do SMA na Região hidrográfica dos sertões de Crateús.

### **2.4.1 Estimativa dos parâmetros do SMA**

A aplicação do módulo SMA requer o conhecimento de 14 parâmetros em que destes parâmetros, uma parte pode ser obtida por calibração. Os parâmetros são os seguintes:

1. Armazenamento do Solo (%);
2. Armazenamento subterrâneo da camada 1 (%)
3. Armazenamento subterrâneo da camada 2 (%)
4. Taxa máxima de infiltração (mm/h);
5. Área de superfície impermeável (%);
6. Armazenamento total do solo (mm);
7. Armazenamento de tensão do solo (mm);
8. Percolação do Solo (mm/h)
9. Armazenamento subterrâneo na camada 1 (mm);
10. Taxa máxima de percolação na camada 1 subterrânea (mm/h);
11. Coeficiente de armazenamento subterrâneo na camada 1;
12. Armazenamento subterrâneo na camada 2 (mm);
13. Taxa máxima de percolação na camada 2 subterrânea (mm/h)
14. Coeficiente de armazenamento subterrâneo na camada 2;

Os valores iniciais utilizados nos parâmetros na região hidrográfica dos sertões de Crateús levaram como base o estudo de Bennett e Peters (2000) que fizeram estimativas iniciais dos parâmetros do SMA de acordo com as características físicas do terreno da bacia hidrográfica. A Figura 4 apresenta o dossel de interceptação da vegetação nas chuvas na região. O armazenamento nas depressões da superfície do solo pode ser estimado como uma função da bacia superfície e inclinação (Figura 5). A estimativa inicial de alguns parâmetros do modelo SMA pode ser vista nas Figuras 6 e 7. Essas estimativas levam em consideração o tipo de solo de acordo com a classificação SCS de tipo de solo.



Figura 4 - Estimativa do armazenamento dossel de interceptação

Vegetação	Interceptação e armazenamento do dossel (mm)
Floresta	9
Arbusto	4
Pasto	4
Outro	2

Fonte: Bennett e Peters (2000)

Figura 5 - Estimativa do armazenamento da superfície

Superfície	Declividade (%)	Armazenamento na superfície (mm)
Pavimentada	9	3.2-6.4
	>30	1.0
Natural	10-30	12.7-16.4
	0-5	50.8

Fonte: Bennett e Peters (2000)

Figura 6 - Estimativa dos Parâmetros do modelo SMA em função do tipo de solo (SCS)

Tipo de solo SCS	Armazenamento máximo do solo (mm)	Armazenamento na zona de tensão (mm)	Taxa máxima de infiltração (mm/h)
A	150	105	8
B	85	68	4.5
C	70	59.5	3
D	50	45	1

Fonte: Bennett e Peters (2000)

Figura 7 - Estimativa da Taxa de Percolação do solo

Permeabilidade	Taxa de percolação na zona do solo (mm/h)
Alta	8
Média	4
Baixa	1

Fonte: Bennett e Peters (2000)

A Tabela 1 apresenta os valores usados como estimativas iniciais para os parâmetros usados para o modulo SMA, tendo em vista o estudo de Bennett e Peters (2000). Foram levados em consideração às características físicas do tipo de solo na área de bacia hidrográfica dos sertões de Crateús.

Tabela 1 - Valores estimados dos Parâmetros do SMA.

Parâmetros	Valor Inicial	Parâmetros	Valor Inicial
Soil (%)	50	Soil Percolation (mm/hr)	4
Groundwater 1 (%)	10	GW 1 Storage (mm)	10
Groundwater 2 (%)	10	GW1 Percolation (mm/hr)	5
Max Infiltration (mm/hr)	2	GW1 Coefficient (h)	1
Impervious (%)	7	GW 2 Storage (mm)	5
Soil Storage (mm)	75	GW 2 Percolation (mm/hr)	1
Tension Storage (mm)	52	GW 2 Coefficient (h)	7,5

Fonte: Elaborado pelo Autor.

### **3 MÉTODO DE PESQUISA**

Nesta seção serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realização do trabalho.

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

O presente trabalho tem como estratégia de pesquisa a ser usada o estudo de caso. Segundo Yin (2010) estudo de caso é uma investigação empírica que analisa um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto, especialmente quando os limites entre fenômeno e contexto não são bem definidos. Tull (1976) ainda se refere a estudo de caso como uma análise intensiva de uma situação particular, buscando obter referências de uma ou mais entidades. Quanto a seu objetivo, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa e preditiva.

Segundo Knechtel (2014), a pesquisa quantitativa é uma modalidade de pesquisa que atua sobre um problema humano ou social, é baseada no teste de uma teoria e composta por variáveis quantificadas em números, as quais são analisadas de modo estatístico, com o objetivo de determinar se as generalizações previstas na teoria se sustentam ou não.

#### **3.2 Área de Estudo**

A bacia hidrográfica dos sertões de Crateús está localizada na região oeste do estado do Ceará, compreendendo uma área de 12.821 km<sup>2</sup> (IPECE, 2017). A RHSC tem uma população total de 240.714 habitantes e é composta por nove municípios. Além disso, possui uma capacidade de acumulação de águas superficiais de 446.685.647 m<sup>3</sup> (SRH, 2013).

Figura 8 - Regiões hidrográficas do Estado do Ceará



Fonte: SRH (2013).

### 3.3 Levantamento de Dados

Para que seja realizado o processamento do modelo hidrológico do HEC-HMS é necessário que se tenha, inicialmente, uma entrada de dados físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica em questão. Nessa etapa, foram selecionados os métodos para o cálculo para a Área das sub-bacias, declividade, tempo de concentração, *lag-time*.

Para as etapas de fundamentação e compreensão será realizado um levantamento de dados fisiográficos e hidrográficos da região em estudo. Esses dados são essenciais pois serão utilizados como dados de entrada do modelo. Entende-se por dados fisiográficos aqueles dados que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite. Basicamente são áreas, uso e ocupação do solo, lag time, tempo de concentração, altitude e declividade média, comprimentos, declividades e coberturas do solo obtidos diretamente ou expressos por índices (TUCCI, 2004). Já os dados hidrográficos são dados como vazão, evaporação e precipitação.

Para esse estudo foi utilizado uma série de precipitação na escala diária referente ao período de 1964 a 1988. Os dados pluviométricos utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir da média das precipitações de estações pluviométricas que estão dentro da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús. Esses dados são disponibilizados pela Agência nacional de águas (ANA) disponível em [www.hidroweb.ana.gov.br](http://www.hidroweb.ana.gov.br). Nesse estudo foram utilizadas quarenta e oito estações pluviométricas (Tabela 2) inseridas na região hidrográfica dos sertões de Crateús.

Para o cálculo da precipitação média na bacia foi utilizado o método do polígono de Thiessen. O método se caracteriza por atribuir pesos relativos a cada posto pluviométrico e área de influência, onde as fronteiras dos polígonos são formadas pelas mediatrizes das linhas que unem dois postos adjacentes.

Na Figura 9 podemos ver a disposição geográfica das estações pluviométricas utilizadas para cálculo do Thiessen da bacia. A Tabela 2 mostra todas as estações pluviométricas utilizadas para realização do Thiessen.

Figura 9 – Disposição espacial das estações pluviométricas utilizadas no Thiessen



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 2 - Estações pluviométricas utilizadas para realização do Thiessen

<b>Estação</b>	<b>Nome do Posto</b>	<b>Estação</b>	<b>Nome do Posto</b>	<b>Estação</b>	<b>Nome do Posto</b>
640037	Baixio	540031	Jaburu	440020	Sucesso
640041	Algodões	540027	Vila Santo Antônio	440055	Ipaporanga
540052	Quiterianópolis	540019	Independência	440007	Tamboril
540002	Coutinho	540016	Independência	440080	Açude Carão
540042	Cruz	540035	Recife	440060	Canindezinho
540041	Monteiro	540111	Fazenda Gracinha	440044	Ararendá
540030	Iapi	540028	Tucuns	440017	Nova Russas
540033	Várzea Grande	540034	Ematuba	440045	Santo Antônio
540115	Muquem	540020	Aeroporto		
540113	Fazenda Realeza	540000	Crateús		
540007	Iapi	540026	Irapuã		
540005	Tranqueiras	540025	Morro Alegre		
540038	Cachoeira do Fogo	540039	Barreiros		
540003	Novo Oriente	540044	Oliveira		
540054	Caminho da Cachoeira	540043	Logradouro		
540040	Emaus	540107	Poti		
540036	Jandrangoeira	540023	Ibiapaba		
540108	Desejo	540029	Santa Terezinha		
540032	Monte Sinai	440003	Curatis		
540024	Monte Nebo	440068	Curatis		

Fonte: Martins (2022)

Segundo Faures. et.al (1995) o uso de vários postos pluviométricos na obtenção de dados para posterior uso no modelo melhoram o desempenho dele. Vê-se no estudo que existe uma influência da disponibilidade de informações sobre a distribuição espacial da chuva em um modelo hidrológico distribuído. Logo, quanto menor a disponibilidade de dados pluviômetros se verifica uma queda de desempenho do modelo. Da mesma forma que são obtidos melhores desempenhos quando a disponibilidade de dados pluviométricos passa a ser maior.

Já para os dados fluviométricos foi utilizada a base de dados da agência nacional de águas ANA, inseridas na bacia hidrográfica dos sertões de Crateús. A única estação fluviométrica existente para região é a de código 34750000 (Fazenda Boa Esperança), esta estação está situada no rio Poti e compreende um total de 19.174 km<sup>2</sup>, englobando toda a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús e ao norte uma parcela da Região Hidrográfica da Serra da Ibiapaba.

Tabela 3 - Características do Posto Pluviométrico Fazendo Boa Esperança

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Município</b>	<b>Responsável</b>	<b>Operadora</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
34750000	FAZENDA BOA ESPERANÇA	CASTELO DO PIAUÍ	ANA	CPRM	-5,22	-41,74

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4 apresenta as características fisiográficas referentes a área da bacia, comprimento do rio, lag time, tempo de concentração, altitude e declividade média, obtidas através de softwares de georreferenciamento.

Tabela 4 - Características fisiográficas da estação Fazenda Boa Esperança

<b>Estação</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Comprimento do rio (Km)</b>	<b>Lag Time (min)</b>	<b>Tempo de concentração</b>	<b>Altitude Média</b>	<b>Declividade Média</b>
34750000	19.174	238,46	5.606	155,5	486	0,00159

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o processo *Transform*, é usado o método do Hidrograma Unitário SCS para a propagação do escoamento na superfície da bacia. Essa entrada de dado é necessária para se gerar o Hidrograma a partir do hietograma da chuva. Tal método consistente em usar como parâmetro o tempo de retardo (Lag time) que pode ser definido pela equação a seguir:

$$T_{lag} = 0,6 * T_c \quad (3.1)$$

Onde  $T_c$  representa o tempo de concentração da bacia. Por sua vez,  $T_c$  é estimado pela Equação de Kirpich que pode ser vista a seguir:

$$T_c = 0,0078 * \left( \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \quad (3.2)$$

$L$  é o comprimento do rio em metros e  $S$  é a declividade do rio em %.

A série de vazão foi utilizada para a calibração dos parâmetros do SMA na área de estudo.

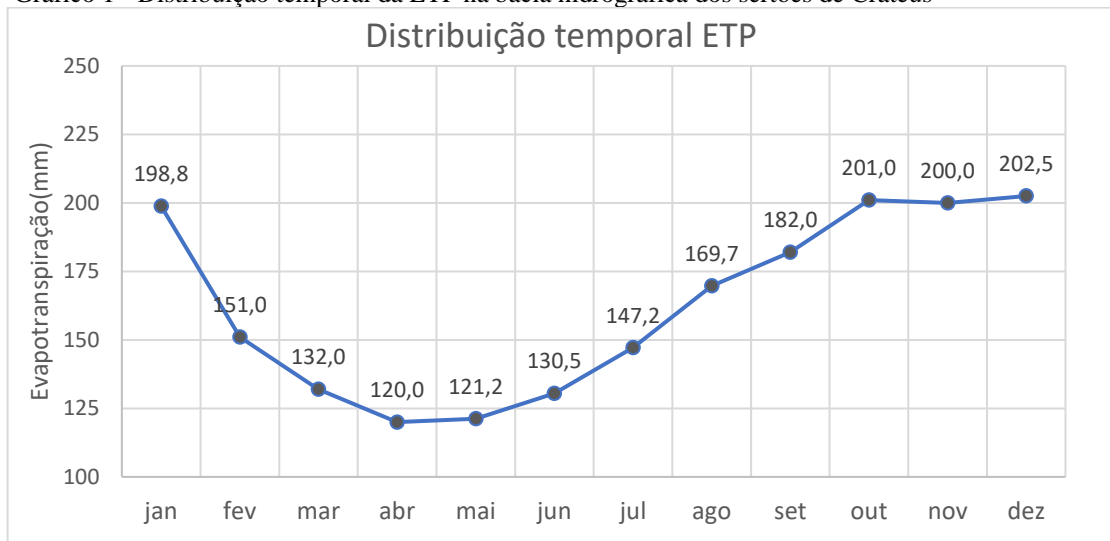
Os dados de evaporação foram coletados da rede de dados do INMET. As estações de dados de evaporação presentes na área de estudo são as de código 82583 Crateús e 82683 Tauá. A Tabela 5 apresenta a variação anual da evapotranspiração potencial da bacia que foi utilizada na modelagem do SMA.

Tabela 5 - Evapotranspiração potencial da bacia dos sertões de Crateús

<b>Jan.</b>	<b>Fev.</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr.</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Set.</b>	<b>Out.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dez.</b>
198,8	151,0	132,0	120,0	121,2	130,5	147,2	169,7	182,0	201,0	200,0	202,5

Fonte – Elaborada pelo autor.

Gráfico 1 - Distribuição temporal da ETP na bacia hidrográfica dos sertões de Crateús



Fonte – Elaborada pelo autor.

### 3.4 Data Storage System (DSS)

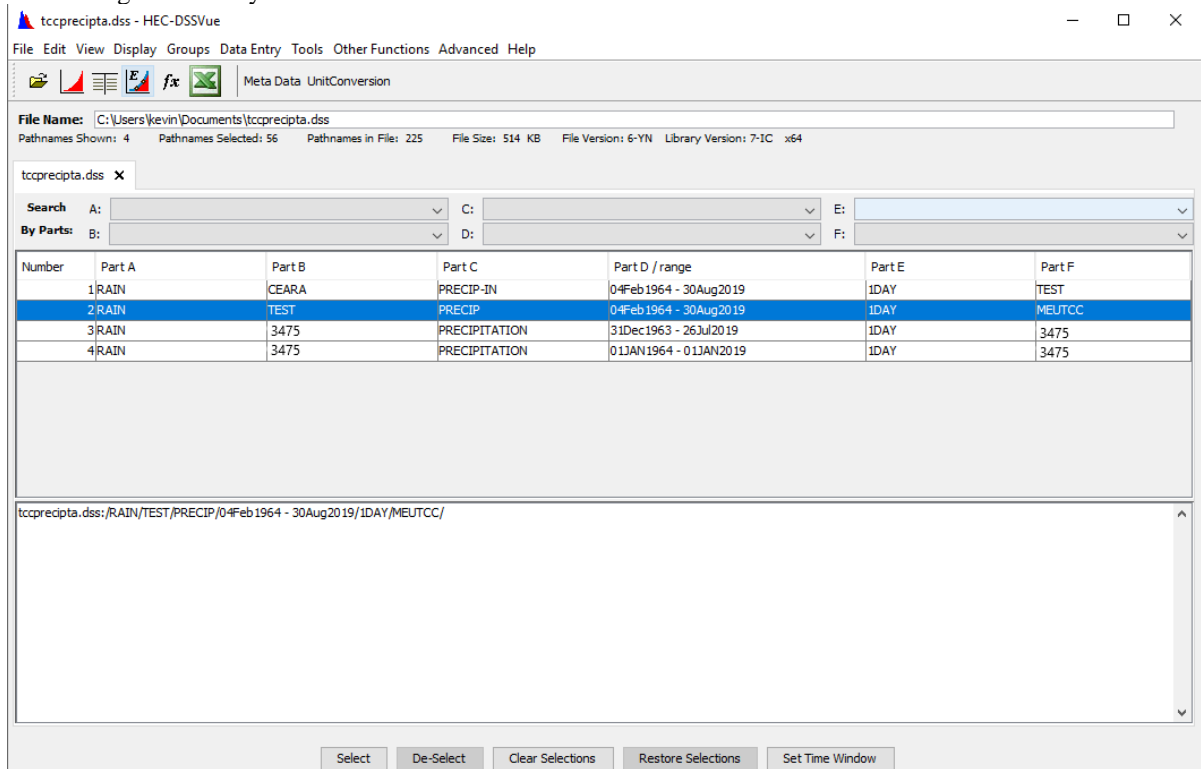
Para inserir os dados de entrada de precipitação e vazão dos postos pluviométricos foi utilizado o *Data Storage System* (DSS) do HEC-HMS disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/>

O DSS é um sistema de armazenamento de dados que centraliza dados de entrada e saída de toda plataforma HEC além de apresentar graficamente e em tabelas todos os elementos que compõem o estudo hidrológico. É um elemento importante para recuperação e backup de dados, arquivamento e aplicação do modelo. A Figura 10 mostra a estrutura do armazenamento de dados pelo DSS.

Esta forma de armazenamento dos dados facilitou de forma ágil e eficiente a entrada dos dados no modelo. E toda modificação realizada nos dados é automaticamente atualizada nas entradas do modelo, dispensando a entrada manual.



Figura 10 - Layout do HEC-DSSvue



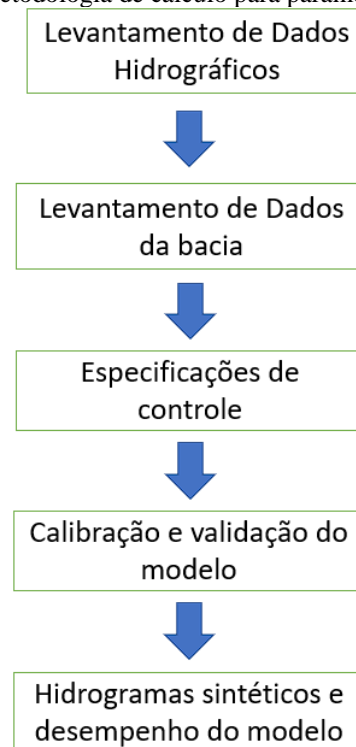
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 3.5 Modelagem do Sistema Chuva – Vazão (SMA)

Esta seção tem como objetivos demonstrar os passos para a modelagem do sistema chuva – vazão, ela possui subseções que contam com os passos necessários, desde a obtenção de séries de precipitações para a bacia (que já foram demonstradas anteriormente) até a calibração de seus parâmetros.

O modelo HEC-HMS é formado por três componentes: o Modelo de bacia, o modelo hidrológico e meteorológico e as especificações de controle. O esquema apresentado na Figura 11 mostra todas as etapas que foram seguidas em sequência até chegar nos resultados obtidos.

Figura 11 – Metodologia de cálculo para parametrização do SMA



Fonte: Elaborado pelo Autor

Posteriormente será realizada a acurácia da calibração e validação dos parâmetros do modulo SMA.

### 3.6 Sensibilidade dos Parâmetros

Um dos principais desafios enfrentados pela modelagem hidrológica é a calibração eficiente dos parâmetros do modelo. A fase de calibração de um modelo hidrológico é uma etapa que exige um maior entendimento do comportamento do modelo e dos parâmetros e aos problemas com a qualidade e representatividade dos dados hidrológicos (COLLISCHONN, 2003). Ela consiste em um ajuste dos parâmetros de forma que exista uma reprodução da série de vazões observadas do modelo a partir de dados de precipitação e vazão. Quanto menor a diferença entre as séries de vazões observadas e calculadas pelo modelo maior é a qualidade do ajuste.

A aplicação do algoritmo SMA na determinação do escoamento das águas no modelo implica na necessidade da calibração de um total de 14 parâmetros, como já mencionado anteriormente. O período de dados escolhido para calibração compreende as vazões e precipitações diárias de janeiro de 1964 a janeiro de 1986. A validação do modelo

consiste na simulação do modelo com os parâmetros ajustados para verificar a validade da calibração. O período de verificação escolhido foi de janeiro de 1986 a janeiro de 1988.

A calibração do modelo foi feita de duas maneiras: calibração manual e por calibração automática. Na primeira, escolheram-se valores para os parâmetros baseados na realidade física do local, ou seja, foram levados em consideração o tipo do solo, vegetação, permeabilidade. Após serem levantados os valores iniciais dos parâmetros, modificações foram feitas em cada parâmetros individualmente com a finalidade de atingir um melhor ajuste entre eles (encontrar a melhor faixa de valores para os parâmetros selecionados). Dessa forma, pode-se observar quais parâmetros apresentam maior e menor sensibilidade no processo de calibração, ou seja, parâmetros que tem ou não influência significativa sobre as simulações. O desconhecimento dos parâmetros mais sensíveis poderá ocasionar em resultados menos eficientes, e tempo gasto de forma desnecessária em ajustes nas simulações (LENHART et al., 2002).

Será abordado um tópico sobre o quanto a variação desses parâmetros influencia no número de *Nash-Sutcliff* nas etapas da modelagem. A cada tentativa o usuário analisa o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo e o volume do sistema.

Modelos hidrológicos que contém uma grande quantidade de parâmetros envolvidos em seus processos tendem a usar de processos automatizados para que se alcance um valor ideal para cada situação desejada. Segundo Tucci (1998) a calibração automática apresenta a vantagem de ser um processo mais rápido. Porém, é necessário analisar os limites dos parâmetros e discuti-los para evitar valores absurdos. Em alguns casos, a calibração automática do HEC-HMS apresentou valores que distorcem a realidade física dos parâmetros usados para modelagem. Já a calibração manual, por sua vez, permite uma imersão maior no entendimento e funcionamento do modelo. Contudo, o processo se torna mais demorado e repetitivo. O processo de calibração automática utiliza algoritmos e funções objetivo para calcular as diferenças entre os valores observados e simulados (FRAGOSO Jr. et al., 2009).

A função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a distância entre a saída do modelo e os valores observados. Existem diferentes funções objetivo, as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para aperfeiçoar a simulação dos diferentes elementos do hidrograma, como a recessão ou então as vazões de pico (GUPTA et al., 1999).

### 3.6 Análise da eficiência da modelagem hidrológica

Indicadores estatísticos são a forma mais comum para a avaliação da eficiência de um modelo hidrológico, podendo revelar aspectos interessantes para compreensão das vantagens de uso, restrições e limitações do modelo (FRAGOSO Jr., et al., 2009). Para avaliar a eficiência dos modelos hidrológicos, foram utilizadas algumas funções objetivo para verificação do desempenho do modelo.

Willmott (1982) sugere que a avaliação do desempenho de modelos deve ser feita com base em um conjunto de medidas estatísticas quantitativas para que se tenha uma adequada e apropriada comparação entre variáveis preditas e observadas. Existem diferentes funções objetivo, as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para aperfeiçoar os parâmetros e a simulação dos diferentes elementos do hidrograma (GUPTA et al., 1999).

Por se tratar de um modelo com vários parâmetros (14) é improvável que exista um único conjunto de parâmetros que crie uma série sintética de vazões que represente bem as séries de vazões observadas. Dessa forma, as métricas utilizadas para avaliar as diferentes fases da modelagem em questão foram as seguintes: Erro Absoluto (ERRO ABS), raiz do erro quadrado médio (RMSE), Tendência Percentual (PBIAS) e coeficiente de *Nash-Sutcliff* (NS).

#### 3.6.1 Erro Absoluto

O Erro Absoluto se dá pela diferença entre as vazões observadas e as vazões calculadas. A formulação para o erro absoluto pode ser expressa na equação 3.3:

$$ERRO\ ABS = \sum ABS|Q_{CAL} - Q_{OBS}| \quad (3.3)$$

#### 3.6.2 Raiz do Erro Quadrado Médio

A raiz do erro quadrado médio ou RMSE é uma métrica mais sensível aos valores de vazões mais altas por conta da sua diferença ser elevada ao quadrado. A equação 3.4 expressa o valor de RMSE.

$$RMSE = \frac{\sum(Q_{OBS} - Q_{CAL})^2}{N} \quad (3.4)$$

### 3.6.3 Tendência Percentual

A tendência percentual ou PBIAS proposto por Gupta et al. (1999), avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal do PBIAS é de 0 (zero), valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação (Moriasi et al., 2007). Ainda segundo Morais et al. (2007), o valor de PBIAS tende a variar muito entre os diferentes períodos de calibração, durante os anos secos e úmidos, o método é muito utilizado quando se pretende avaliar a eficiência da calibração e validação de modelos hidrológicos, identificando quando se há ou não um baixo desempenho do modelo. A equação 3.5 apresenta o valor de PBIAS.

$$PBIAS = \sum \left( \frac{Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)}{Q_{obs}(t)} \right) * 100\% \quad (3.5)$$

Onde N é o número total de observações;  $Q_{cal}$  é a vazão simulada e  $Q_{obs}$  a vazão para as três equações.

### 3.6.4 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Para que seja feita a determinação da eficiência da modelagem hidrológica foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe que pode ser vista na Equação 3.6:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [V_{obs}(t) - V_{cal}(t)]^2}{\sum_{i=1}^n [V_{obs}(t) - \bar{V}_{obs}(t)]^2} \quad (3.6)$$

Onde  $V_{obs}$  é a Vazão observada e  $V_{cal}$  e a vazão calculada e t é referente a vazão no tempo t. Este índice pode variar de  $-\infty$  a 1, onde o valor 1 corresponde a máxima perfeição entre vazão observada e calculada.

A análise de desempenho dos modelos foi realizada tanto para o período de calibração quanto o de validação. De acordo com a classificação sugerida por Lie et al. (2007), valor de  $NSE = 1$  significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo;  $NS > 0,75$  (modelo é adequado e bom);  $0,36 < NS < 0,75$  o modelo é considerado satisfatório e  $NS < 0,36$  o modelo não é satisfatório.

## 4 RESULTADOS

Para obtenção dos resultados, a estrutura usada nesse trabalho para determinar a relação chuva-vazão e acurácia do modelo consistiu em quatro grandes etapas:

- Calibração e validação dos parâmetros do modelo;
- Análise de sensibilidade dos parâmetros;
- Avaliação dos hidrogramas calculados e observados;
- Comparação dos resultados obtidos com estudos anteriores.

Uma vez organizados os dados de entrada no formato exigido pelo programa, como descrito nas seções anteriores desse estudo, foi escolhido do método de cálculo. Em seguida realizou-se as importações necessárias dos dados de entrada e desenvolvimento do modelo meteorológico com os dados de precipitação e evapotranspiração, e suas respectivas especificações de controle, com o tempo de simulação. Assim, o modelo está pronto para o início da etapa de calibração e validação.

### 4.1 Análise da Sensibilidade dos Parâmetros

Analisar a sensibilidade dos parâmetros é uma etapa importante na calibração e validação de um modelo hidrológico pois o conhecimento deles influencia na obtenção de melhores resultados e facilita o uso do modelo em aplicações futuras. A análise de sensibilidade nesse estudo foi feita variando individualmente cada parâmetro e mantendo os demais como constantes. Dessa forma, constatou-se que determinados parâmetros apresentavam maior sensibilidade em relação a outros uma vez que, sua mudança representava uma maior variação entre os diagramas calculados e observados.

Dentre os parâmetros, os que apresentaram maior sensibilidade foram *soil storage*, *tension storage*, *soil percolation* e *maximum infiltration*. Trabalhos como os de Cabral (2014) (acoplamento de modelo atmosférico e hidrológico na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe), Singh (2015) (Bacia hidrográfica de Vamsadhara, Índia) e Ayka, A. (2008) (na sub-bacia dos lagos do vale do Rift na Etiópia) também chegam à conclusão de que os parâmetros que apresentam maior relevância física são esses.

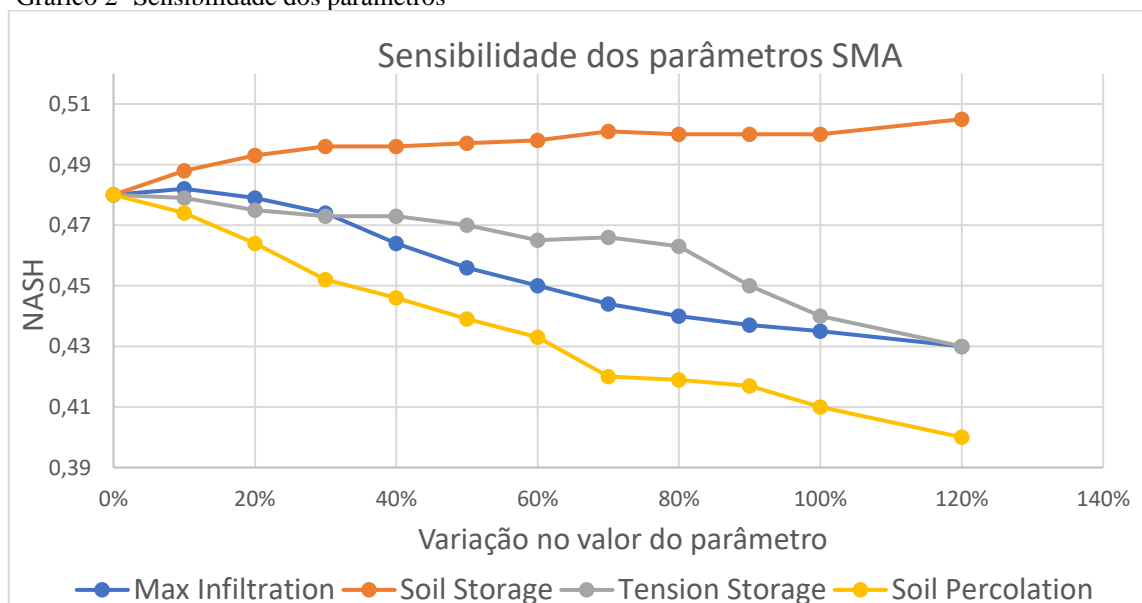
O parâmetro *maximum infiltration* representa a capacidade de infiltração do solo levando em consideração o armazenamento da água na sua superfície. O armazenamento total de água na camada superior do solo é representado pelo parâmetro *soil storage*, dado em

milímetros. O parâmetro *Tension storage* simboliza o armazenamento matricial no solo. Em outras palavras, mostra a quantidade de água armazenada no solo que não é drenada por efeito da gravidade, que só pode ser removida do solo por evapotranspiração. Esse parâmetro está diretamente relacionado com o armazenamento de água no solo (*soil storage*), uma vez que sempre que o armazenamento no solo exceder o armazenamento matricial (ou seja, *soil storage* > *tension storage*), irá ocorrer percolação da camada do solo acima do lençol freático (CABRAL,2014). A percolação no solo (*soil percolation*) indica o limite de percolação do armazenamento do solo para as águas subterrâneas superficiais. A taxa de percolação real é uma função linear do armazenamento atual no solo e o armazenamento atual na camada superior do lençol.

Os demais parâmetros (GW 1 storage, GW 1 percolation, GW 1 coeff., GW 2 storage, GW 2 percolation e GW 2 coeff.) apresentaram menor sensibilidade quando comparados aos demais. Tais parâmetros estão relacionados ao armazenamento nas camadas mais subterrâneas do solo

O Gráfico 2 mostra a sensibilidade dos parâmetros do SMA. Foram analisados intervalos entre 0% a 120% de variação em incrementos de 10%. Cada parâmetro foi variado individualmente mantendo os demais constantes. Assim, as mudanças percentuais no valor de nash foram então plotadas contra a variação percentual de cada parâmetro.

Gráfico 2- Sensibilidade dos parâmetros

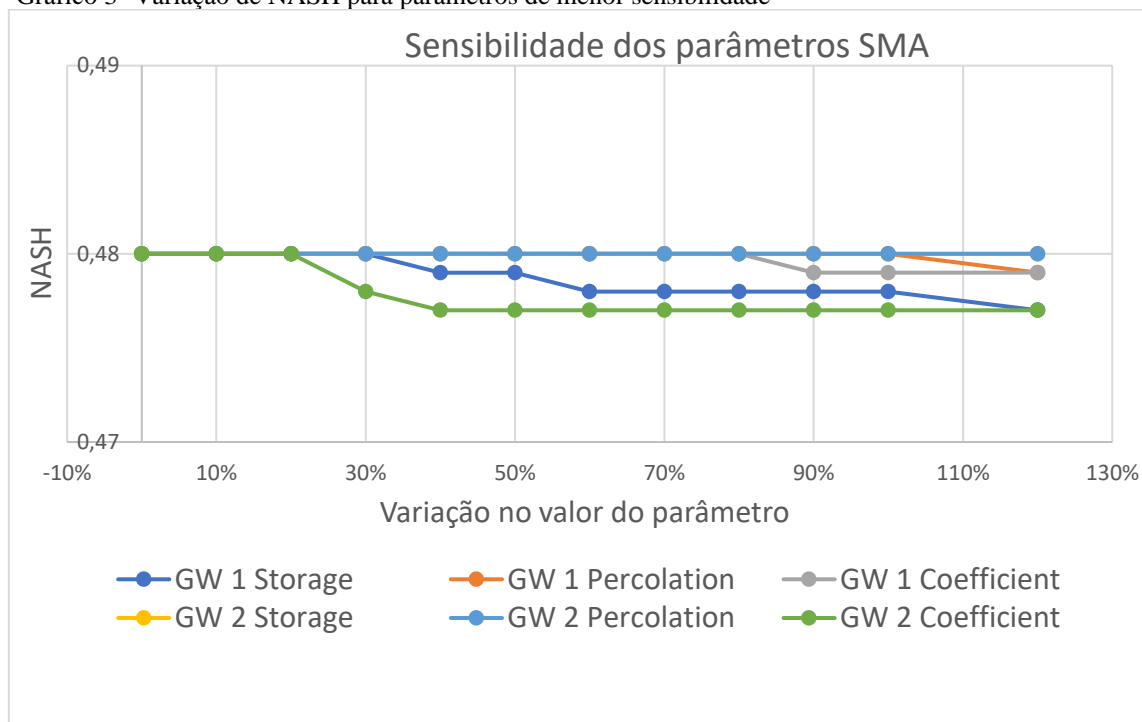


Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo procedimento foi feito para os parâmetros de menor sensibilidade. Notou-se que os parâmetros Gw 1 Storage, Gw 2 Storage, Gw 1 Percolation, Gw 2 Percolation,

Gw 1 Coefficient e Gw 2 Coefficient apresentaram uma variação de 0,1% no valor de Nash para cada mudança com incremento de 10%. O Gráfico 3 apresenta a variação de nash com o incremento no valor dos parâmetros.

Gráfico 3- Variação de NASH para parâmetros de menor sensibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

Feita essa análise, foi possível obter um melhor conhecimento a respeito dos parâmetros do modelo, sabendo quais deveriam ter uma maior atenção e cuidado na sua variação e, assim, atingir melhores valores no processo de calibração manual.

## 4.2 Calibração Manual e Validação do Modelo SMA

No primeiro momento foi realizada uma calibração manual mudando os valores dos parâmetros a cada fase de interação do modelo, buscando o melhor ajuste dos dados calculados com os observados através de inspeção visual. O conjunto de parâmetros definido na calibração pode ser observado na Tabela 6. Concluída a calibração do modelo, os valores dos parâmetros utilizados na validação do SMA.

Para analisar a eficiência da modelagem hidrológica foram usadas as seguintes métricas: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e a tendência percentual (PBIAS).



A Tabela 7 apresenta o desempenho da modelagem SMA para calibração manual entre os anos de fevereiro de 1964 a dezembro de 1985, e para a validação entre janeiro de 1986 a janeiro de 1988.

Tabela 6 - Parâmetros calibrados do modelo hidrológico SMA.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor Inicial</b>
Soil (%)	60	Soil Percolation (mm/hr)	0,88
Groundwater 1 (%)	10	GW 1 Storage (mm)	30
Groundwater 2 (%)	10	GW1 Percolation (mm/hr)	15
Max Infiltration (mm/hr)	3,15	GW1 Coefficient (h)	38
Impervious (%)	7,2	GW 2 Storage (mm)	8,3
Soil Storage (mm)	150	GW 2 Percolation (mm/hr)	4,5
Tension Storage (mm)	28	GW 2 Coefficient (h)	38

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 7 - Eficiência da modelagem do SMA

<b>Fase</b>	<b>PBIAS</b>	<b>NS</b>
Calibração	1,20%	0,51
Validação	1,20%	0,42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos na calibração e validação do modelo apresentam valores satisfatórios de acordo com a classificação proposta por LIE et al. (2007).

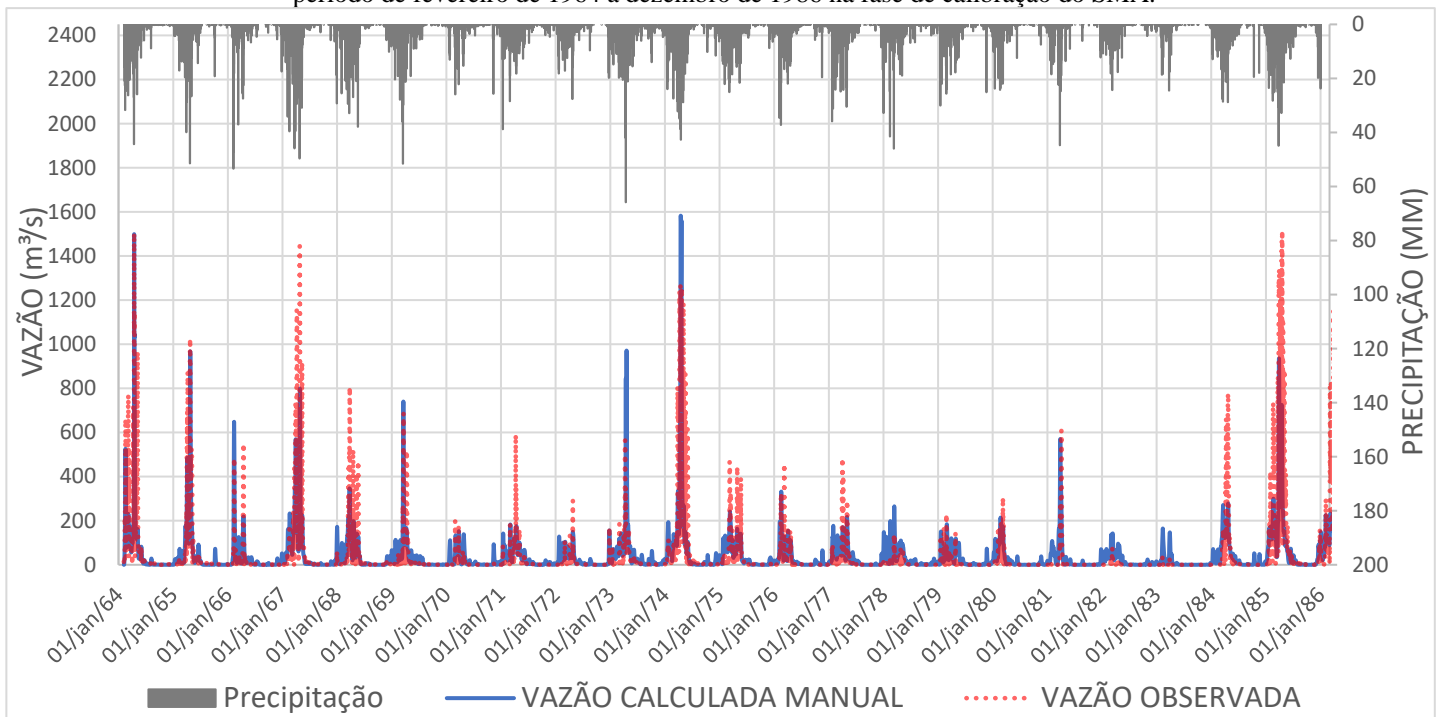
No que diz respeito a período de calibração e validação, Trabalhos como os de Cabral (2014) e Santos (2013) utilizaram menores períodos para calibração. Cabral (2014) avaliou a aplicabilidade do módulo SMA em uma bacia do semiárido nordestino e usou como períodos de calibração de janeiro de 1979 a dezembro de 1995. Santos (2014) aplicou o SMA em uma bacia na Zona da Mata de Pernambuco. O período de janeiro a dezembro de 2000 foi usado como calibração do modelo e eventos de (1994,1997,2005,2008) foram usados para sua validação. Neste trabalho, optou-se por usar um período mais longo de calibração visando perfazer uma maior amplitude de dados de vazão.

A análise visual dos hidrogramas da vazão simulada e observada, e do hietograma da precipitação média observada, para o período de calibração do modelo SMA do HEC-

HMS é apresentado no Gráfico 4, e o período de validação no gráfico 6.

Os hidrogramas foram plotados através do HEC-HMS e em seguida exportados para o software Excel, onde foi realizado o cálculo das métricas na escala mensal uma vez que o programa fornece dados apenas na escala diária. Após a conclusão da fase de elaboração dos hidrogramas sintéticos pelo HEC-HMS, foi feita a comparação com os hidrogramas reais observados. O hidrograma do Gráfico 4 corresponde a calibração dos parâmetros de forma manual.

Gráfico 4- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de fevereiro de 1964 a dezembro de 1986 na fase de calibração do SMA.



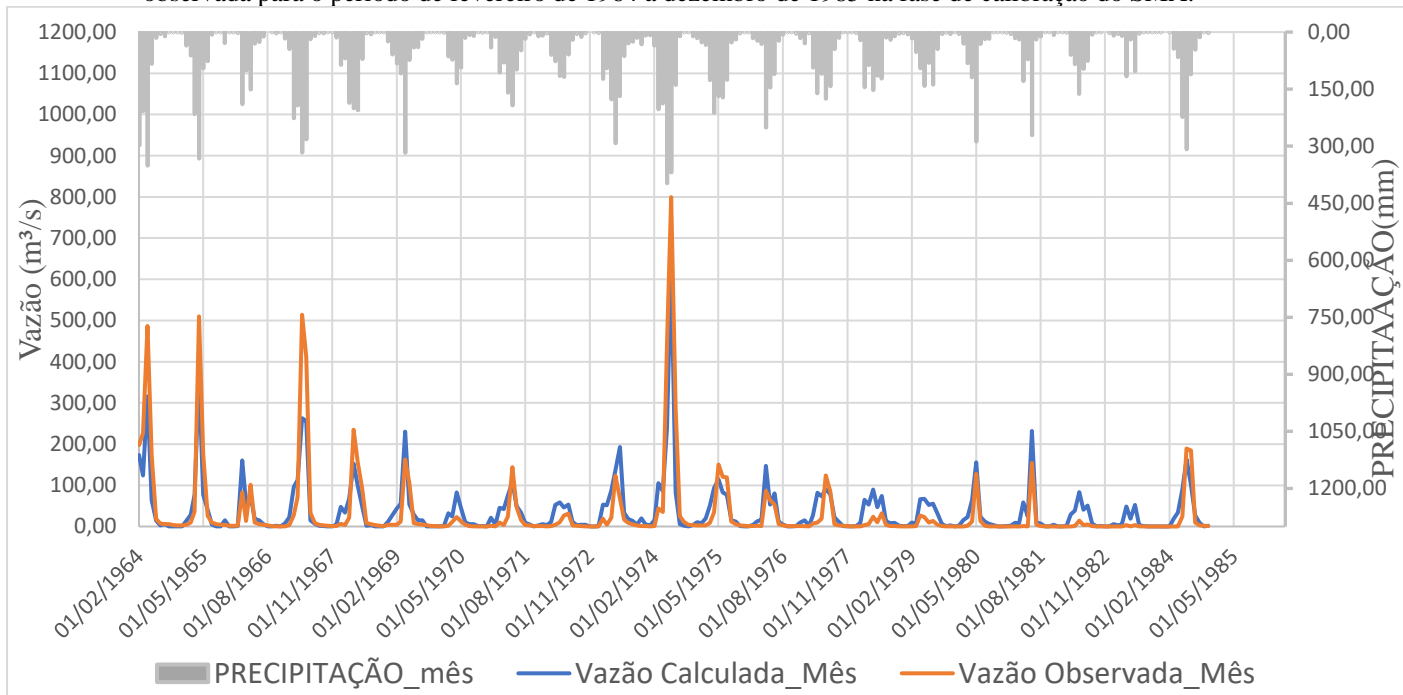
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar o Gráfico 2, nota-se um bom ajuste de vazões calculadas para vazões baixas no sistema. Contudo, quando se trata de vazões mais altas, percebe-se uma divergência como podemos ver nos anos de (1967, 1974 e 1985). Alguns Picos de vazões calculadas não condizem com os resultados de vazões observadas. Isso pode estar relacionado a forma de parametrização do SMA como também a baixa densidade pluviométrica na bacia.

De maneira geral, as séries calculadas apresentam boa consistência com dados observados, com períodos de estiagem e cheias ajustados razoavelmente na estação fluviométrica em questão. Podemos assim constatar uma boa coerência na parametrização do SMA.

Buscando um melhor entendimento da variação sazonal das vazões foram calculados os valores das vazões mensais, referente a calibração manual, e apresentados no Gráfico 5. Observa-se que a vazão máxima calculada acompanhou bem os picos de vazão medidos e houve uma boa relação nos tempos de vazão máxima observados. Avaliando-se a calibração do modelo, observa-se que as maiores diferenças são encontradas nos períodos em que as vazões ultrapassam o valor de 400 m<sup>3</sup>/s.

Gráfico 5- Hidrograma da vazão simulada e observada mensal e hietograma da precipitação média mensal observada para o período de fevereiro de 1964 a dezembro de 1985 na fase de calibração do SMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos das métricas de desempenho da modelagem hidrológica na fase de calibração do SMA na escala mensal. Os hidrogramas na escala mensal podem ser vistos nos Gráficos 5 e 7.

Tabela 8 - Eficiência da modelagem do SMA na escala mensal

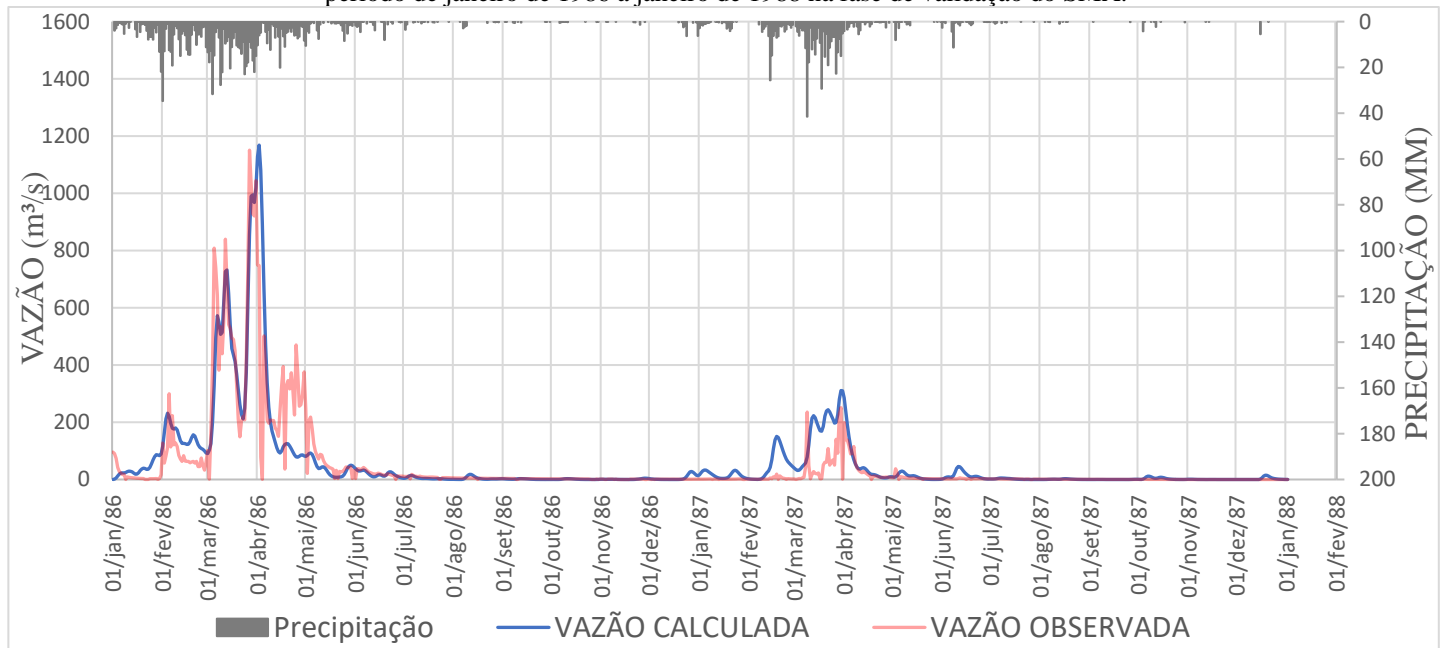
Fase	PBIAS	NS
Calibração	-14,51%	0,79
Validação	-1,11%	0,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de NS e PBIAS na escala mensal apresentam um maior desempenho em virtude das variabilidades existentes na escala diária quando comparadas na escala mensal e até mesmo anual. Na escala diária a aleatoriedade dos eventos é mais proeminente já na mensal é mais fácil de se encontrar uma tendência para esses valores.

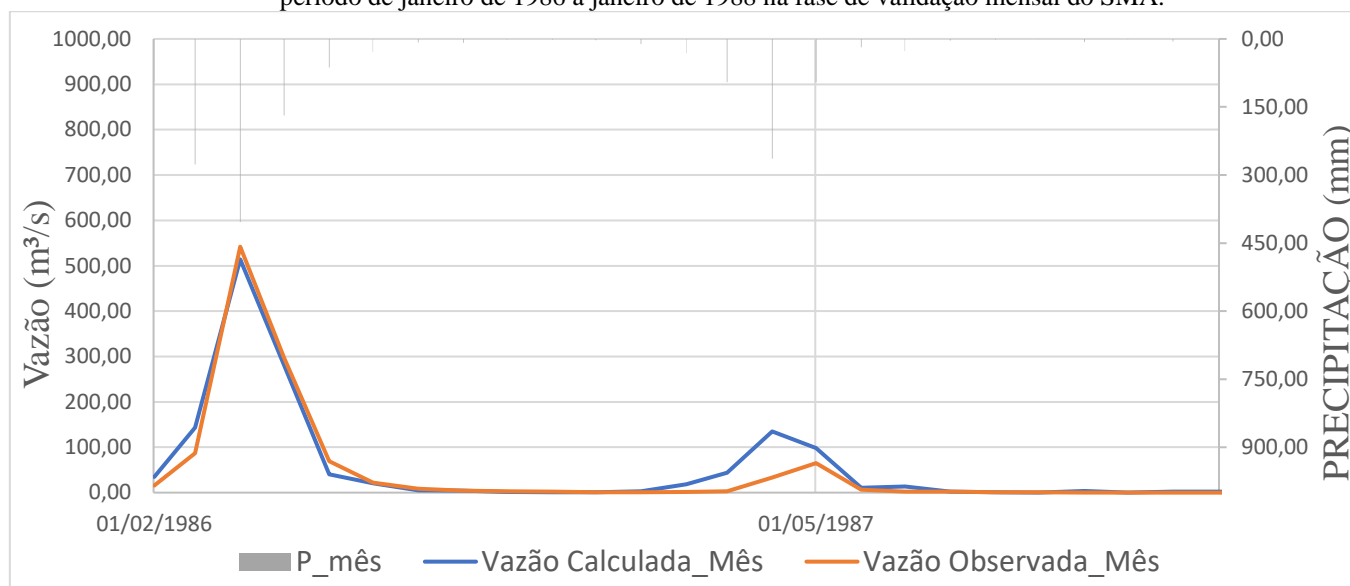
Os hidrogramas resultantes de cada evento simulado na fase de validação tanto na escala diária como na escala mensal podem ser vistos nos Gráficos 6 e 7. Os valores obtidos na validação foram inferiores aos valores da calibração tanto para disposição diária dos dados como mensal. Como o período de validação é uma resposta ao treinamento do modelo, é normal que esses valores sejam maiores ou bem próximos.

Gráfico 6- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1986 a janeiro de 1988 na fase de validação do SMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7- Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1986 a janeiro de 1988 na fase de validação mensal do SMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Calibração utilizando as Funções objetivo

A calibração automática no HEC-HMS tem como finalidade minimizar uma Função Objetivo (FO) pelo método iterativo. O número de interações pode ser escolhido no programa, bem como a FO a ser utilizada. Optou-se por utilizar três Funções Objetivo separadamente e avaliar seu desempenho, a saber: Erro absoluto médio (MAE), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e Raiz do Erro Quadrado Médio (RMSE). Destaca-se que a RMSE provê um peso maior para desvios de vazões de maiores valores apresentados nos diagramas calculados e observados. O ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico objetivou maximizar a Função Objetivo NS e minimizar RMSE e MAE.

Após escolher o número de interações e a Função Objetivo a otimizada, são escolhidos os parâmetros a serem calibrados e o período de calibração do modelo. Os parâmetros calibrados automaticamente no modelo hidrológico SMA são apresentados na Tabela 9.

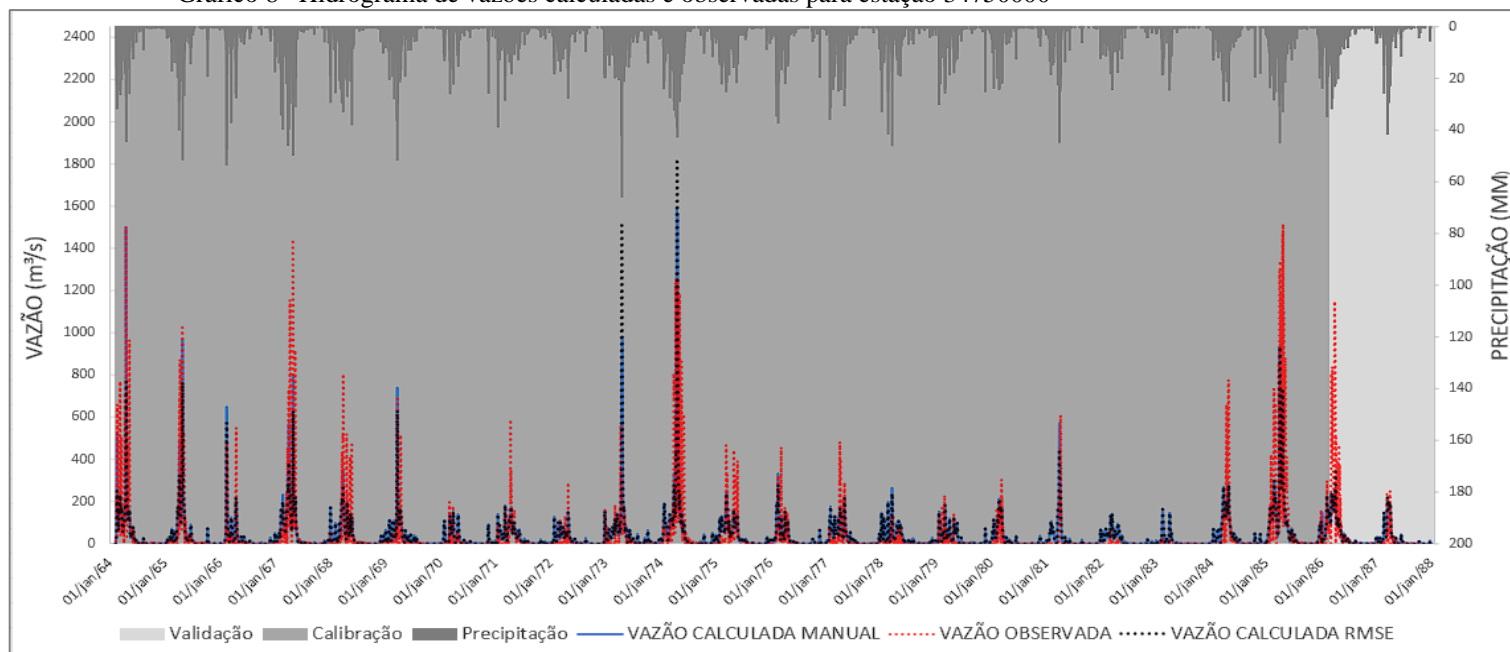
Tabela 9 – Calibração dos parâmetros com as funções objetivo

Parâmetros	Valores dos parâmetros para as respectivas F. O			Parâmetros	Valores dos parâmetros para as respectivas F. O		
	NASH	RMSE	MAE		NASH	RMSE	MAE
Soil (%)	60	60	60	Soil Percolation (mm/hr)	0,75	1,2	3,3
Groundwater 1 (%)	10	10	10	GW 1 Storage (mm)	30	37,3	38,5
Groundwater 2 (%)	10	10	10	GW1 Percolation (mm/hr)	18,6	18,6	19,6
Max Infiltration (mm/hr)	2,9	3,19	3	GW1 Coefficient (h)	40,5	60,38	58
Impervious (%)	7	7	7,2	GW 2 Storage (mm)	9	8,16	9,5
Soil Storage (mm)	210	170	160,5	GW 2 Percolation (mm/hr)	4,5	4,75	5,15
Tension Storage (mm)	26,5	24	28,5	GW 2 Coefficient (h)	45	49	49

Fonte: Elaborado pelo autor.

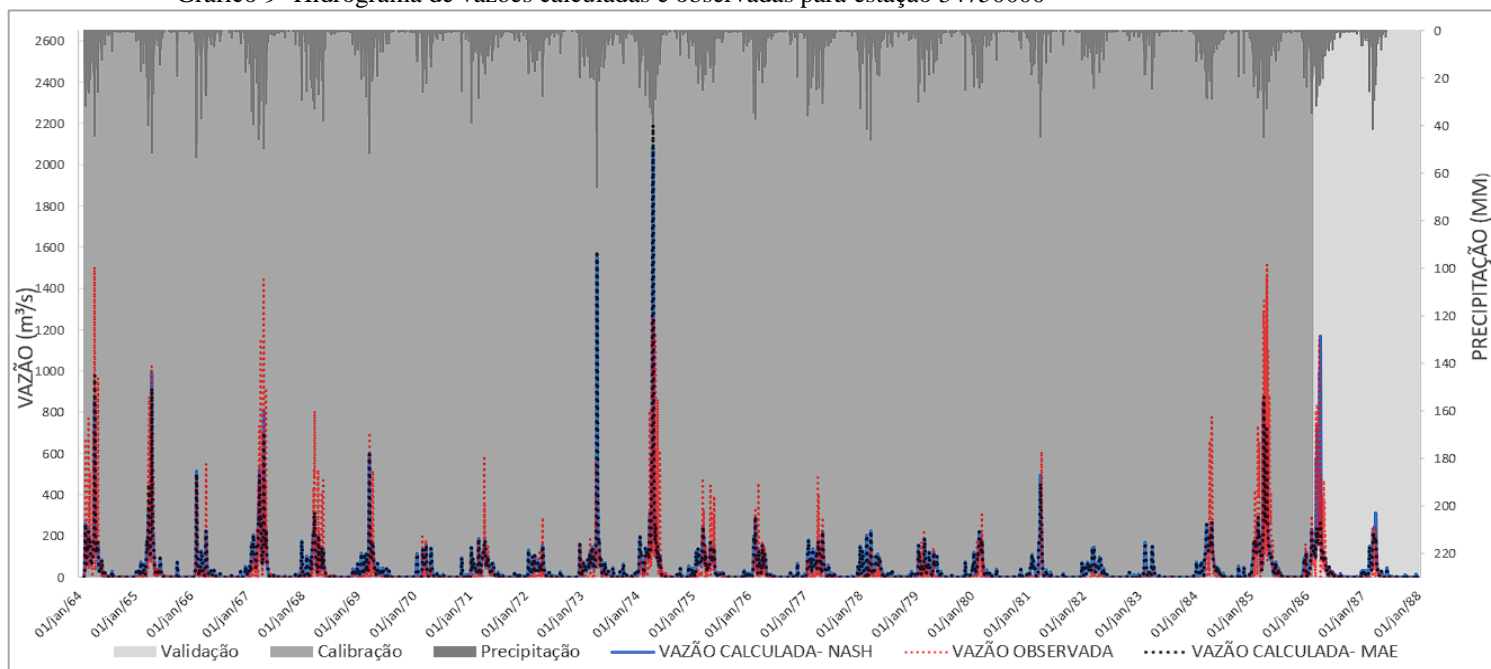
Os Gráficos 8 e 9 apresentam os hidrogramas de vazões observadas e calculadas na estação 34750000 para o período de calibração entre 1964 e 1986, e validação entre 1986 e 1988. A partir da observação das imagens, verifica-se que os valores de vazões referentes ao período de calibração e validação são muito próximos nas diferentes séries de vazões calculadas com os parâmetros ótimos das FOs NASH, MAE e RMSE. As FOs apresentam boa correlação de valores de vazão quando comparadas entre si.

Gráfico 8– Hidrograma de vazões calculadas e observadas para estação 34750000



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9- Hidrograma de vazões calculadas e observadas para estação 34750000



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta os valores otimizados atingidos utilizando as funções objetivo para o período de calibração e validação. Para cada otimização, existe um conjunto ótimo de parâmetros que pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 10 - Parâmetros ótimos na calibração do SMA de acordo com as funções objetivo e seus equivalentes para a estação 34750000

Função objetivo utilizada na calibração	Fase da modelagem	Valores ótimos das Funções Objetivo e seus equivalentes		
		NASH	MAE	RMSE
NASH	Calibração	0,52	34,20	99,04
	Validação	0,69	2,57	23,56
MAE	Calibração	0,49	34,20	99,93
	Validação	0,42	3,30	31,22
RMSE	Calibração	0,46	34,10	81,00
	Validação	0,45	3,310	30,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

As técnicas de análise apontam que as funções objetivos observadas apresentam um bom desempenho na definição de séries de vazões sintéticas. Os valores de NASH quando

comparados com a calibração manual, apresentaram maior desempenho quando otimizados pela função objetivo NASH tanto na fase de calibração quanto validação. Já nas demais F.O os valores foram inferiores a calibração manual, mas apenas na fase de calibração.

#### 4.4 Comparação com literatura

Rosa (2019) produziu séries sintéticas de vazão afluentes aos reservatórios da região hidrográfica dos sertões de Crateús utilizando o modelo SMAP. O SMAP se trata de um modelo de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão na escala mensal que possui 6 parâmetros na sua fase de calibração (Sat, PES, Crec, K, Ebin, Tuin). Rosa (2019) utilizou as funções objetivos NASH, RMSE e MAE no processo de calibração dos seus parâmetros. A Tabela 11 apresenta uma comparação entre o melhor resultado obtido na calibração para cada F.O apresentada neste trabalho com o trabalho de rosa (2019).

Tabela 11 - Comparação do melhor resultado para cada função objetivo

F.O	FASE DA MODELAGEM	VALORES ÓTIMOS DAS FUNÇÕES OBJETIVO E SEUS EQUIVALENTES					
		NASH		MAE		RMSE	
		AUTOR	ROSA (2019)	AUTOR	ROSA (2019)	AUTOR	ROSA (2019)
NASH	CALIBRAÇÃO	0,76	0,85	24,24	19,50	45,23	58,10
	VALIDAÇÃO	0,94	0,92	1,50	16,18	8,7	37,12
RMSE	CALIBRAÇÃO	0,71	0,72	25,00	19,65	49,5	77,40
	VALIDAÇÃO	0,54	0,94	3,22	14,56	25,35	23,9
MAE	CALIBRAÇÃO	0,77	0,70	23,90	18,71	44,7	81,00
	VALIDAÇÃO	0,52	0,93	3,29	10,82	28,86	26,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 12 podemos ver estatísticas descritivas das séries de vazões calculadas pelo modelo SMAP e o modelo SMA da calibração manual. Tais estatísticas fornecem dados sobre a amostra como média, mediana, valores máximos e mínimos e o desvio padrão da amostra.



Figura 12– Estatísticas das séries de vazões do modelo SMAP mensal e SMA mensal.

	Coluna1( NASH caio diario)	Coluna1( MAE caio diario)	Coluna1( RMSE caio diario)
Média	44.42	Média 42.26	Média 50.42
Mediana	7.84	Mediana 2.34	Mediana 3.97
Desvio padrão	102.86	Desvio padrão 133.64	Desvio padrão 139.035
Mínimo	0	Mínimo 0	Mínimo 0
Máximo	901.148	Máximo 1319.68	Máximo 1307.166
	Coluna1( NASH Autor diario)	Coluna1( MAE Autor diario)	Coluna1( RMSE Autor diario)
Média	38.25	Média 38.57	Média 36.43
Mediana	11.10	Mediana 11.04	Mediana 10.79
Desvio padrão	69.09	Desvio padrão 71.81	Desvio padrão 59.44
Mínimo	0	Mínimo 0	Mínimo 0
Máximo	690.98	Máximo 753.29	Máximo 600.23

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, os resultados das F.O apresentados nesse trabalho foram próximos aos obtidos por Rosa (2019). As maiores diferenças encontradas foram na fase de modelagem de validação das F.O RMSE e MAE. As diferenças poderiam se dar principalmente pelo fato de o modelo SMA apresentar um maior número de parâmetros que o modelo SMAP além de uma forma de cálculo diferente.

Os resultados de calibração e validação do modelo hidrológico SMA para o evento de 1964 a 1988 mostraram-se satisfatórios pois, de acordo com o coeficiente de *Nash- Sutcliffe* os valores ficaram dentro da faixa considerada aceitável tanto para os períodos de calibração quanto de validação.

De maneira geral, as séries simuladas apresentam boa consistência com dados de series observadas e, dessa forma, é possível afirmar a validade das series pseudo-históricas de vazão obtidas por essa metodologia.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia da modelagem hidrológica chuva-vazão diária na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús utilizando o módulo SMA do HEC-HMS.

A partir dos dados de vazão e precipitação gerou-se series pseudo-históricas de vazão que posteriormente foram comparadas em hidrogramas sintéticos com as series observadas de vazão. A calibração obtida tanto de forma manual como por otimização de uma função objetivo se mostraram de boa aproximação com os dados observados. Os resultados obtidos foram satisfatórios apresentando valores de *Nash- Sutcliffe* de 0.51 para o evento de 1964 a 1986 na fase de calibração e 0.42 na fase de validação. Os valores de NS variando entre a faixa de 0,36 e 0,75 são considerados satisfatórios para representação de modelos hidrológicos. Assim, o modelo representa bem as vazões ao longo do período de validação e calibração com uma razoável deficiência nos picos de vazões.

A análise feita da sensibilidade dos parâmetros do modulo SMA constatou que os valores de armazenamento do solo, taxa de percolação do solo, infiltração máxima taxa, porcentagem de área impermeável e armazenamento de tensão no solo foram considerados os parâmetros mais sensíveis a variações de NS quando são alterados em intervalos de 10% do seu valor.

As funções objetivos apresentadas nesse trabalho procura avaliar a qualidade do ajuste do modelo. Algumas são mais sensíveis aos erros de vazões máximas (RMSE) enquanto outras são especialmente utilizadas para avaliar o desvio geral do volume total calculado em relação ao observado. Os diferentes métodos de análise apontam que as funções objetivos analisadas apresentam um bom desempenho na determinação de séries de vazões sintéticas. Os valores de calibração e validação apresentados pelas funções objetivos são considerados satisfatórios

O modelo representou de forma satisfatória as vazões ao longo dos períodos de calibração e validação do modelo. As funções objetivo ajudaram a amortecer os desvios nos picos de vazão na parametrização do SMA. A capacidade de simulação utilizando o SMA do HEC-HMS mostrou-se eficaz para estimar as vazões, auxiliando as possíveis demandas dos recursos hídricos e garantindo a vazão mínima regularizada na região hidrográfica dos sertões de Crateús.

Por fim, para estudos futuros, recomenda-se que:

- a) Comparar os resultados das séries de vazões diárias geradas pelo modelo SMA do HEC-HMS com outros modelos chuva-vazão presentes na literatura.
- b) Dividir a bacia da região hidrográfica dos sertões de Crateús em mais sub-bacias e determinar o Thiessen médio para essas sub-bacias e, dessa forma, calibrar os parâmetros do SMA para áreas menores
- c) Analisar os resultados do modelo-hidrológico obtidos e fazer simulações em possíveis eventos de cheia aplicados a região hidrográfica dos sertões de Crateús.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A., B., ROSA, C., S. ANÁLISE DE FUNÇÕES OBJETIVO NO CONTEXTO DA DETERMINAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO EM BACIA DO SEMIÁRIDO NORDESTINO. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v.24, n. 2, p.67-82, 2021.
- BASHAR, K. E. Comparative performance of soil moisture accounting approach in continuous hydrologic simulation of the Blue Nile. **Water Science and Engineering**, v. 5, p.1-10, 2012.
- BENNETT, T. H. e PETERS, J. C. Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). **Water Resources Management**, v.10, p 1-10, 2000
- CABRAL, S.L, CAMPOS, J.N. B, SILVEIRA, C.S. Modelagem de vazões e umidade do solo de uma bacia do semiárido brasileiro: aplicação do modelo Soil Moisture Accounting (SMA) do HEC-HMS. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 2014.
- CABRAL, S.L. Intervalo de tempo de máxima previsibilidade no acoplamento de modelos climáticos e hidrológico para o gerenciamento de reservatório, 2014. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – DEHA - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- CAMPOS, J. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza, CE: ASTEF/ Expressão Gráfica, 2009.
- CHU, X. e STEINMAN, A. Event and Continuous Hydrologic Modeling with HECHMS. **Journal of the Irrigation and Drainage**. En., v.135, n. 1, p. 11
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. (Tese Doutorado) 2001.
- COLLISCHONN, 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, 2003.
- EVANGELISTA, Francisco Igor Siqueira. **Previsão climática sazonal para a região hidrográfica dos sertões de Crateús utilizando redes neurais artificiais**. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2019.
- Faurès et al. (1995) Impact of small scale rainfall variability on runoff simulation. **Journal of Hydro. Amsterdam, The Netherlands**, Vol. 173, 309-326. Citado por Woolhisier (1996)
- FELDMAN, A. D. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual. **US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center**
- FRAGOSO Jr., C.R., FERREIRA, T.F., MARQUES, D.M. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo: Oficina Textos. 304p. 2009.
- GARCÍA, A., SAINZ, A., REVILLA, J. A., ALVÁREZ, C., JUANES, J. A., e PUENTE, A. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. **Journal of Hydrology**, 356(3-4):312-326.2008.

GOLIAN, S., SAGHAFIAN, B., e FAROKHNIYA, A. Copula-based interpretation of continuous rainfall–runoff simulations of a watershed in northern Iran. *Can. Journal of Earth Science*. 49:681-691.2012.

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

GYAWALI, R., e WATKINS, D.W. Continuous hydrologic modeling of snow-affected watersheds in the great lakes basin using HEC-HMS. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18:29-39. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2003**. Rio de Janeiro, 2003.

KNECHTEL, Maria do Rosário. Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada. Curitiba: Intersaberes, 2014.

LENHART. K.; ECKHARDT. N.; FOHRER; FREDE H.G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*. v.27, p.645–654, 2002.

MERRITT, W.S., LETCHER, R.A., JAKEMAN, A.J. A Review of Erosion and Sediment Transport Models. *Science Direct. Environmental Modelling Software*, p761–799. 2003.

MORIASI. D. N.; ARNOLD J. G.; VAN LIEW. M. W.; BINGNER. R. L.; HARMEL R. D.; VEITH. T. L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans. ASABE. v.50. n.3. p.885-900, 2007.

NASH, J. E. e SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, p. 282-290, 1970

OLIVEIRA, W, S; SILVA, T, A, A; NETO, A, R; PEREIRA, J, J, C. Aplicação do modelo HEC-HMS na modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio de contas, Bahia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.18, n.4, p.19-34, 2013.

PEREIRA, Samuel Martins. **Previsão climática sazonal para a região hidrográfica dos sertões de Crateús utilizando regressão linear múltipla**. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

PRESERVAÇÃO do meio ambiente: manifesto do chefe de Seattle ao presidente dos EUA. São Paulo: Babel Cultural, 1987.

ROSA, C, S. Operação de reservatórios do sistema de abastecimento dos municípios da região hidrográfica dos Sertões de Crateús. Curso de engenharia civil, Universidade Federal do Ceará, 2019.

SÁNCHEZ, Francisco Javier. **HEC-HMS Manual Elemental**. Universidade de Salamanca, Departamento de Geologia, Espanha, julho, 2009. 24 p.

SANTOS, A. K. Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio Mundaú. Recife. Universidade Federal de Pernambuco, 2013. 126p. (Dissertação de Mestrado)

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Comitê de bacias hidrográficas**. Fortaleza: SRH, 2013.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.

USACE. **Hydrologic Engineering Center (HEC)**. Davis, California, USA, 2012.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Lincoln, v.12, n.2, p.173-189, 2007

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin-American Meteorological Society**, Newark, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982