



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

**MODELAGEM APLICADA AO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS  
COM SUPORTE DE BASES DE DADOS DE ALTA DEFINIÇÃO ESPACIAL -  
APRIMORAMENTO DE MODELO CONCEITUAL CHUVA-VAZÃO  
CONCENTRADO**

Caruaru

2020

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

**MODELAGEM APLICADA AO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS  
COM SUPORTE DE BASES DE DADOS DE ALTA DEFINIÇÃO ESPACIAL -  
APRIMORAMENTO DE MODELO CONCEITUAL CHUVA-VAZÃO  
CONCENTRADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru

2020

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

V331m Vasconcelos, Hellen Xavier Tavares.  
Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos com suporte de bases de dados de alta definição espacial: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado. / Hellen Xavier Tavares Vasconcelos. - 2020.  
74 f. ; il.: 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2020.  
Inclui Referências.

1. Bacia hidrográfica. 2. Modelagem hidrológica. 3. Recursos hídricos. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2020-001)

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

**MODELAGEM APLICADA AO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS  
COM SUPORTE DE BASES DE DADOS DE ALTA DEFINIÇÃO ESPACIAL -  
APRIMORAMENTO DE MODELO CONCEITUAL CHUVA-VAZÃO  
CONCENTRADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de janeiro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr<sup>a</sup>. Rochele Sheila Vasconcelos (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a Deus, meu refúgio e fortaleza, e aos meus pais e meus irmãos, minha base e meu alicerce.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por mais essa conquista, por estar comigo em todos os momentos, por me mostrar que a vontade Dele é maior que a minha e que os seus planos são melhores que os meus, por me moldar a cada erro e acerto, por me ajudar a seguir em frente diante das dificuldades e pelo seu amor por mim, mesmo sem eu merecer.

Aos meus pais, Adlai Florêncio Vasconcelos Xavier e Alexei Xavier Tavares, pelos ensinamentos, por todo o cuidado e afeto, por serem modelos, por andarem junto comigo nessa caminhada e por me proporcionarem estar onde estou hoje. Aos meus irmãos, Noemy Xavier Tavares Vasconcelos e Ábner Xavier Tavares Vasconcelos, pelos conselhos e pela amizade que sempre me deram, pela sinceridade e honestidade perante as minhas ações, pela ajuda diante dos obstáculos e pelo ânimo nos momentos de tristeza. A toda minha família, que me ajudou a construir quem eu sou.

Ao meu namorado, Marcelo de Oliveira, pelo amor e carinho de todos os dias, por todo o apoio e compreensão às minhas escolhas, pela força nos meus piores momentos e por me ajudar a me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, Ayane, Luana, Amanda, Isabela, Anderson, Kennendh, Letônio, Felipe, Matheus, Bruno, Andrew, Alisson, Igor, Thayse e João Lucas, e a todos os outros amigos e colegas, por compartilharem os momentos bons e ruins do dia a dia da vida acadêmica e por tornarem o caminho mais leve.

Ao meu orientador, José Almir Cirilo, por me acolher tão bem durante a execução deste trabalho, pela paciência comigo e por mostrar, naturalmente, que as pessoas mais sábias são aquelas mais humildes.

A todos os meus professores do curso, pelo aprendizado e por contribuírem para o meu crescimento tanto profissional quanto pessoal.

Tudo neste mundo tem o seu tempo, cada coisa tem a sua ocasião. (Eclesiastes 3:1  
NTLH)

## RESUMO

Diante da importância do estudo das bacias hidrográficas para o suprimento hídrico da população surge a modelagem hidrológica, que possibilita a representação dos processos que ocorrem nas bacias. Os modelos hidrológicos têm sido utilizados como ferramentas capazes de prever eventos futuros relacionados ao regime hídrico, sendo instrumentos importantes para avaliar a melhor utilização dos recursos hídricos. Com isso, desenvolveu-se o modelo chuva-vazão concentrado Campus Agreste *Watershed Model* (CAWM), que busca a simplicidade e utilização de poucos parâmetros a calibrar. Buscou-se, então, aprimorar este modelo de simulação do ciclo hidrológico para uso e adequação nas condições da região Nordeste do Brasil. O trabalho teve como áreas de estudo as bacias hidrográficas do rio Capibaribe, do rio Sirinhaém, do rio Pajeú e do rio Moxotó. Para comparar a eficácia do CAWM, estudou-se o modelo *Génie Rural à 4 paramètres Journalier* (GR4J), modelo francês que possui os mesmos princípios que o CAWM quanto à pouca quantidade de parâmetros. Foram realizadas comparações entre as simulações realizadas nos dois modelos para as bacias em estudo. O desempenho foi avaliado através da comparação gráfica e análises estatísticas, determinando a qualidade e a confiabilidade das previsões com relação aos dados observados. Para Sirinhaém, os modelos apresentaram bom desempenho, e para Pajeú e Capibaribe, a calibração foi considerada satisfatória. A simulação do Moxotó nos dois modelos não foi adequada, o que já era esperado, devido à influência da barragem Poço da Cruz, que comprometeu os resultados. O modelo CAWM obteve melhores ajustes comparados com o modelo GR4J na maioria dos eventos em análise, comprovando a qualidade e a confiabilidade dos dados simulados por este modelo.

**Palavras-chave:** Bacia Hidrográfica. CAWM. GR4J. Modelo Hidrológico Chuva-Vazão.

## ABSTRACT

Given the importance of the study of watersheds for the water supply of the population arises hydrological modeling, which allows the representation of the processes that occur in the watersheds. Hydrological models have been used as tools capable of predicting future events related to water regime, being important instruments to evaluate the best use of water resources. With this, the Campus Agreste Watershed Model (CAWM) concentrated rain-flow model was developed, which seeks the simplicity and use of few parameters to calibrate. We sought to improve this model of simulation of the hydrological cycle for use and adaptation in the conditions of the Northeast region of Brazil. The study had as its study areas the watersheds of the Capibaribe River, Sirinhaém River, Pajeú River and Moxotó River. To compare the effectiveness of CAWM, we studied the GR4J model (Génie Rural à 4 paramètres Journalier), a French model that has the same principles as the CAWM regarding the small amount of parameters. Comparisons were made between the simulations performed in both models for the basins under study. Performance was evaluated through graphical comparison and statistical analysis, determining the quality and reliability of predictions relative to observed data. For Sirinhaém, the models presented good performance, and for Pajeú and Capibaribe, the calibration was considered satisfactory. The simulation of Moxotó in both models was not adequate, which was expected, due to the influence of the Poço da Cruz dam, which compromised the results. The CAWM model obtained better adjustments compared to the French model in most events under analysis, proving the quality and reliability of the data simulated by this model.

**Key words:** Hydrographic Basin. CAWM. GR4J. Rainfall-Runoff Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema do ciclo hidrológico.....	18
Figura 2 -	Esquema do modelo CAWM IV.....	25
Figura 3 -	Esquema do modelo CAWM V.....	29
Figura 4 -	Localização das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe, Pajeú, Sirinhaém e Moxotó .....	31
Figura 5 -	<i>Raster</i> da bacia do rio Moxotó.....	36
Figura 6 -	<i>Raster</i> com os vazios preenchidos .....	37
Figura 7 -	<i>Raster</i> com as direções do fluxo .....	37
Figura 8 -	<i>Raster</i> com as sub-bacias .....	38
Figura 9 -	<i>Raster</i> com a direção de drenagem .....	38
Figura 10 -	<i>Shapefile</i> com as sub-bacias.....	39
Figura 11 -	<i>Shapefile</i> com a rede de rios .....	39
Figura 12 -	Sub-bacia com exutório em Custódia .....	40
Figura 13 -	Sub-bacia com exutório em Sertânia .....	40
Figura 14 -	Sub-bacia com exutório em Inajá.....	41
Figura 15 -	Polígono de Thiessen da sub-bacia de Inajá .....	42
Figura 16 -	Hidrogramas com dados de Limoeiro.....	47
Figura 17 -	Hidrogramas com dados de Paudalho.....	48
Figura 18 -	Hidrogramas com dados de Toritama .....	49
Figura 19 -	Hidrogramas com dados de São Lourenço da Mata .....	50
Figura 20 -	Hidrogramas com dados de Floresta.....	51
Figura 21 -	Hidrogramas com dados de Sirinhaém .....	52
Figura 22 -	Hidrogramas com dados de Inajá.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Períodos de calibração para o Capibaribe, Pajeú e Sirinhaém.....	33
Tabela 2 -	Classificação das simulações hidrológicas .....	35
Tabela 3 -	Evaporações mensais para a estação de Floresta (código 82887) – Normais Climatológicas .....	44
Tabela 4 -	Elementos para o cálculo do K .....	45
Tabela 5 -	Classificação dos coeficientes utilizados como critério de ajuste.....	54
Tabela 6 -	Parâmetros obtidos na simulação do Moxotó .....	55
Tabela 7 -	Classificação dos coeficientes utilizados como critério de ajuste (Inajá).....	56
Tabela 8 -	Comparação do desempenho - melhores indicadores do ajuste.....	57

## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CAWM	Campus Agreste Watershed Model
GR4J	Génie Rural à 4 paramètres Journalier
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MGB	Modelo de Grandes Bacias
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NWS	National Weather Service
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
PBIAS	Percentual de tendência bias
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RSR	Razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIG	Sistemas de Informação Geográfica

SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWB	Simple Water Balance
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USP	Universidade de São Paulo
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
3.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	18
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS .....	19
3.3	MODELOS HIDROLÓGICOS DE REFERÊNCIA.....	20
3.4	MODELOS HIDROLÓGICOS E GEOPROCESSAMENTO.....	22
3.5	BASES DE DADOS ESPACIAIS .....	22
<b>3.5.1</b>	<b>Projeto SRTM.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Programa Pernambuco Tridimensional.....</b>	<b>23</b>
3.6	CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM) .....	24
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
4.1	ÁREAS DE ESTUDO.....	31
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS CAWM E GR4J ..	32
4.3	MODELAGEM PARA A BACIA DO RIO MOXOTÓ.....	35
<b>4.3.1</b>	<b>Dados pluviométricos e fluviométricos.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Geração de sub-bacias e rede de rios.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Cálculo da precipitação média e vazões .....</b>	<b>41</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Elementos característicos da sub-bacia para calcular o parâmetro K.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Cálculo do parâmetro S .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Dados de evaporação.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.7</b>	<b>Modelagem hidrológica no CAWM.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.8</b>	<b>Comparação entre os modelos CAWM e GR4J .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>

5.1	SIMULAÇÕES PARA O CAPIBARIBE, PAJEÚ E SIRINHAÉM .....	47
5.2	SIMULAÇÃO PARA MOXOTÓ .....	54
5.3	COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO ENTRE O CAWM E GR4J PARA O CAPIBARIBE, PAJEÚ, SIRINHAÉM E MOXOTÓ .....	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A – Classificação percentual dos coeficientes estatísticos.....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE B – Coeficientes de critério de ajuste.....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE C – Hidrogramas .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida, sendo importante para a alimentação humana e animal, a pecuária, a geração de energia, a navegação, o lazer e outras atividades relacionadas à vida no planeta. Segundo Mendes e Cirilo (2013), houve uma diminuição da disponibilidade hídrica em diversas áreas do Brasil e do mundo nas últimas décadas, então se torna necessária uma eficiente gestão dos recursos hídricos. As bacias hidrográficas são de grande relevância nesse contexto, pois garantem o suprimento hídrico de regiões através de diferentes formas de uso e ocupação, como atividades industriais e agropecuárias, áreas de cultivo e urbanas, entre outras (VIANA *et al.*, 2018).

Diante disso, Andrade *et al.* (2016) afirmam que estudos voltados para a compreensão de processos hidrológicos em bacias hidrográficas contribuem para a preservação dos recursos ambientais e, por conseguinte, no desenvolvimento das regiões. A modelagem hidrológica é uma ferramenta utilizada para representar os processos físicos de um sistema e de gerar informações normalmente não disponíveis, e, portanto, de fundamental importância para gestão e tomada de decisões relativas ao uso da água e do solo. De acordo com Melo (2010), a modelagem computacional pode oferecer benefícios para a gestão racional e as decisões operacionais, pois contribui para maximizar os recursos oferecidos pelos reservatórios.

Apesar de o Brasil conter a maior reserva de água doce disponível no planeta, sua distribuição espacial se dá de forma irregular, resultando no contraste entre regiões com escassez e regiões onde há água excedente (LEÃO, 2010). A região Nordeste contém a maior parte do semiárido brasileiro, o qual é caracterizado pelo balanço hídrico negativo, acarretando em consequentes secas periódicas. Em regiões onde se predomina esse tipo de clima, grande parte da população depende fortemente da água da chuva, de sua captação e de seu armazenamento. É o caso de Pernambuco, em que o clima semiárido está presente no Sertão e em parte do Agreste do estado, com longos períodos secos e chuvas escassas e concentradas em poucos meses do ano.

Dentre as ações para melhorar a gestão dos recursos hídricos, destaca-se a criação de reservatórios através da implantação de barragens, que contribuem para reduzir a vulnerabilidade da população à seca. Os reservatórios possibilitam o atendimento às necessidades do abastecimento público, o controle de estiagens, a atenuação de cheias, o aproveitamento hidroelétrico, etc (RODRIGUES, 2017). Uma vez que esses reservatórios são a principal fonte de acesso à água para a população, faz-se necessária a coleta de informações desses locais para que haja a gestão desses recursos hídricos. Diante desse cenário, técnicas de

geoprocessamento são ferramentas úteis, e os modelos hidrológicos são eficazes para a obtenção de um plano ideal para o desenvolvimento das bacias hidrográficas.

Dentro desta perspectiva, este trabalho visa aprimorar o modelo chuva-vazão Campus Agreste *Watershed Model* (CAWM), recentemente desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Centro Acadêmico do Agreste (CAA), e adequá-lo à região Nordeste do Brasil. Desse modo, serão analisadas as modelagens das bacias do rio Capibaribe, do rio Sirinhaém, do rio Pajeú e do rio Moxotó. Além disso, será estudado um modelo de referência a fim de avaliar a eficácia entre este e o proposto no presente estudo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Para a pesquisa em questão, busca-se aprimorar o modelo concentrado CAWM de simulação do ciclo hidrológico, buscando facilidade de uso e adequação para as condições da região Nordeste do Brasil.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

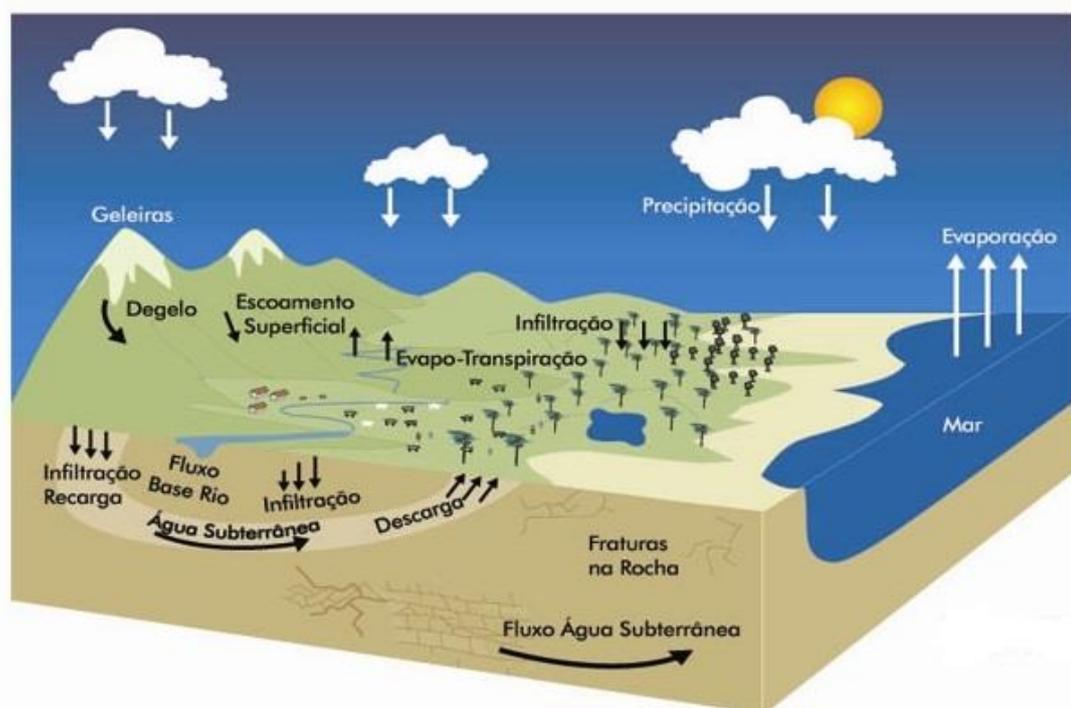
- Gerar um conjunto de simulações para futuramente criar a possibilidade de transferir valores de poucos parâmetros a calibrar entre bacias distintas, em processo de regionalização;
- Comparar a performance do CAWM com o modelo GR4J, cujo uso já é consagrado.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O ciclo hidrológico é a constante transformação da água na natureza por meio de fases e processos característicos (Figura 1). Entende-se como ciclo porque está sempre em circulação, mudando de estado e de lugar, e praticamente não há perdas e ganhos significativos em seu volume durante essa permanente movimentação. Todo esse processo pode ser representado matematicamente através da modelagem hidrológica, onde há a possibilidade de simular o escoamento superficial, a vazão na rede de drenagem, a infiltração da água no solo, etc (LIMA, 2011).

Figura 1 - Esquema do ciclo hidrológico



Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2019.

A modelagem hidrológica originou muitos modelos nas últimas décadas, que foram desenvolvidos de acordo com seus variados objetivos, e aprimorados, principalmente, com a disseminação do uso de computadores e a maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos. Os modelos hidrológicos são ferramentas que auxiliam os profissionais da área de recursos hídricos em vários aspectos, já que podem prever comportamentos de uma bacia hidrográfica sob diversas situações e possibilitam um melhor entendimento dos

fenômenos hidrológicos da bacia. Tais modelos têm sido ferramentas úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos, tendo em vista a sua função de prever eventos futuros relacionados ao regime hídrico que podem ser danosos à sociedade, como também um auxílio no processo de tomada de decisão nas políticas públicas (LIMA, 2011).

A calibração dos modelos hidrológicos é realizada através de testes, ajustando-se parâmetros de significado físico ou conceitual a partir de dados de entrada (precipitação, evaporação, características da bacia) processados para simular dados de saída (vazões dos rios) que são comparados com registros históricos de vazões ou níveis até que o modelo represente de forma adequada o comportamento real da bacia (BALTOKOSKI *et al.*, 2010).

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Lucas *et al.* (2009) e Tucci (2005), os modelos hidrológicos podem ser classificados em quatro critérios diferentes: contínuos ou discretos (quanto a forma de representar os dados); concentrados ou distribuídos (existência ou não de relações espaciais); estocásticos ou determinísticos (de acordo com os tipos de variáveis utilizadas); conceituais ou empíricos (quanto ao tipo de relação entre as variáveis); estacionários ou dinâmicos (quando existe dependência temporal). A seguir são explicados cada um deles, de acordo com Fayal (2008) e Cunha (2004).

**Modelos discretos e contínuos:** o modelo hidrológico é considerado discreto quando tem o intuito de representar eventos isolados, ou seja, modelam-se os períodos isolados de uma série de dados, normalmente eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar um longo período da série de dados, incorporando épocas de comportamentos hidrológicos distintos. Logo, este último apresenta uma estrutura mais detalhada, simulando todas as fases do ciclo hidrológico com maior literalidade. Porém, até os modelos contínuos também possuem discretização temporal, denominada passo de cálculo, pois, na maioria das vezes, os fenômenos são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo depende do fenômeno estudado, da disponibilidade dos dados e da precisão desejada nos resultados. Geralmente, quanto menor o intervalo de tempo, maior será a precisão dos resultados.

**Modelos estocásticos e determinísticos:** um modelo é considerado estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório, como, por exemplo, quando o nível futuro de um reservatório depende da vazão afluente futura, que é

uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. Determina-se o modelo como determinístico quando os conceitos de probabilidade forem negligenciados durante a sua elaboração. No entanto, nota-se que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída.

**Modelos conceituais e empíricos:** o modelo conceitual se baseia na representação dos processos físicos que compõem o fenômeno estudado. Este tipo de modelo relaciona as características físicas do processo mantendo razoável o empirismo na definição dos parâmetros. Enquanto isso, os modelos empíricos não apresentam nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Eles utilizam funções baseadas em análises estatísticas, sendo denominadas de modelos “caixa-preta”.

**Modelos estacionários e dinâmicos:** quando os parâmetros de um modelo não variam com o tempo ao descrever um fenômeno em determinado período, ele é considerado estacionário. Nos casos em que esses parâmetros variam com o tempo, os modelos são tidos como dinâmicos.

**Modelos concentrados e distribuídos:** os modelos concentrados visam obter resultados médios representativos em toda a bacia, não considerando a heterogeneidade das variáveis hidrológicas envolvidas no processo. Portanto, são utilizados os valores médios de chuva, evaporação, infiltração, vazões e outros elementos da bacia. Já os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia. Este tipo de modelo aplica a lei de conservação de massa em escala local e utiliza uma grande quantidade de informações como parâmetro de entrada.

### 3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS DE REFERÊNCIA

Os primeiros modelos, criados na década de 70, apresentavam muitos parâmetros a serem definidos de acordo com as características das bacias hidrográficas. Então se optou por construir modelos que utilizassem somente os parâmetros mais importantes para sua caracterização. Os resultados obtidos com essa simplificação foram equivalentes aos dos modelos que representavam quase todos os processos, devido à pequena sensibilidade dos parâmetros. O desconhecimento dos valores reais de todos os parâmetros de uma bacia também influenciou na necessidade de modelos mais simples. Dessa forma, surgiram os modelos concentrados, os quais representam bem os processos hidrológicos com uma quantidade menor de parâmetros a determinar (GOMES, 2019).

A literatura internacional sobre o assunto aponta alguns modelos hidrológicos marcados pela simplicidade e consagrados pelo uso. Um deles é o *Simple Water Balance Model* (SWB), desenvolvido pelo US *National Weather Service* (NWS). Esse modelo conceitual possui cinco parâmetros e duas variáveis de estado, e inclui dois reservatórios: o primeiro recebe a precipitação e o segundo se forma pelo escoamento superficial, após a saturação, onde atuam a evaporação e o escoamento subsuperficial. Todos os parâmetros são calibrados através da rotina computacional denominada *SCE-UA Algorithm*. O modelo funciona a partir de dados de precipitação e evapotranspiração e seu escoamento superficial se inicia assim que a taxa de precipitação ultrapassa a taxa de infiltração de água no solo (NASONOVA, 2011).

Outro modelo que busca simplicidade e é bastante utilizado é o *Génie Rural à 4 paramètres Journalier* (GR4J), originado na França. Trata-se de um modelo conceitual com quatro parâmetros calibráveis e dois reservatórios, um de recepção, que consiste em um reservatório de água no solo, e o outro da calha fluvial, o qual dá origem ao escoamento dos rios. Os dados meteorológicos de entrada consistem em precipitação diária e evapotranspiração potencial. As funções de transferência de água incluem a percolação do reservatório do solo, dividindo a precipitação efetiva em dois componentes, com um hidrograma unitário individual usado para cada componente. Um algoritmo de otimização passo a passo, baseado na pesquisa de gradiente local, é usado para a calibração (NASONOVA, 2011; PERRIN, 2004).

No Brasil, alguns modelos de poucos parâmetros também já foram desenvolvidos e aplicados em diversas bacias. Citam-se: o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), desenvolvido na Universidade de São Paulo – USP (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1982); modelo IPH II, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (TUCCI; ORDONEZ; LOPES, 1981); O MODHAC, também desenvolvido no IPH-UFRGS (VIRÃES, 2018); e mais recentemente, da mesma instituição, o MGB – IPH, Modelo de Grandes Bacias (COLLISCHONN, 2001).

O modelo hidrológico CAWM, abordado neste trabalho, é um modelo chuva-vazão concentrado que pode ser enquadrado na mesma categoria de modelos conceituais com poucos parâmetros, como os citados anteriormente na literatura internacional.

### 3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS E GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem a análise e o tratamento de grandes quantidades de dados georreferenciados, servindo como solução para problemas das mais variadas áreas de estudo que se deparam com a necessidade de representar a superfície da terra de forma coerente (MELO, 2010). As ferramentas computacionais chamadas SIG permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes, além de tornar possível a produção de documentos para a análise de recursos naturais, planejamento urbano, energia, transportes e comunicações (REBOUÇAS *et al.*, 2012).

A aplicabilidade dos modelos hidrológicos está diretamente relacionada com a qualidade dos dados envolvidos na simulação, o que torna as técnicas de geoprocessamento imprescindíveis para uma boa modelagem, já que estas auxiliam na aquisição, manuseio e integração de informações, colaborando na obtenção dos dados de entrada e de saída. O fato dos SIG atenderem as necessidades dos modelos hidrológicos torna essa ligação cada vez mais integrada, e essa área de considerável interesse e em crescente desenvolvimento. A compilação, calibração e visualização dos parâmetros do modelo e dos resultados são facilitadas pelo uso dessas ferramentas, além delas satisfazerem a qualidade e precisão dos dados exigidos pelo modelo através da interface com o usuário (MENDES E CIRILO, 2013).

As características das bacias hidrográficas, como sua forma e relevo, são fatores que influenciam o movimento da água, sendo assim essenciais para a maneira como o ciclo hidrológico ocorre. Além disso, a quantidade de água produzida tem relação direta com a caracterização das mesmas. Tendo em vista que os modelos hidrológicos processam essas informações em busca da simulação do ciclo da água, o uso dos SIG é fundamental para se conseguir dados mais próximos da realidade (MELO, 2010).

### 3.5 BASES DE DADOS ESPACIAIS

#### 3.5.1 Projeto SRTM

Diante da necessidade de obtenção de uma base altimétrica global confiável, foi estabelecido um projeto de cooperação entre diversas instituições entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), denominado *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Essa cooperação realizou

uma missão a bordo da nave Endeavour, realizada no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, cujo propósito foi atuar na produção de um banco de dados digitais para todo o planeta, necessários para elaboração de um Modelo Digital de Elevação – MDE (CIRILO *et al.*, 2014).

Foram coletados dados de alta resolução da superfície terrestre entre as latitudes 56°S e 60°N através de um método conhecido como interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*), onde duas antenas SAR coletaram dados de radar, separadas por um braço extensor de 60 metros e para geração de dados topográficos foi utilizado *software* interferométrico. Os dados são distribuídos em formato *raster* pelo EROS Data Center, controlado pelo *United States Geological Survey* (USGS). Os MDEs oferecem resolução vertical de 30 m para os Estados Unidos e 90 m para as outras localidades, sendo somente a base de dados SRTM-90 disponibilizada publicamente (EMBRAPA, 2013). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) fez um trabalho de interpolação e preenchimento de falhas para transformar os pontos cotados entre si de 90 m para 30 m, o que deu origem a TOPODATA, base de dados espaciais de todo território nacional (VALERIANO, 2008).

### **3.5.2 Programa Pernambuco Tridimensional**

O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) foi desenvolvido tendo como motivação auxiliar a encontrar soluções para contenção de grandes enchentes como as que ocorreram entre 2010 e 2011, atingindo drasticamente municípios da Mata Sul do Estado de Pernambuco. A Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) realizou um mapeamento a partir da varredura a laser do terreno que permitiu obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas. Esse perfilamento consiste no levantamento da altura de pontos sobre uma superfície através da emissão de raios laser, construindo uma espécie de maquete digital, que representa as variações de altitude do terreno (PERNAMBUCO, 2016).

Segundo Cirilo *et al.* (2014), esse trabalho foi feito inicialmente para as regiões alagadas (bacias do rio Una, Mundaú e Sirinhaém) e posteriormente para todo o estado de Pernambuco. Os produtos obtidos foram modelos digitais do terreno e de elevação com escalas 1:5000 (erro vertical inferior a 25 cm) e 1:1000 (erro vertical inferior a 10 cm) e as ortoimagens com escalas 1:5000 (pixel da imagem de 50 cm) e 1:1000 (pixel da imagem de 12 cm).

Foi mapeada uma área de 98.076 km<sup>2</sup>, abrangendo 184 municípios, totalizando 75 bilhões de pontos cotados. De acordo com Pernambuco (2016), os produtos possuem amplo potencial de utilização, como na área acadêmica, empresarial, ambiental e para o

desenvolvimento de infraestruturas no ambiente urbano e empreendimentos de maior porte que necessitem de detalhamento do terreno.

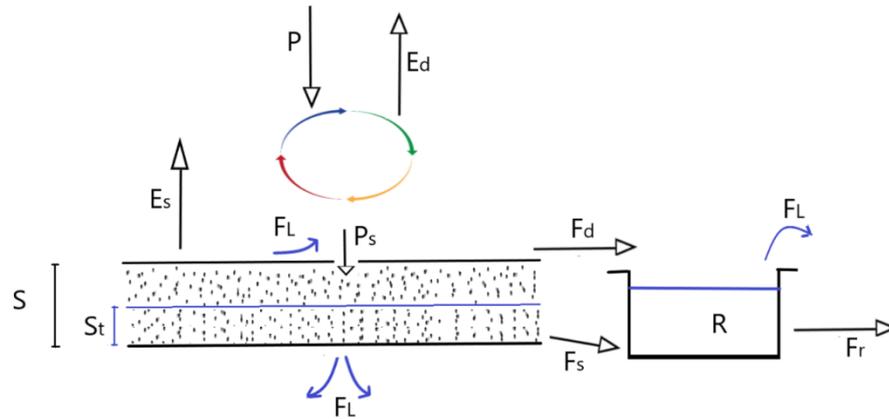
### 3.6 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)

O CAWM é um modelo hidrológico concentrado, desenvolvido recentemente no Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, que busca a simplicidade e utilização de poucos parâmetros de entrada para a calibração. Um de seus principais objetivos é a regionalização de parâmetros, onde é possível a transferência de seus valores entre bacias distintas, mas que possuam características semelhantes. São utilizadas técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais, como o PE3D e o SRTM para gerar informações úteis para entrada e saída de dados. A modelagem é feita através do programa Microsoft Office Excel, onde se utiliza a ferramenta *Solver* para encontrar a melhor solução.

Inicialmente, o modelo foi voltado para regiões com características semiáridas nas suas primeiras versões (I a IV), e em sua versão mais atual CAWM V buscou-se aprimorá-lo para modelar também o escoamento em bacias hidrográficas de regiões mais úmidas. No momento, as bacias hidrográficas utilizadas para a modelagem apresentam tempo de concentração que não excede um dia, uma vez que ainda não foram implementadas ferramentas para considerar o retardo do fluxo da bacia. Os dados de entrada utilizados no modelo são representados pelas características físicas e hidrológicas da bacia, podendo-se obter as primeiras através de imagens aéreas e de satélite, mapeamento do solo, Modelo Digital do Terreno (MDT) e as últimas consistem em séries de chuva, evapotranspiração e vazão. Baseando-se nos trabalhos de Feitoza (2019), Ferraz (2019) e Gomes (2019), integrantes da equipe de desenvolvimento do modelo CAWM, descreve-se em maiores detalhes a sistematização do mesmo.

Na versão CAWM IV o modelo consiste em dois reservatórios, um de recepção ( $R$ ) e outro subterrâneo ( $S$ ), localizado nas calhas dos rios. Seu esquema está representado na Figura 2. Com relação ao balanço chuva-evaporação, se houver precipitação suficiente, toda a evapotranspiração é consumida e descontada. Caso contrário, toda a precipitação é considerada como evapotranspiração direta ( $E_d$ ), a qual é somada à parcela que resta ( $E_n$ ), podendo ser total ou parcialmente removida do reservatório do solo ( $S$ ).

Figura 2 - Esquema do modelo CAWM IV



Fonte: Ferraz, 2019.

O excesso de chuva, denominado precipitação efetiva ( $P_n$ ), é subdividido em três parcelas: a recarga do solo ( $P_s$ ), a evapotranspiração complementar ( $E_s$ ) e o escoamento superficial direto para a calha fluvial ( $F_d$ ). A primeira é calculada por meio da Equação 1

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (1)$$

Onde  $S$  é a capacidade máxima de retenção de água no solo e  $S_t$  é o armazenamento de água no solo ao longo do tempo, ou seja,  $S$  é o valor máximo entre os valores de  $S_t$ .

A evapotranspiração complementar ( $E_s$ ), expressada na Equação 2, é extraída das camadas mais superficiais do solo e é limitada pela evapotranspiração potencial não atendida ( $E_n$ ). A magnitude desta variável depende do valor atribuído ao parâmetro  $\alpha$ , tendo em vista os dados pouco precisos que precisam ser ajustados. Este último pode variar de 0 a um valor elevado (50, por exemplo), o que significa nenhuma ou máxima evapotranspiração complementar, respectivamente.

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (2)$$

Descontando-se da precipitação efetiva ( $P_n$ ) a recarga do solo ( $P_s$ ) e a evapotranspiração complementar ( $E_s$ ), obtém-se o escoamento superficial direto para a calha fluvial ( $F_d$ ), dado pela Equação 3:

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (3)$$

A partir do reservatório da lâmina de água  $S_t$  armazenada no solo ocorre o fluxo  $F_s$ , o qual percola em direção ao reservatório da calha dos rios ( $R$ ). Este fluxo é representado pela Equação 4:

$$F_s = K_s \cdot S_t \quad (4)$$

Onde  $F_s$  é a percolação através do reservatório  $R$  e  $K_s$  é o parâmetro associado à permeabilidade do solo.

Os fluxos  $F_d$  e  $F_s$  são acrescentados à lâmina de água armazenada no reservatório  $R$ . Este reservatório não é limitado para considerar os extravasamentos em casos de cheias. A partir dele sai o escoamento fluvial ( $F_r$ ), expressado na Equação 5.

$$F_r = K \cdot R^b \quad (5)$$

Onde  $K$  é o parâmetro característico para cada sub-bacia,  $R$  é a lâmina de água na calha fluvial e  $b$  é definido como uma constante que tem o valor de 5/3, sendo este justificado adiante.

A expressão para o cálculo do parâmetro  $K$  foi desenvolvida com o intuito de regionaliza-lo dentro de uma mesma bacia. Considerando  $V_{sup}$  como volume de água acumulado em um período de tempo em todo o comprimento do rio, totalizando extensão de  $L_T$  e área de seção equivalente  $A_e$ , é definida a Equação 6:

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (6)$$

Nos modelos hidrológicos, os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica em km<sup>2</sup>, então a acumulação  $R$  é dada pela Equação 7.

$$R = \frac{V_{sup}}{C \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{C \cdot A_b} \quad (7)$$

Sendo a constante  $C = 1000$ , utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando a Fórmula de Manning para um canal aberto, simplificando a equação para seção transversal retangular de largura equivalente  $B_e$ , e assumindo o raio hidráulico como aproximadamente igual à lâmina escoada  $y$ , tem-se o escoamento representado pela Equação 8.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3}}{B^{2/3}} \cdot I^{1/2} \quad (8)$$

Onde  $A = B \cdot y$  e  $R_h = y$ .

Tendo-se  $V = A \cdot L$  como o volume de água acumulado num trecho de rio com comprimento  $L$ , a Equação 9 é obtida.

$$Q = \frac{I^{1/2}}{n \cdot L^{5/3} \cdot B^{2/3}} V^{5/3} = K \cdot V^{5/3} \quad (9)$$

De forma semelhante, a Equação 9 sugere que o valor do expoente  $b$  da Equação 5 seja estimado como  $5/3$ .

As equações subsequentes foram simplificadas considerando a área da seção transversal do rio,  $A_e$ , equivalente a largura superficial do rio,  $B_e$ . A Equação 10 mostra a relação entre a vazão  $Q$  ( $m^3/s$ ) e o escoamento  $F_r$  (mm).

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (10)$$

Onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em segundos.

Igualando-se a Equação 10 a Equação 8, tem-se:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} \cdot I^{1/2} \quad (11)$$

Isolando-se a área equivalente  $A_e$  na Equação 7 e substituindo-a na Equação 11, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \cdot \frac{I^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (12)$$

Substituindo-se a Equação 5 (com  $b = 5/3$ ) na Equação 12 e explicitando-se o  $K$ , chega-se à Equação 13, expressão final do parâmetro.

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left( \frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} \cdot I^{1/2} \quad (13)$$

Logo, o parâmetro  $K$  é calculado de acordo com as características físicas da bacia, as quais podem ser obtidas por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizando o modelo digital do terreno da área de estudo.

As perdas de água no sistema podem ser ocasionadas por volumes de retenção nas depressões de solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essas perdas, calculadas pela Equação 14, são extraídas do reservatório da calha fluvial ( $R$ ).

$$F_L = K_L \cdot R^{1,5} \quad (14)$$

Sendo  $F_L$  as perdas de água do sistema,  $K_L$  o coeficiente de perdas a ser calibrado no modelo e  $R$  a lâmina de água na calha fluvial. O expoente 1,5 tem sido testado e aprovado em diversas simulações desenvolvidas.

Portanto, os parâmetros utilizados para calibração desse modelo são:  $\alpha$ ,  $K_L$  e  $K_S$ . Até o momento, constata-se que é possível ajustar o modelo adequadamente com o parâmetro  $b = 5/3$  fixo. O parâmetro  $S$  pode ser calibrado ou estimado a partir da Curva Número médio ( $CN$ ) da bacia, que é calculado através da Equação 15.

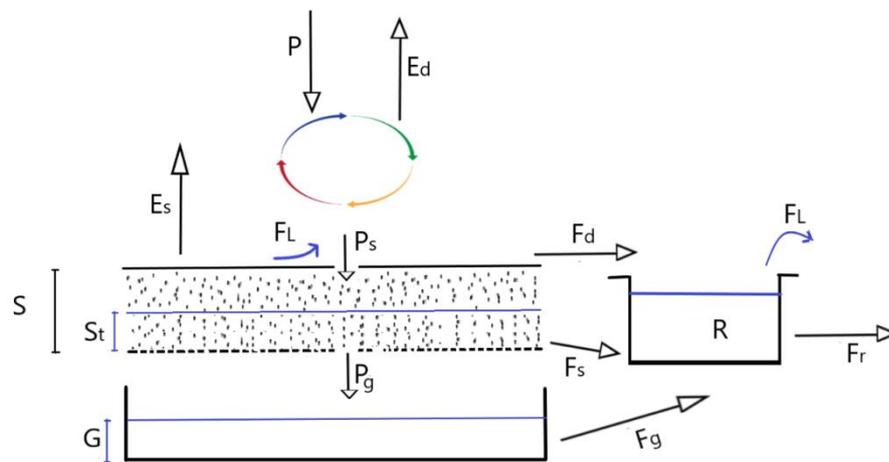
$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (15)$$

Para o cálculo dos parâmetros  $K$  e  $S$  são utilizadas as características físicas da bacia, permitindo a regionalização das vazões. O valor de  $CN$  é determinado a partir da utilização de mapas de solo, imagens aéreas e de satélite. O parâmetro  $K$  se mostrou adequado para rios

com baixas declividades, sendo sua magnitude da ordem de  $10^{-2}$  ou menor. Caso isso não aconteça, é necessário calibrá-lo ou adotar valores artificialmente elevados para a largura da seção equivalente  $B_e$  (FEITOZA, 2019).

A versão CAWM V difere da versão anterior pelo fato de contemplar os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos, onde, nos períodos de estiagem, são mantidas as vazões de base. Diante disso, a principal mudança em relação ao CAWM IV é a adição de um reservatório subterrâneo, que é alimentado quando o reservatório do solo torna-se saturado (Figura 3). A partir daí inicia-se um fluxo de percolação profunda ( $P_g$ ) que é conduzido para o reservatório subterrâneo, acrescentando-se a lâmina acumulada ( $G$ ). Com isso, ocorre o fluxo  $F_g$ , que alimenta o rio e complementa as parcelas  $F_d$  e  $F_s$ .

Figura 3 - Esquema do modelo CAWM V



Fonte: Ferraz, 2019.

O fluxo  $F_g$  é dado pela Equação 16:

$$F_g = K_g \cdot G \quad (16)$$

Onde  $K_g$  é um parâmetro de transferência de água no solo e será calibrado de forma similar ao  $K_s$ . O cálculo da percolação  $P_s$  foi modificado para a Equação 17 com o intuito de permitir a alimentação do reservatório subterrâneo.

$$P_s = S \cdot \left(1 - \frac{S_t}{2 \cdot S}\right) \quad (17)$$

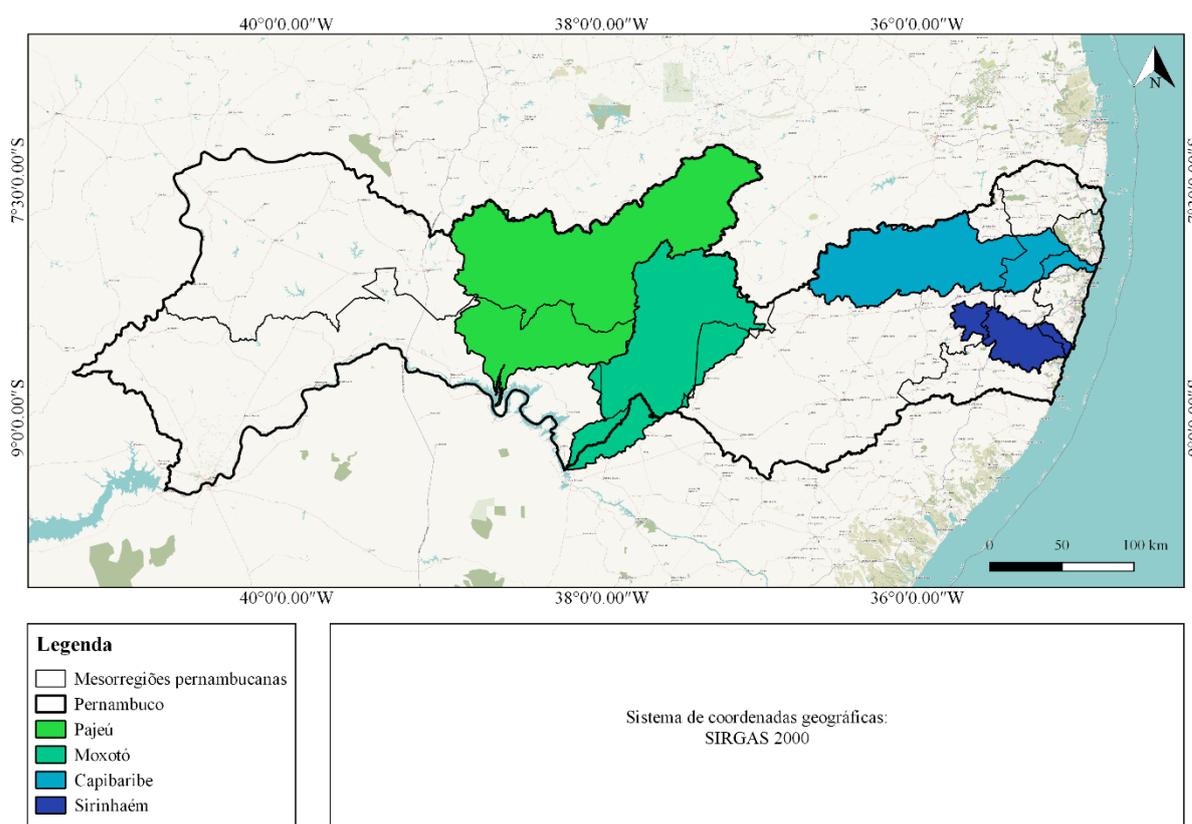
Quando  $S_t$  atinge o valor de  $S$ , o excesso passa a compor a percolação profunda  $S_g$ . Portanto, o modelo CAWM V pode ter três ou quatro parâmetros de calibração, dependendo da disponibilidade de dados para avaliar o parâmetro  $S$ .

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ÁREAS DE ESTUDO

De acordo com Pernambuco (2006), o Estado possui 28 bacias hidrográficas. O presente trabalho tem como área de estudo as bacias hidrográficas do Rio Pajeú, Capibaribe, Sirinhaém e Moxotó (Figura 4).

Figura 4 - Localização das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe, Pajeú, Sirinhaém e Moxotó



Fonte: a autora, 2019.

Segundo a APAC (2019), o rio Capibaribe percorre cerca de 280 km desde a sua nascente, na divisa dos municípios de Jataúba e Poção, até sua foz, em Recife. Este rio apresenta regime fluvial intermitente nos cursos alto e médio, tornando-se perene somente a partir do município de Limoeiro, no seu baixo curso. A sub-bacia está localizada na porção norte-oriental do estado de Pernambuco, entre 07° 41' 20" e 08° 19' 30" de latitude sul, e 34° 51' 00" e 36° 41' 58" de longitude oeste. Com área de 7.454,88 km<sup>2</sup> (7,58% da área do estado), abrange 42 municípios pernambucanos, dentre os quais foram selecionadas estações fluviométricas localizadas em Toritama, Limoeiro, Paudalho e São Lourenço da Mata.

O Rio Sirinhaém, com aproximadamente 158 km de extensão, nasce no município de Camocim de São Félix e é o principal curso d'água de sua bacia, localizada entre 08° 16' 05" e 08° 44' 50" de latitude sul, e 35° 01' 00" e 35° 47' 58" de longitude oeste. Esta possui uma área de 2.090,64 km<sup>2</sup> (2,13% da área do estado) e envolve 19 municípios.

A bacia do Rio Pajeú, a maior bacia do Estado de Pernambuco, está localizada entre 07° 16' 20" e 08° 56' 01" de latitude sul, e 36°59' 00" e 38°57' 45" de longitude oeste, com área de 16.685,63 km<sup>2</sup> (correspondendo a 16,97% da área do Estado), nasce no município de Brejinho e percorre aproximadamente 354 km, desaguando no lago de Itaparica, no Rio São Francisco. Sua área de drenagem envolve 27 municípios e o regime fluvial do seu rio é intermitente. A estação fluviométrica selecionada localiza-se no município de Floresta.

A nascente do rio Moxotó é próxima à divisa entre os estados de Pernambuco e Paraíba, no município de Sertânia. O rio possui uma extensão de cerca de 226 km. A bacia hidrográfica do rio Moxotó está situada, em sua maior parte, no Estado de Pernambuco, estendendo-se na sua porção sudeste para o Estado de Alagoas até o rio São Francisco. A bacia se localiza entre 07° 52' 21" e 09° 19' 03" de latitude sul, e entre 36° 57' 49" e 38° 14' 41" de longitude oeste, possui uma área total de 9.744,01 km<sup>2</sup>, dos quais 8.772,32 km<sup>2</sup> pertencem ao estado de Pernambuco (8,92% de sua área), situando-se em sua maior parte no Sertão do Moxotó. Esse trecho abrange áreas de 12 municípios, dos quais Inajá e Sertânia estão totalmente inseridos na bacia. Os municípios com sede na bacia são Arcoverde, Custódia, Ibimirim, Manari e Tacaratu, enquanto os parcialmente inseridos são Buíque, Floresta, Jatobá, Igaraci e Tupanatinga. A estação fluviométrica selecionada localiza-se no município de Inajá.

#### 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS CAWM E GR4J

Em busca do aprimoramento do modelo CAWM e para a comparação de resultados, estudou-se o modelo francês denominado *Génie Rural à 4 paramètres Journalier* (GR4J), proposto por Perrin, Michel, Andréassian (2003). Como os dois modelos apresentam em comum a estrutura de poucos parâmetros, visou-se comparar o resultado entre eles e verificar a possibilidade de contribuição do GR4J para o melhoramento do modelo CAWM.

O GR4J possui dois reservatórios, um de interceptação e um de armazenamento, e seus dados de entrada compreendem a área da bacia hidrográfica, a evapotranspiração e a série de dados de chuva e vazão. De acordo com Traore *et al.* (2014), tal modelo possui quatro parâmetros: capacidade máxima do reservatório de produção (X1), coeficiente de troca

das águas subterrâneas (X2), capacidade máxima do reservatório de roteamento (X3) e tempo de base do hidrograma de retardo da bacia, em dias. O modelo é satisfatório quando o critério de *Nash-Sutcliffe*, utilizado como adequação, é superior a 0,70, de acordo com os dados disponíveis. Perrin, Michel, Andréassian (2003) e Traore *et al.* (2014) oferecem mais detalhes sobre a descrição do modelo e as equações utilizadas, bem como algumas aplicações.

Tendo em mãos essas informações e a planilha Excel na qual foi estruturada a versão do GR4J utilizada, foram selecionadas as bacias do Rio Capibaribe, do Rio Pajeú e do Rio Sirinhaém, as quais se adequaram bem ao modelo CAWM, para serem empregadas no modelo GR4J. Para as duas primeiras bacias, utilizou-se a versão CAWM IV e para a última, a versão CAWM V, já que se trata de um rio perene em região mais úmida, que corta pequena parte do Agreste em direção à Mata Sul Pernambucana. A bacia do rio Moxotó será abordada no tópico 4.3.

Os dados de entrada inseridos na planilha do GR4J foram: a série de chuva média, a série de vazão no ponto de exutório de cada sub-bacia, a evapotranspiração mensal e a área de drenagem das regiões em estudo. Para o Capibaribe, os dados utilizados foram no intervalo total dos anos de 1966 a 2018; para Pajeú, de 1972 a 2018; e para Sirinhaém, de 1993 a 2017. Para a comparação dos resultados, utilizou-se o mesmo período de calibração nos dois modelos (Tabela 1). Estes períodos foram escolhidos com base no comportamento gráfico e melhores coeficientes estatísticos após a calibração dos maiores eventos observados nos hidrogramas gerados para cada região com o modelo CAWM.

Tabela 1 - Períodos de calibração para o Capibaribe, Pajeú e Sirinhaém

<b>Estações fluviométricas</b>	<b>Data inicial</b>	<b>Data final</b>
<b>Limoeiro</b>	10/02/1985	30/05/1985
<b>Paudalho</b>	03/03/1977	01/07/1977
<b>Toritama</b>	22/04/1977	22/05/1977
<b>São Lourenço da Mata</b>	01/05/1974	01/06/1974
<b>Floresta</b>	10/04/1988	09/06/1988
<b>Sirinhaém</b>	17/10/1993	09/06/1995

Fonte: autora, 2019.

O desempenho dos modelos foi avaliado usando a comparação gráfica e análises estatísticas para determinar a confiabilidade e a qualidade das previsões com relação aos dados observados. Para cada sub-bacia as vazões observadas e calculadas em cada modelo foram postas num mesmo hidrograma a fim de comparar visualmente as curvas e analisar a

eficácia de um com relação ao outro. Isso foi feito tanto para o intervalo de tempo total da série de dados como para o período de calibração.

Para uma melhor visualização dos resultados, optou-se por fazer análises estatísticas dos coeficientes empregados como critério de ajuste, sendo eles: *Nash-Sutcliffe Efficiency* (*NSE*), percentual de tendência bias (*PBIAS*) e razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações (*RSR*). Segundo Bellon (2014), o valor do *NSE* representa, graficamente, o ajustamento dos dados simulados aos observados, podendo variar de  $-\infty$  a 1 (Equação 18). Nessa análise, também foram aplicadas as versões Raiz e Logarítmica do *Nash* (Equações 19 e 20, respectivamente).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{obs,med})^2} \quad (18)$$

$$NSE_{raiz} = 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{calc}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs,med}})^2} \quad (19)$$

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum(\log(Q_{obs}) - \log(Q_{calc}))^2}{\sum(\log(Q_{obs}) - \log(Q_{obs,med}))^2} \quad (20)$$

Sendo  $Q_{obs}$  a vazão observada,  $Q_{calc}$  a vazão calculada e  $Q_{obs,med}$  a média das vazões observadas.

O *PBIAS*, cuja expressão é mostrada na Equação 21, é a medida percentual da tendência das vazões simuladas serem maiores ou menores que as vazões observadas, onde são indicadas boas simulações quando os valores são próximos de zero ou com baixa magnitude, e, caso a fórmula de cálculo considerar valores simulados menos valores observados, o resultado positivo indica que a vazão calculada é superestimada, e se for negativo, subestimada (BELLON, 2014).

$$PBIAS = \frac{\sum(Q_{calc} - Q_{obs}) * 100}{\sum Q_{obs}} \quad (21)$$

O coeficiente *RSR* é a normalização da Raiz do Erro Quadrático Médio (*RMSE*) por meio da divisão pelo desvio padrão das vazões observadas, tornando o coeficiente adimensional e permitindo que seja usado mais facilmente para comparar os resultados das simulações. A expressão é dada pela Equação 22:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{calc,med})^2}} \quad (22)$$

Onde  $Q_{calc,med}$  é a média das vazões calculadas.

A relação de valores classificados como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório para cada coeficiente utilizado na calibração é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das simulações hidrológicas

<b>Classificação</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>	<b>RSR</b>
<b>Muito boa</b>	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
<b>Boa</b>	0,65 a 0,75	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
<b>Satisfatória</b>	0,50 a 0,65	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
<b>Insatisfatória</b>	$< 0,50$	$PBIAS > \pm 25$	$RSR > 0,70$

Fonte: adaptado de Moriasi *et al.*, 2007.

### 4.3 MODELAGEM PARA A BACIA DO RIO MOXOTÓ

A comparação entre os modelos CAWM e GR4J explanada no item anterior foi feita para bacias que se adequaram bem ao modelo CAWM em simulações realizadas anteriormente. Já para a bacia do Rio Moxotó, o processo foi feito desde o início, ou seja, a partir da coleta e manipulação de dados que posteriormente foram utilizados na calibração dos modelos. No caso do modelo CAWM, além dos dados hidrometeorológicos também foi preciso encontrar os parâmetros  $K$  (característico de cada sub-bacia) e  $S$  (capacidade máxima de retenção de água no solo). Ambos foram calculados com base nas características físicas da bacia, as quais foram obtidas através de técnicas de geoprocessamento.

#### 4.3.1 Dados pluviométricos e fluviométricos

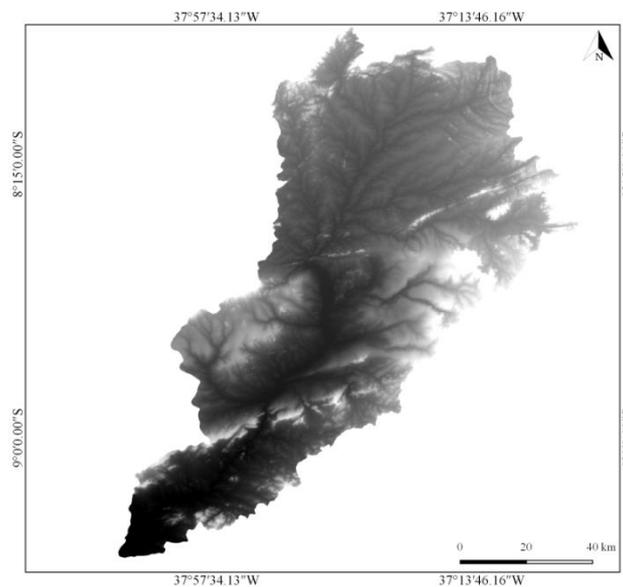
Os dados de chuva e vazão utilizados foram os disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), adquiridos no Portal Hidroweb. As estações pluviométricas com dados disponíveis totalizaram-se em 48, considerando as localizadas dentro da bacia e as mais próximas a ela. Com relação às fluviométricas, que consistem nas vazões que ocorrem nos exutórios das sub-bacias, constaram em 3, sendo elas situadas nos municípios de Inajá

(código 49160000), Sertânia (código 49100000) e Custódia (código 49130000). Como se trata de um modelo concentrado, cada sub-bacia foi representada por uma precipitação média, a qual foi obtida com o auxílio de técnicas de geoprocessamento, através do método de Thiessen, que será abordado a posteriori.

#### 4.3.2 Geração de sub-bacias e rede de rios

Seguiu-se com os procedimentos para a geração da bacia do rio Moxotó e das suas sub-bacias e redes de rios através do software QGIS, anteriormente conhecido como Quantum GIS, que é um Sistema de Informação Geográfica de código aberto que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Foi utilizada a base de dados espaciais do SRTM da região. A bacia em questão foi delimitada no *raster* do SRTM (Figura 5) a partir do uso do *shapefile* das bacias hidrográficas de Pernambuco, tendo o cuidado de abranger a pequena parte que fica em Alagoas.

Figura 5 - *Raster* da bacia do rio Moxotó



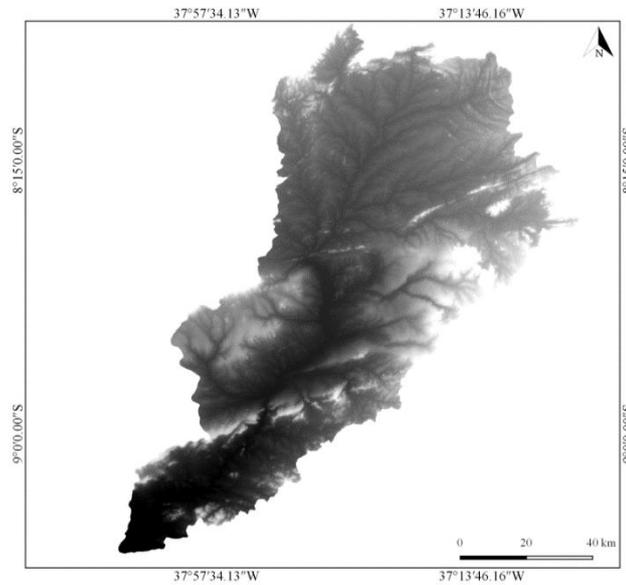
Fonte: a autora, 2019.

Com base no *raster* gerado da bacia, os próximos passos foram realizados com o auxílio das ferramentas dos Comandos GRASS GIS 7, algoritmos disponíveis no QGIS:

- a. Para preencher os vazios do relevo da bacia, utilizou-se a ferramenta “r.fill.dir”, gerando o *raster* *Depressionless* DEM, mostrado na Figura 6. A partir dessa

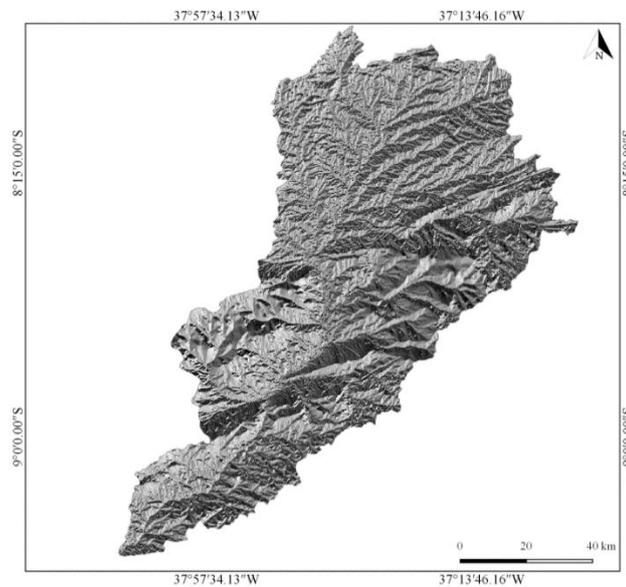
ferramenta também gerou-se o *raster Flow direction*, com a direção do fluxo (Figura 7);

Figura 6 - *Raster* com os vazios preenchidos



Fonte: a autora, 2019.

Figura 7 - *Raster* com as direções do fluxo

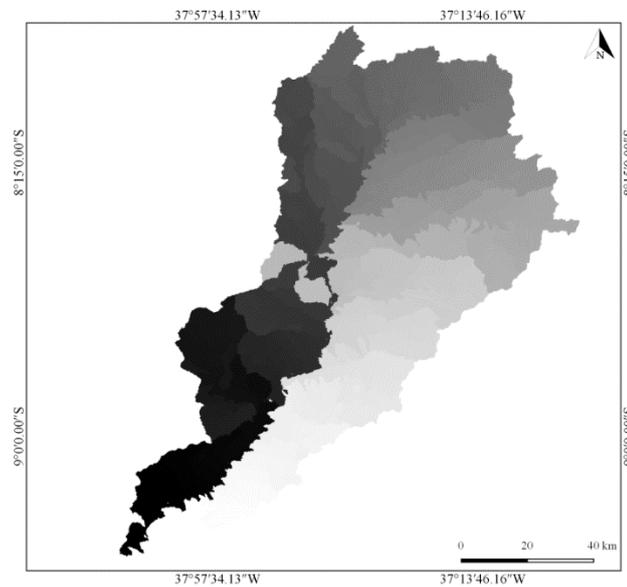


Fonte: a autora, 2019.

- b. Com o algoritmo “*r.watershed*”, foram gerados três produtos a partir do *raster* de entrada com os vazios preenchidos: *Half-basins* (Figura 8), *Stream segments* e *Drainage direction* (Figura 9), representando as sub-bacias, a rede de rios e a

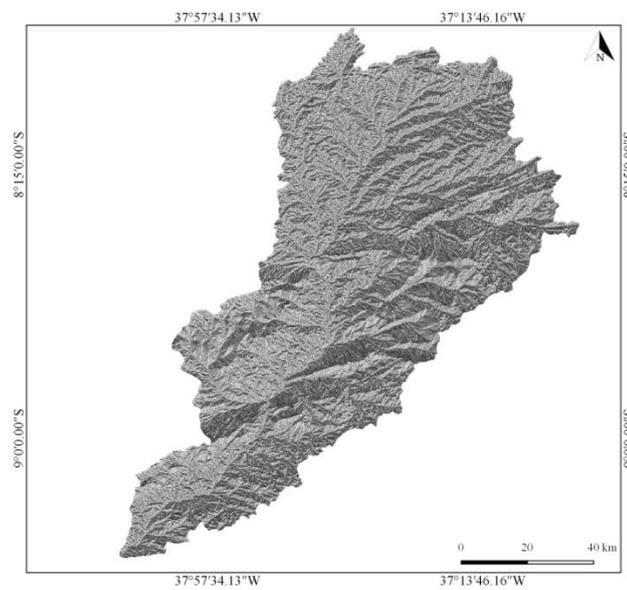
drenagem da bacia, respectivamente. Preencheu-se a linha “Minimum size of exterior watershed basin” com o valor de 500 no intuito de representar um detalhamento razoável para os devidos fins. Caso se desejasse apenas o rio principal, esse valor poderia ser da ordem de 25000 ou 50000, por exemplo;

Figura 8 - *Raster* com as sub-bacias



Fonte: a autora, 2019.

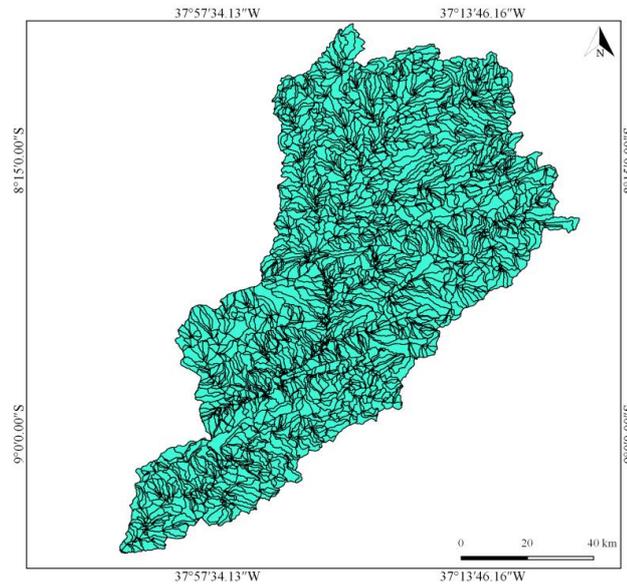
Figura 9 - *Raster* com a direção de drenagem



Fonte: a autora, 2019.

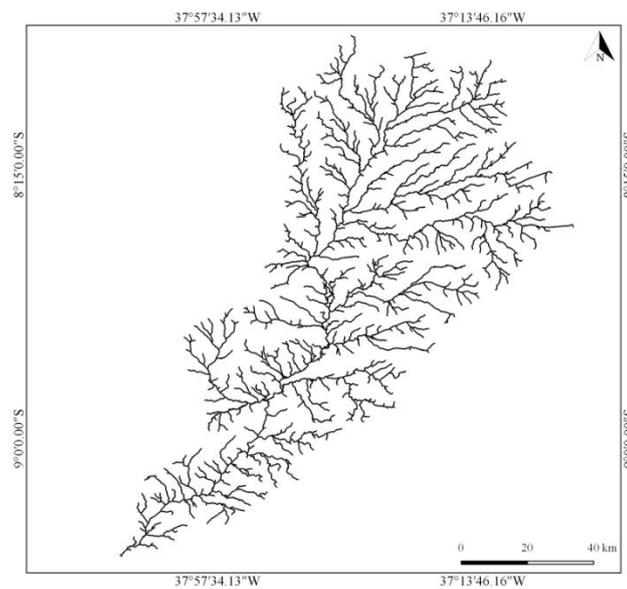
- c. Os arquivos acima originados ainda estão em formato *raster*. Para vetorizar as sub-bacias e a rede de rios, empregou-se a ferramenta “r.to.vect”, tratando-se naturalmente o primeiro como um vetor de áreas e o segundo, de linhas. Ambos são representados nas Figuras 10 e 11;

Figura 10 - *Shapefile* com as sub-bacias



Fonte: a autora, 2019.

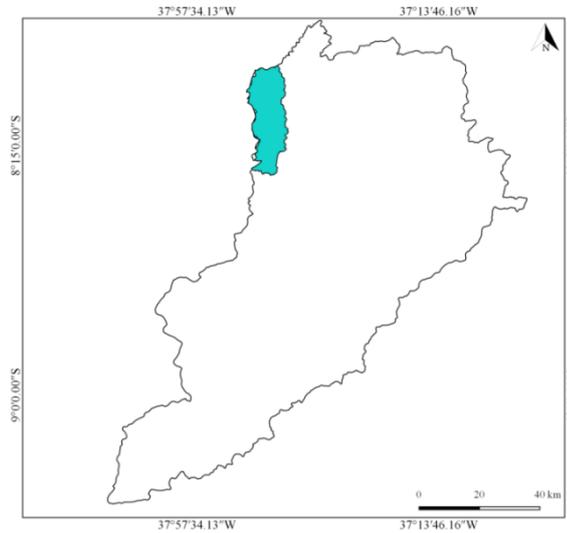
Figura 11 - *Shapefile* com a rede de rios



Fonte: a autora, 2019.

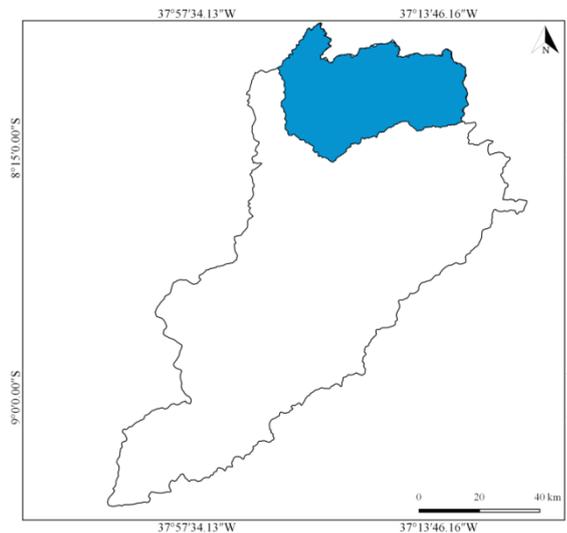
- d. Como o objetivo foi gerar sub-bacias a montante das estações de monitoramento, foram registradas as coordenadas em UTM de cada estação fluviométrica através da ferramenta “Captura de coordenadas”, tendo o cuidado de verificar se de fato os pontos coincidiram com as redes de rios. A geração das três sub-bacias se deu a partir do algoritmo “r.water.outlet”, tendo como *raster* de entrada o *Drainage direction*, onde foram inseridas as coordenadas dos exutórios obtidas. As sub-bacias geradas foram vetorizadas utilizando-se o mesmo procedimento citado no item anterior, as quais são mostradas nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 12 - Sub-bacia com exutório em Custódia



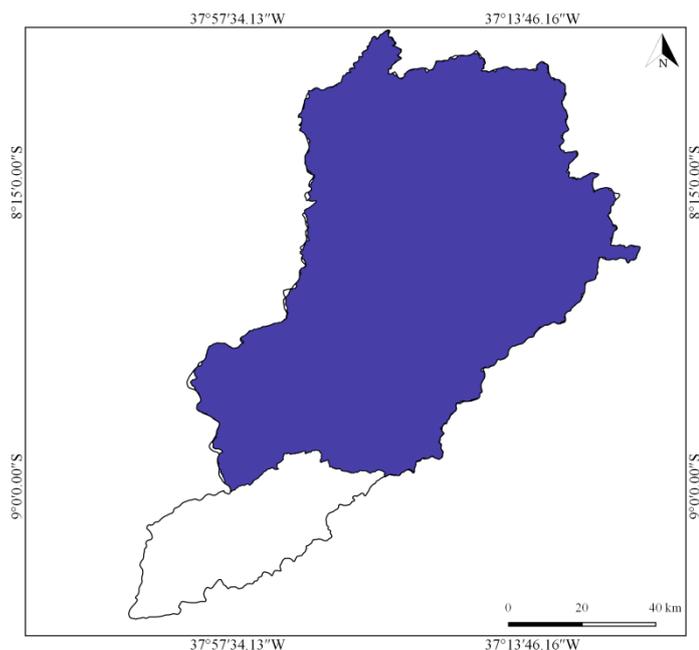
Fonte: a autora, 2019.

Figura 13 - Sub-bacia com exutório em Sertânia



Fonte: a autora, 2019.

Figura 14 - Sub-bacia com exutório em Inajá



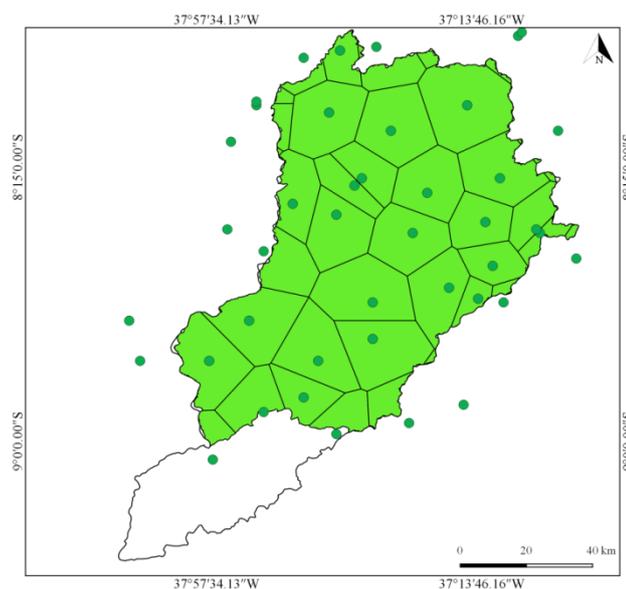
Fonte: a autora, 2019.

O processo descrito foi feito novamente para cada sub-bacia, no intuito de encontrar as redes de rios, as quais serão utilizadas posteriormente.

#### 4.3.3 Cálculo da precipitação média e vazões

Tendo em mãos as sub-bacias definidas e os postos pluviométricos, prosseguiu-se com o cálculo da chuva média de cada uma delas. Para isso, empregou-se o método de Thiessen, que foi aplicado com o auxílio do software QGIS e da linguagem de programação Python. O método de Thiessen, também chamado de método dos polígonos de Thiessen, consiste em atribuir um fator de peso aos totais precipitados medidos em cada posto pluviométrico, sendo estes pesos proporcionais à área de influência de cada posto. Estas áreas de influência foram determinadas nos mapas das sub-bacias contendo a localização dos postos através da ferramenta “Polígonos de Voronoi” disponível no QGIS. A Figura 15 mostra o resultado das áreas de influência para o posto de Inajá. O mesmo processo foi feito para os outros dois postos, mas eles não serão mostrados daqui em diante, já que ao final deste tópico serão descartados por motivos explicados num momento posterior.

Figura 15 - Polígono de Thiessen da sub-bacia de Inajá



Fonte: a autora, 2019.

As informações da camada *shapefile* gerada foram exportadas como um arquivo do Excel, e em seguida, deu-se início a utilização do algoritmo com a linguagem de programação Python, utilizada para gerar a chuva média a partir dos dados presentes nos postos pluviométricos e das áreas de influência obtidas anteriormente, como também gerar as séries de vazões. As rotinas de programação geraram matrizes contendo os dados de todas as estações pluviométricas no intervalo de tempo definido, onde a série de dados irregulares foi uniformizada e posteriormente foi feito o cálculo da chuva média através do método de Thiessen, considerando, também, o arquivo em Excel gerado no QGIS contendo as áreas de influência e o código de cada posto. Após o cálculo da precipitação média, foram organizados os dados de vazão no intervalo de tempo definido, em uma outra rotina.

De posse das séries de dados de chuva média e vazão dos postos de Inajá, Sertânia e Custódia, tais valores foram organizados lado a lado em planilhas Excel de acordo com as datas. Com isso, percebeu-se que o intervalo de tempo total do posto de Sertânia era pequeno para os objetivos do trabalho, e para Custódia, o intervalo correspondente às chuvas não coincidiu com o das vazões. Portanto, estes dois postos foram desconsiderados nas etapas seguintes. A série de dados do posto de Inajá consistiu no período de 01/01/1977 até 30/04/2019.

#### 4.3.4 Elementos característicos da sub-bacia para calcular o parâmetro $K$

De acordo com a Equação 13, expressada no item 3.6, os elementos necessários para calcular o  $K$  são: a área de drenagem da sub-bacia ( $A_b$ ), a declividade do rio principal da sub-bacia ( $I$ ), o comprimento total da rede de rios ( $L_T$ ), a largura equivalente da seção transversal do rio ( $B_e$ ), o intervalo de tempo em segundos ( $\Delta t$ ), o coeficiente de rugosidade ( $n$ ) e a constante de compatibilização das unidades ( $c$ ).

Com a sub-bacia delimitada, foi possível definir sua área de drenagem, e com a rede de rios determinada, pôde-se calcular o comprimento total da rede de rios ( $L_T$ ). Os dois últimos valores foram definidos através da tabela de atributos do QGIS e exportados para o Excel. Assim, resta encontrar a declividade do rio principal ( $I$ ). Para isso, seguiu-se o mesmo procedimento explanado nos itens a, b e c do tópico 4.3.2, gerando somente a rede de rios, mas com um nível de detalhe menor, ou seja, só o rio principal, sem as ramificações. A partir disso, foram criados dois pontos, um em cada extremidade do rio. As cotas desses pontos e o comprimento do rio principal foram obtidos através da tabela de atributos e exportados para o Excel. A declividade do rio principal foi calculada de acordo com a Equação 23.

$$I = \frac{y_A - y_B}{L_P} \quad (23)$$

Onde  $y_A$  e  $y_B$  são as cotas mais alta e mais baixa do rio, respectivamente, e  $L_P$  é o comprimento do rio principal.

A largura equivalente da rede de rios ( $B_e$ ) precisa ser estimada, sendo esse um valor de fácil ajuste a partir da magnitude dos picos de cheia, onde ele é inversamente proporcional aos valores das vazões de pico calculadas no hidrograma. O coeficiente de Manning ( $n$ ), que representa a rugosidade da calha dos rios, foi utilizado como 0,03. A constante  $c$ , citada no tópico 3.6, é igual a 1000. O intervalo de tempo equivale a um dia, ou seja, 86400 segundos. Dispondo-se de todos esses elementos, calcula-se o parâmetro  $K$  conforme o tópico 4.3.7.

O cálculo desse parâmetro tem levado a bons resultados para declividades normais de rios como o Capibaribe (da ordem de  $10^{-4}$ , por exemplo), que não apresentam grandes declives. De acordo com análises pela equipe que desenvolve o modelo, os valores de  $K$  obtidos não levam a bons resultados nas simulações para rios com declividades acentuadas. Essa informação é coerente, já que o escoamento deixa de ser bem representado pela fórmula de Manning, de onde a expressão de cálculo é derivada. Nesses casos, deve-se considerar  $K$

como um parâmetro a calibrar. Outra consideração relevante é o detalhamento da densidade de drenagem, que deve ser com rios de oito ordens, segundo a classificação de *Strahler*, permitindo um maior refinamento na capacidade da calha fluvial.

#### 4.3.5 Cálculo do parâmetro *S*

O potencial de acumulação máximo de água no solo (*S*) foi calculado através do *plugin* proposto por Almeida Neto (2019), o qual foi instalado como complemento no QGIS. Essa ferramenta, baseada na linguagem Python, foi desenvolvida levando em consideração os mapas do grupo hidrológico e do uso e ocupação do solo de Pernambuco. A sub-bacia em estudo foi inserida como camada de entrada e o resultado gerado foi um *shapefile* com as informações da classificação hidrológica do solo, uso e ocupação representados pelos valores de CN e o valor do *S* para cada região do mapa. A tabela de atributos foi exportada para o Excel, onde foi adquirido o valor de interesse, que é o *S* (em mm) médio da sub-bacia. O valor encontrado para este parâmetro foi 98,996951 mm, sendo arredondado para 99 mm.

#### 4.3.6 Dados de evaporação

Os valores de evaporação utilizados foram estimados através das Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990, as quais são disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Dentre as estações de Pernambuco com dados disponíveis, foi selecionada a estação de Floresta, já que é a mais próxima do município de Inajá. Os valores mensais são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Evaporações mensais para a estação de Floresta (código 82887) – Normais Climatológicas

<b>Mês</b>	<b>Evaporação (mm)</b>
Jan	203,2
Fev	151,4
Mar	143,0
Abr	120,6
Mai	130,1
Jun	133,2
Jul	142,6
Ago	182,9
Set	213,2

Out	250,3
Nov	246,6
Dez	215,5

Fonte: a autora, 2019.

#### 4.3.7 Modelagem hidrológica no CAWM

Tendo em mãos todos os valores de entrada, deu-se início à calibração do modelo CAWM para modelagem hidrológica da sub-bacia Inajá, do rio Moxotó. Dispondo-se da planilha Excel onde está desenvolvido o modelo, inseriu-se as séries de dados diários de chuva média e de vazão observadas encontradas no tópico 4.3.3, bem como suas respectivas datas. Também foram inseridas as evaporações mensais, o parâmetro  $S$ , a área de drenagem da sub-bacia e os outros elementos necessários para o cálculo do parâmetro  $K$  adquiridos no tópico 4.3.4. Estimou-se a largura equivalente  $Be$  como sendo 5 m, permitindo encontrar o  $K$ , cujo valor resultou em 0,022003, coerente com o esperado. A estimativa inicial de  $Be$  foi feita com base na boa adequação de estimativas feitas para outras bacias simuladas pelo CAWM, e foi alterada até atingir o valor que melhor ajustou os dados. A Tabela 4 mostra os valores dos elementos encontrados.

Tabela 4 - Elementos para o cálculo do K

<b>I (m/m)</b>	0,001164
<b>Ab (km<sup>2</sup>)</b>	8332
<b>Lt (m)</b>	3010493
<b>Be (m)</b>	5,0
<b>n</b>	0,03
<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	86400
<b>c</b>	1000

Fonte: a autora, 2019.

Observando-se o hidrograma com a série total de dados, foram selecionados os principais eventos ocorridos, ou seja, aqueles onde houve picos de vazão. Com isso, calibrou-se o modelo para cada um deles utilizando o *Solver*, onde a função objetivo buscou maximizar os coeficientes de *Nash-Sutcliffe*, minimizando, assim, as variações entre as vazões observadas e calculadas.

Ao analisar todos os intervalos calibrados, escolheu-se aquele que gerou o melhor ajuste para o conjunto de dados. A partir desse período de calibração foi possível determinar os parâmetros  $\alpha$ ,  $K_L$  e  $K_S$  do CAWM para a sub-bacia em questão.

#### **4.3.8 Comparação entre os modelos CAWM e GR4J**

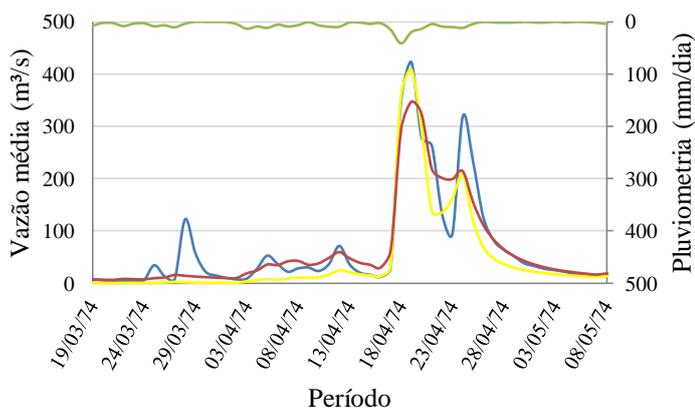
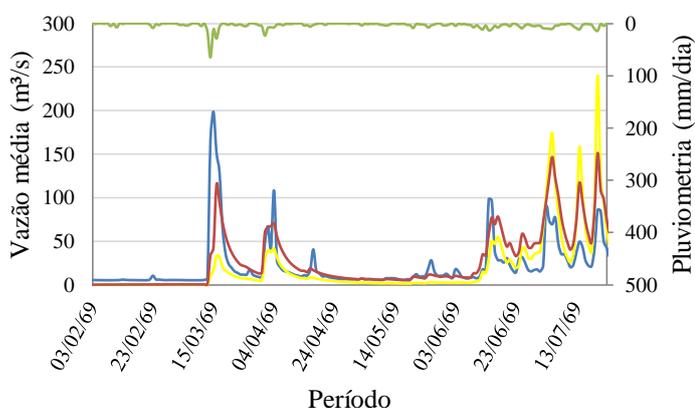
Seguindo-se o mesmo procedimento descrito no item 4.2, compararam-se os resultados obtidos na simulação da bacia do rio Moxotó com o modelo CAWM e com o modelo GR4J. O período de calibração foi entre 09/12/1984 e 05/10/1985.

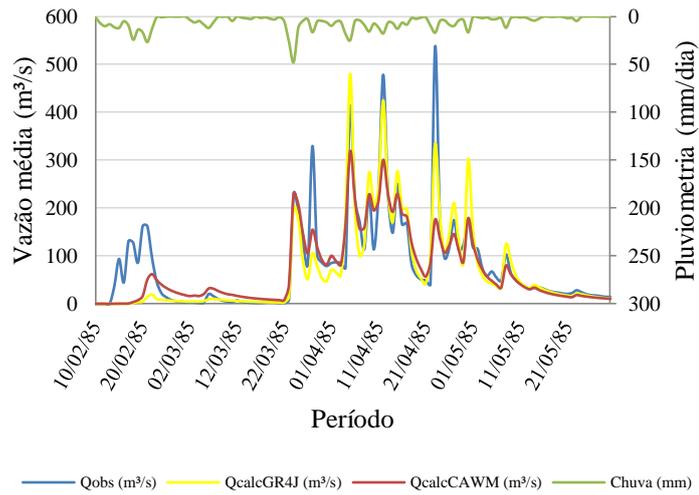
## 5 RESULTADOS

### 5.1 SIMULAÇÕES PARA O CAPIBARIBE, PAJEÚ E SIRINHAÉM

De posse dos hidrogramas representando os eventos de precipitação e vazões medidas e simuladas pelos modelos CAWM e GR4J de cada região, comparou-se os resultados visando à análise do desempenho do CAWM em relação ao GR4J. Num primeiro momento, essa análise foi feita visualmente através dos gráficos gerados, e em seguida, estatisticamente. A seguir são mostrados alguns dos hidrogramas gerados (Figuras 16 a 21) sendo um de cada região referente ao evento utilizado para calibração. A série total de dados pode ser conferida no Apêndice C (Figuras C1 a C6). As linhas de coloração verde representam os dados pluviométricos, em azul estão os dados de vazão observados, em vermelho, os calculados pelo CAWM, e em amarelo, os calculados pelo GR4J.

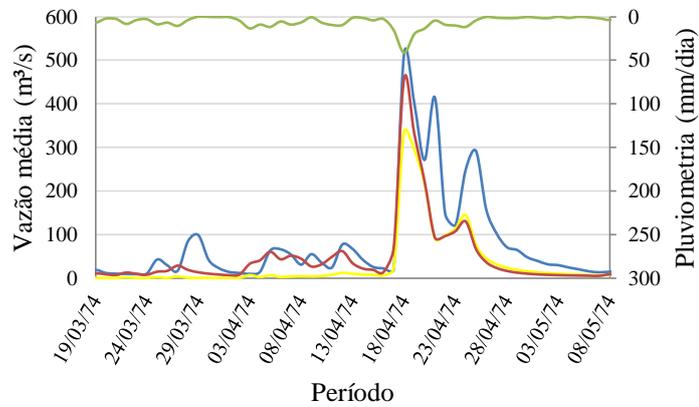
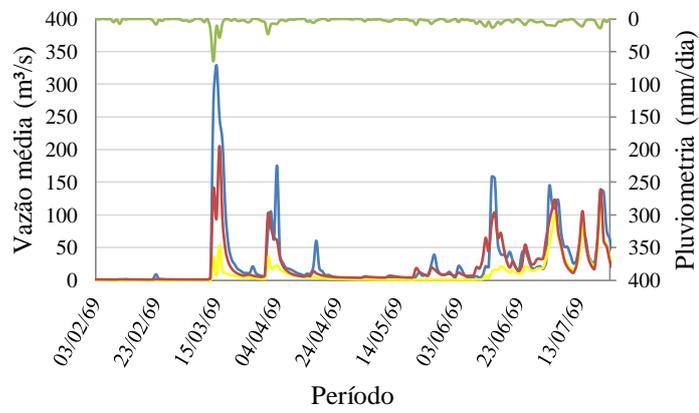
Figura 16 - Hidrogramas com dados de Limoeiro

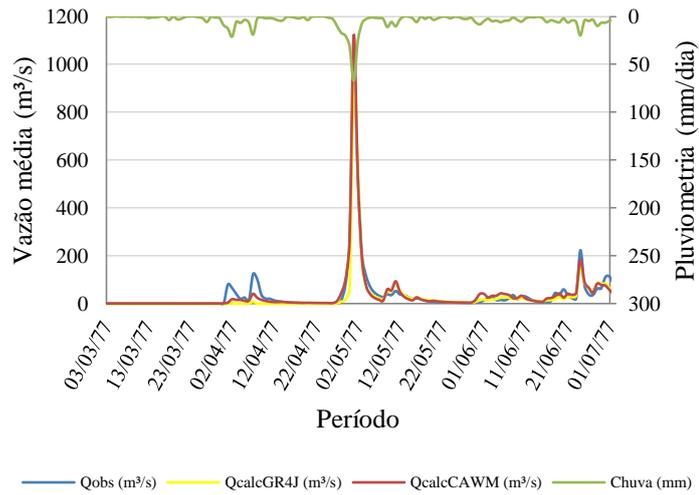




Fonte: a autora, 2019.

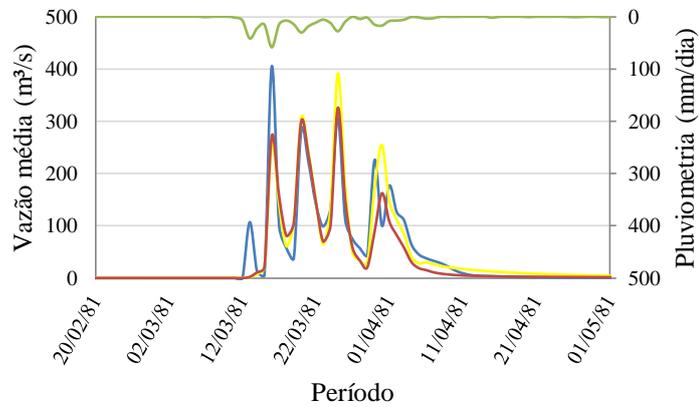
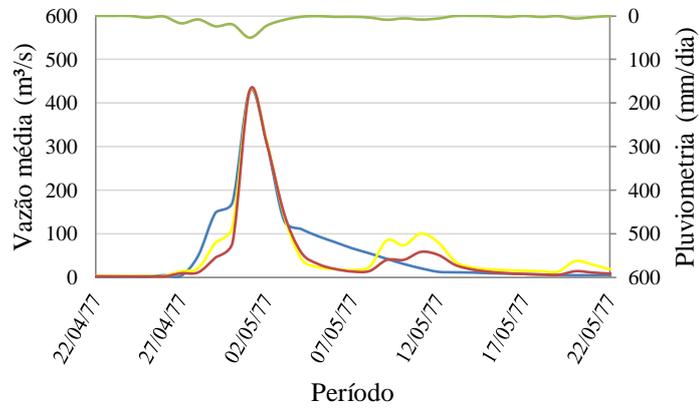
Figura 17 - Hidrogramas com dados de Paudalho

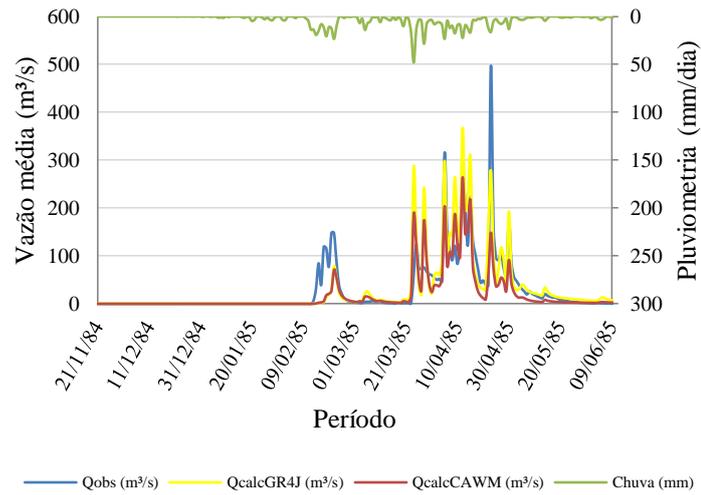




Fonte: a autora, 2019.

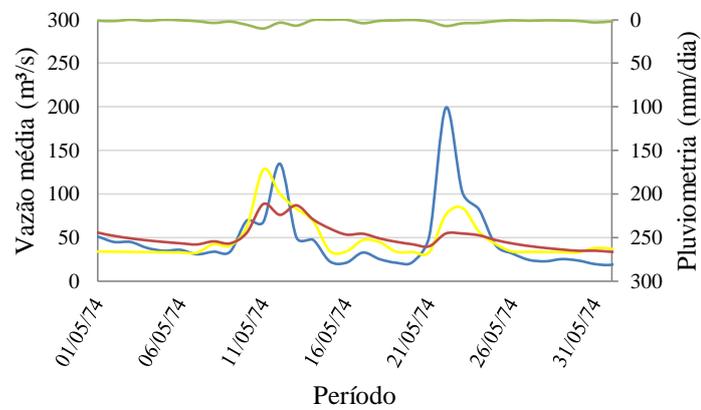
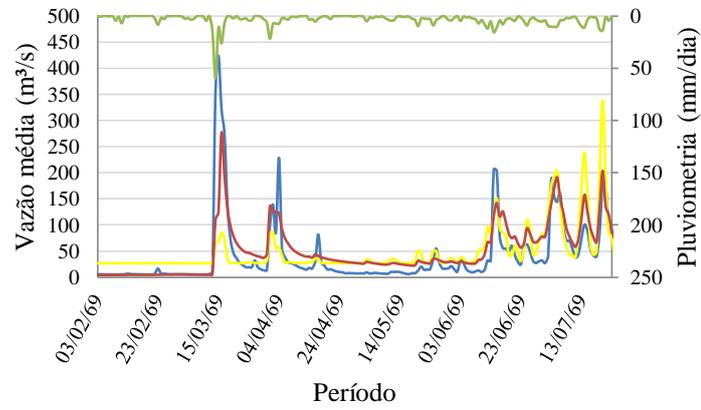
Figura 18 - Hidrogramas com dados de Toritama

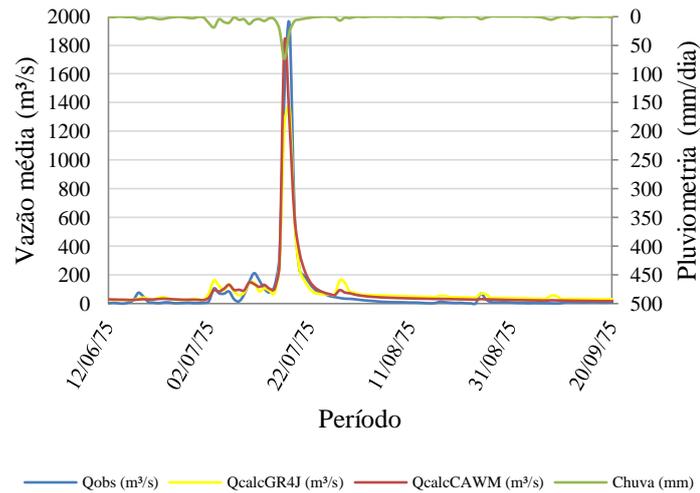




Fonte: a autora, 2019.

Figura 19 - Hidrogramas com dados de São Lourenço da Mata

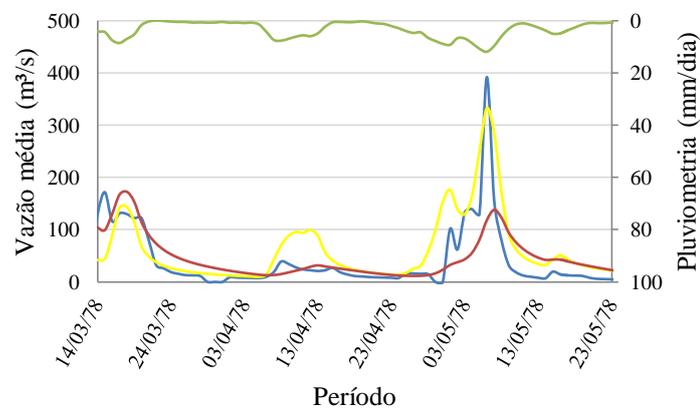


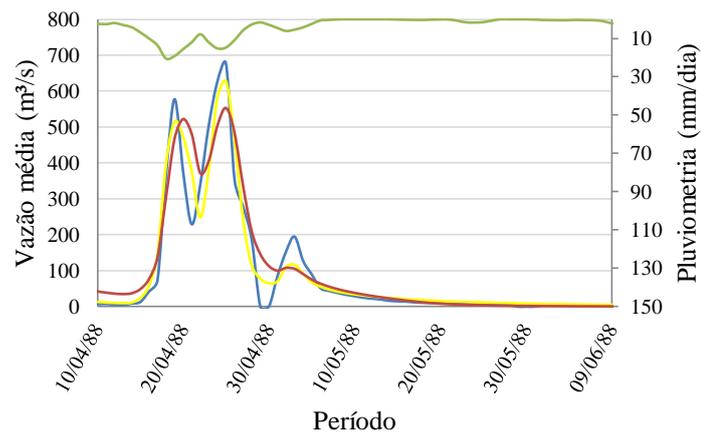
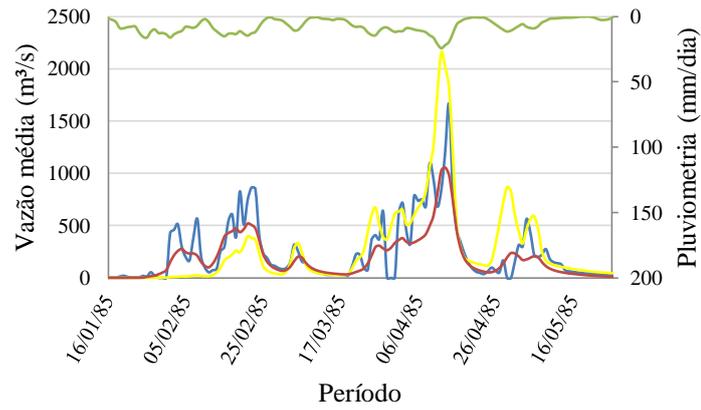


Fonte: a autora, 2019.

Para as estações fluviométricas de Limoeiro, Paudalho e Toritama, o ajuste de ambos os modelos foi considerado satisfatório, a partir da análise visual dos gráficos da série total de dados. Um comportamento não adequado para São Lourenço da Mata já era esperado para os dados posteriores à implantação do sistema de quatro barragens de controle de cheias na bacia, que comprometem os resultados. Porém, a calibração deste último teve um ajuste razoável, o que se explica pelo fato de a série de dados utilizada ser anterior à construção de três das quatro principais barragens.

Figura 20 - Hidrogramas com dados de Floresta

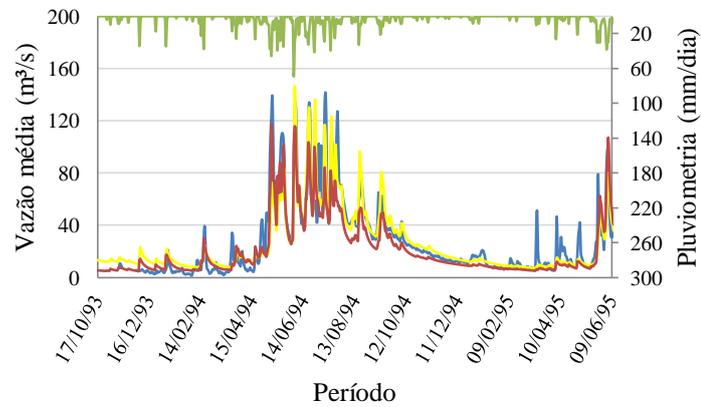


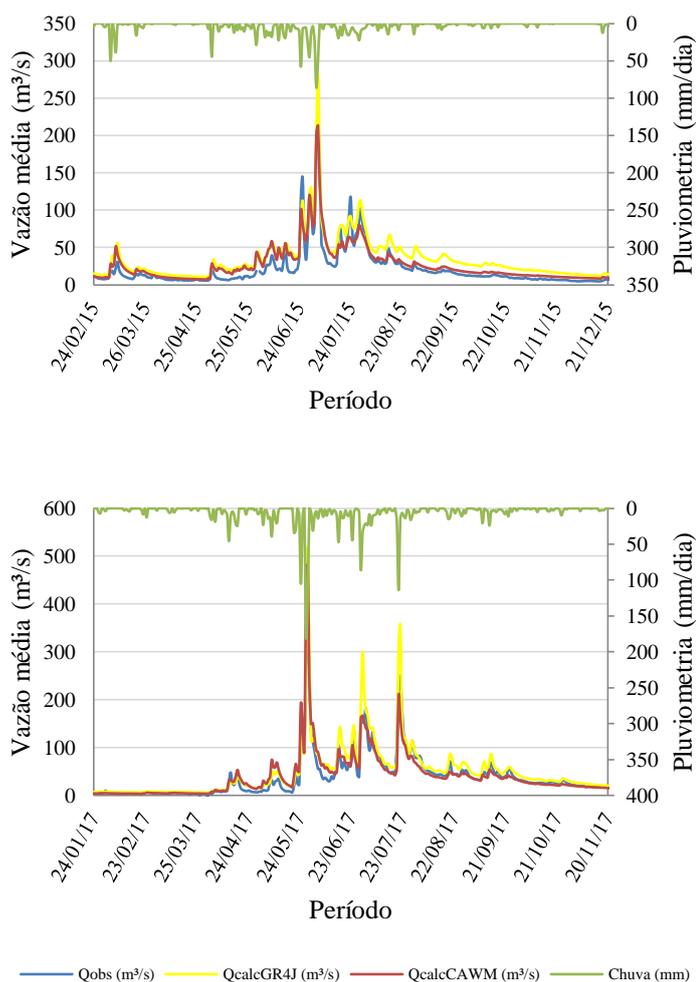


— Qobs (m³/s) — QcalcGR4J (m³/s) — QcalcCAWM (m³/s) — Chuva (mm)

Fonte: a autora, 2019.

Figura 21 - Hidrogramas com dados de Sirinhaém





Fonte: a autora, 2019.

O ajuste para a estação de Floresta foi satisfatório, com os modelos representando regularmente as vazões, apesar da influência da barragem de Serrinha em alguns eventos. Na simulação da bacia do rio Sirinhaém, feita com a versão V do modelo CAWM, ambos os modelos apresentaram bons resultados. Os ajustes adequados comprovam a capacidade de representar o comportamento de regiões de rios perenes.

Além da observação gráfica, foi realizada a análise estatística dos coeficientes utilizados como critério de ajuste para cada modelo. De posse da série total de dados, foram calculados os valores dos indicadores *NSE*, *NSE<sub>RAIZ</sub>*, *NSE<sub>LOG</sub>*, *PBIAS* e *RSR* para os eventos utilizados na simulação. A Tabela 5 mostra a comparação percentual dos resultados de cada indicador nas simulações para os dados de cada estação fluviométrica nos modelos CAWM e GR4J. O Apêndice A mostra a classificação percentual mais detalhada de acordo com cada coeficiente e o Apêndice B (Tabelas B1 a B6) contém os valores dos coeficientes.

Tabela 5 - Classificação dos coeficientes utilizados como critério de ajuste

		Muito boa	Boa	Satisfatória	Insatisfatória
<b>Sirinhaém</b>	CAWM	63%	18%	13%	6%
	GR4J	52%	10%	14%	25%
<b>Floresta</b>	CAWM	33%	6%	22%	39%
	GR4J	29%	16%	14%	42%
<b>Limoeiro</b>	CAWM	33%	14%	13%	41%
	GR4J	29%	8%	18%	46%
<b>Paudalho</b>	CAWM	31%	8%	13%	48%
	GR4J	24%	7%	12%	58%
<b>Toritama</b>	CAWM	29%	10%	11%	50%
	GR4J	33%	8%	9%	51%
<b>São Lourenço da Mata</b>	CAWM	35%	8%	13%	44%
	GR4J	22%	6%	8%	63%

Fonte: a autora, 2019.

A partir dessa classificação, foi possível avaliar de forma mais precisa o desempenho dos modelos para cada região estudada. Pode-se ver que o melhor resultado foi para Sirinhaém, comprovando o que foi discutido anteriormente para o CAWM. Da mesma forma, esta sub-bacia teve o melhor resultado no modelo GR4J. A avaliação levou em conta o conjunto de valores considerados muito bons, bons e satisfatórios para determinar a eficácia dos modelos. Para Pajeú e as regiões do Capibaribe, a interpretação do comportamento feita pela análise visual foi reafirmada através da análise estatística. Vale salientar que uma parte dos dados foi influenciada pelas barragens presentes nessas duas últimas bacias, o que explica os valores que classificaram as simulações como insatisfatórias. Apesar disso, os resultados dos ajustes confirmam a qualidade e a confiabilidade dos dados simulados pelos dois modelos.

## 5.2 SIMULAÇÃO PARA MOXOTÓ

A modelagem hidrológica para bacia do rio Moxotó foi realizada com o intuito de avaliar o comportamento do modelo CAWM para essa região. Após várias calibrações, foi

selecionado um evento que gerou o melhor conjunto de simulações, sendo este ocorrido entre 09/12/1984 e 05/10/1985.

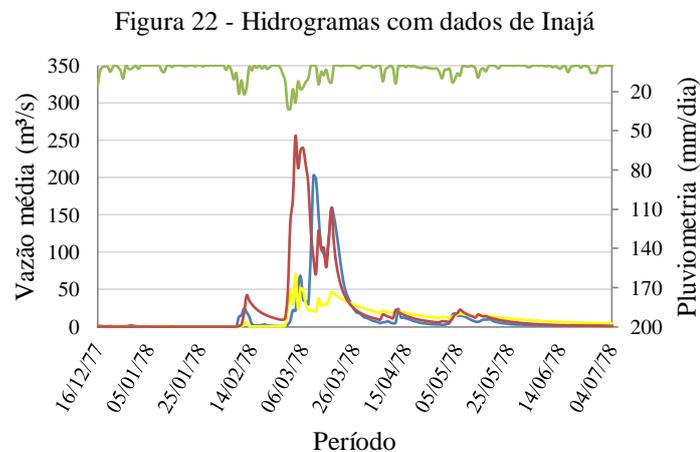
Desse modo, determinaram-se os parâmetros de calibração do modelo, os quais foram incluídos no *Solver* como variáveis de decisão:  $\alpha$ ,  $K_L$  e  $K_S$ . O primeiro é utilizado para determinar a magnitude da evapotranspiração complementar, o segundo é um coeficiente de perdas de água nas diversas fases do ciclo hidrológico e o último representa a permeabilidade do solo. Os valores desses e dos demais parâmetros fixos e estimados obtidos ao final da calibração são exibidos na Tabela 6.

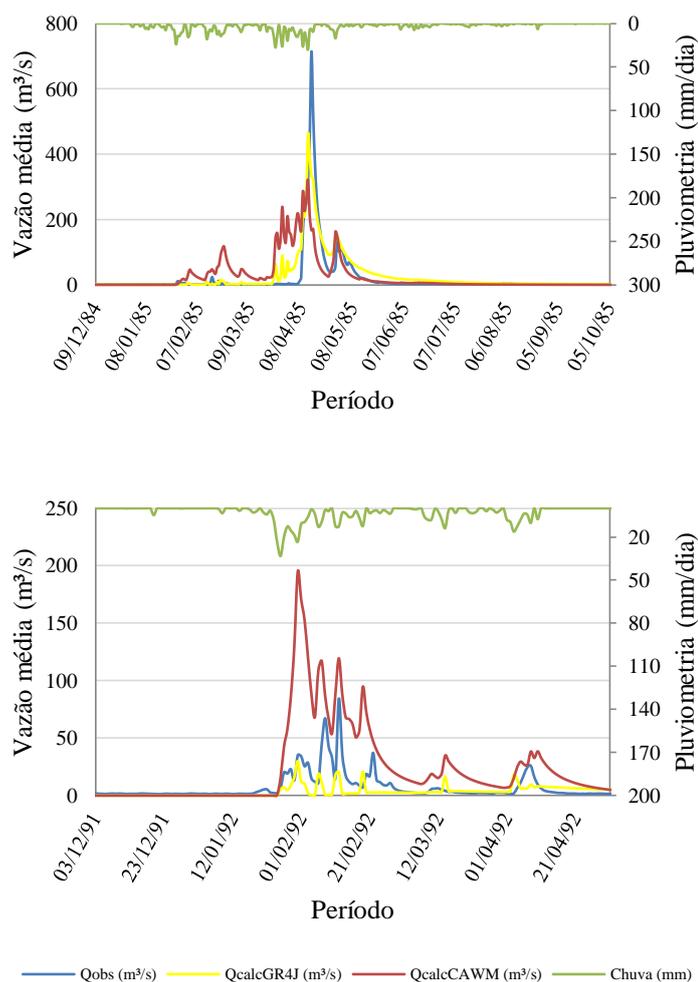
Tabela 6 - Parâmetros obtidos na simulação do Moxotó

<b>S (mm)</b>	99
<b>K</b>	0,022003
<b>b</b>	1,667
<b>Be (m)</b>	5,0
<b><math>K_L</math></b>	0,391292
<b><math>K_S</math></b>	0,001
<b><math>\alpha</math></b>	25,42

Fonte: a autora, 2019.

São demonstrados na Figura 22 os hidrogramas de alguns dos eventos selecionados na série total de dados, sendo o segundo deles referente ao período de calibração. Neles estão os valores simulados no modelo CAWM e no modelo GR4J.





Fonte: a autora, 2019.

Pode-se perceber, a partir da análise visual destes gráficos e dos outros que não são exibidos no presente trabalho, que os resultados não foram bons em ambos os modelos. Isso se confirma na verificação dos coeficientes estatísticos, que apresentaram valores insatisfatórios em sua grande maioria (Tabela 7). Os Apêndices A e B contêm mais detalhes.

Tabela 7 - Classificação dos coeficientes utilizados como critério de ajuste (Inajá)

	Muito boa	Boa	Satisfatória	Insatisfatória
<b>CAWM</b>	9%	2%	4%	85%
<b>GR4J</b>	22%	4%	4%	71%

Fonte: a autora, 2019.

Esse comportamento já era esperado, visto que a presença da barragem Engenheiro Francisco Saboia, conhecida como Poço da Cruz, no município de Ibimirim, compromete os resultados influenciando nos valores das vazões medidas. A proximidade do desempenho

entre os dois modelos comprova o comprometimento dos resultados pela barragem citada anteriormente, além de evidenciar o ajuste coerente do modelo CAWM. A Figura C7 do Apêndice C contém os hidrogramas totais das vazões calculadas pelo CAWM e pelo GR4J para esta sub-bacia.

### 5.3 COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO ENTRE O CAWM E GR4J PARA O CAPIBARIBE, PAJEÚ, SIRINHAÉM E MOXOTÓ

Além da avaliação do comportamento de cada modelo individualmente, também se comparou os resultados entre eles. Ao observar as Tabelas 5 e 7, já é possível perceber que o modelo CAWM teve ajuste um pouco melhor, já que a maioria dos coeficientes das três primeiras colunas teve um valor superior aos calculados a partir dos dados simulados pelo GR4J. Para uma melhor visualização, foram calculadas as porcentagens dos coeficientes que se sobressaíram de um modelo com relação ao outro (Tabela 8). Ou seja, para cada intervalo de tempo utilizado para calibrar o modelo foram postos os cinco coeficientes de cada modelo lado a lado e contabilizaram-se os maiores para cada tipo. O Apêndice B mostra mais detalhes.

Tabela 8 - Comparação do desempenho - melhores indicadores do ajuste

	CAWM	GR4J
<b>Sirinhaém</b>	61%	39%
<b>Floresta</b>	49%	51%
<b>Limoeiro</b>	53%	48%
<b>Paudalho</b>	55%	45%
<b>Toritama</b>	45%	55%
<b>São Lourenço da Mata</b>	66%	34%
<b>Inajá</b>	47%	53%

Fonte: a autora, 2019.

A primeira coluna contém a porcentagem referente aos coeficientes que foram melhores no modelo CAWM, e de forma similar, a segunda coluna refere-se ao modelo GR4J. Das sete bacias estudadas, quatro delas foram mais bem ajustadas pelo CAWM. As outras três bacias, apesar de terem melhores ajustes no modelo GR4J, tiveram resultados muito próximos, o que ainda confirma a eficácia do modelo. Ao final da análise, viu-se que o CAWM teve 54% dos valores maiores que os do GR4J, enquanto este último se comportou melhor em 46% deles.

## 6 CONCLUSÕES

O estudo do modelo chuva-vazão CAWM, desenvolvido no Campus Agreste da UFPE, gerou simulações satisfatórias na área de estudo, contribuindo, dessa forma, para o seu aprimoramento. Modelos como esse podem ser utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas e para prever eventos futuros, sendo útil para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos.

As simulações das bacias do rio Capibaribe, rio Pajeú e rio Sirinhaém mostraram resultados satisfatórios, o que comprova a simplicidade do modelo e que os poucos parâmetros de entrada se adequam bem a essas regiões. O aprimoramento do modelo para a versão V possibilitou a modelagem em bacias hidrográficas de rios perenes, abrangendo não só as regiões semiáridas, como também as mais úmidas. Apesar de a modelagem para a bacia do rio Moxotó não ter sido satisfatória, o que já era esperado, a simulação abrangeu mais uma região do estado, contribuindo de certa forma para o melhoramento do modelo através da interpretação dos resultados.

A comparação entre as simulações geradas pelo CAWM e pelo GR4J permitiu uma análise estatística mais abrangente da calibração, utilizando os coeficientes estatísticos de ajuste e tornando mais eficiente a análise dos resultados. Além disso, a obtenção de melhores ajustes do CAWM comparados com o modelo GR4J na maioria dos eventos em análise comprovou a qualidade e a confiabilidade dos dados simulados por este modelo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. **Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas.** Revista da FAE, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ALMEIDA NETO, J. B. de. **Determinação do potencial de acumulação de água nos solos do estado de Pernambuco.** 2019. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; MAGALHÃES, A. G.; SRINIVASAN, R. Modelagem Hidrológica de uma sub-bacia do Alto Mundaú utilizando o modelo SWAT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13., 2016, Aracaju. **Anais ...** Aracaju: ABRH, 2016. p. 1-10.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Bacia do Rio Capibaribe.** Disponível em: <[http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page\\_id=5&subpage\\_id=14](http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=14)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. de. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro–Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 253-261, 2010.

BELLON, E. **Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.** 2014. 110 f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto alegre, 2001.

CUNHA, L. K. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real.** 2004. 259 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **SRTM – Shuttle Radar Topography Mission.** Disponível em: <[https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao\\_srtm.html](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_srtm.html)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.

FAYAL, M. A. A. **Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet.** 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FEITOZA, M. A. B. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 2019. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOMES, M. M. A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na bacia do Rio Capibaribe**. 2019. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LEÃO, R. A. de O. **Caracterização fisiográfica e simulação hidrológica em reservatórios da bacia do Jaguarie-CE**. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica ego**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP – A simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology**. Ed. V.P. Singh. Water Resources Publications, 1982.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 308–322, 2009.

LUTZ, M.; ASCHER, D. **Aprendendo Python**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

MELO, C. R. de. **Análise do eixo leste da transposição do rio São Francisco face aos cenários de uso previstos**. 2010. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Revista Ampliada, 2013.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Ciclo hidrológico**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/component/k2/item/420-ciclo-hidrol%C3%B3gico.html>>. Acesso em 8 de dezembro de 2019.

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. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASONOVA, O. N. Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 2. Comparison with hydrological models. **Water Resources**, v. 38, n. 3, p. 274-283, 2011.

PE3D – Pernambuco Tridimensional. **Benefícios do Programa**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. **Hidrografia Pernambuco**. Disponível em: <[http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/attachments/article/55/Hidrografia\\_geral\\_atlas2006.pdf](http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/attachments/article/55/Hidrografia_geral_atlas2006.pdf)> Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

PERRIN, C. **Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit**. 2004. Tese (Doutorado em Mecânica dos meios geofísicos e ambientais) – Univers et Environnement, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2004.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003.

QGIS. **QGIS – A liderança do SIG de código aberto**. Disponível em: <[https://www.qgis.org/pt\\_BR/site/about/index.html](https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.

REBOUÇAS, J. A.; ALMEIDA, C. L. D.; CIPRIANO, S. A.; LOPES, F. B. Proposta de utilização da interface Python/ArcGIS na elaboração da curva cota-área-volume de reservatórios. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 12., 2012, Palmas. **Anais ...** Palmas: CONNEPI, 2012. 6p.

RODRIGUES, N. C. **Dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização de vazões utilizando séries sintéticas**. 2017. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

TRAORE, V. B; SAMBOU S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 1, p. 36-44, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; LOPES, M. S. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza. **Anais ...** Fortaleza: ABRH, 1981. p. 83-103.

VALERIANO, M. M. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia; São José dos Campos, 2008. 75 p. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2019.

VIANA, J. F. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L., SILVA, B. B.; SILVA, R. M., SOUSA, W. S. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 155-172, 2018.

VIRÃES, M. V. **Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro**. 2018. 294 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

**APÊNDICE A – Classificação percentual dos coeficientes estatísticos**

		Muito boa		Boa		Satisfatória		Insatisfatória	
		CAWM	GR4J	CAWM	GR4J	CAWM	GR4J	CAWM	GR4J
<b>Sirinhaém</b>	<b>NSE</b>	45%	23%	32%	18%	18%	18%	5%	41%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	64%	64%	23%	18%	5%	9%	9%	9%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	59%	59%	27%	9%	14%	18%	0%	14%
	<b>PBIAS</b>	45%	14%	9%	5%	27%	23%	18%	59%
	<b>RSR</b>	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Floresta</b>	<b>NSE</b>	16%	4%	0%	12%	32%	24%	52%	60%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	20%	8%	8%	20%	36%	20%	36%	52%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	32%	24%	4%	28%	24%	12%	40%	36%
	<b>PBIAS</b>	8%	16%	16%	16%	16%	12%	60%	56%
	<b>RSR</b>	88%	92%	0%	4%	4%	0%	8%	4%
<b>Limoeiro</b>	<b>NSE</b>	19%	19%	13%	6%	13%	13%	56%	63%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	31%	31%	25%	6%	13%	25%	31%	38%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	25%	13%	13%	0%	19%	31%	44%	56%
	<b>PBIAS</b>	6%	6%	19%	25%	19%	13%	56%	56%
	<b>RSR</b>	81%	75%	0%	0%	0%	6%	19%	19%
<b>Paudalho</b>	<b>NSE</b>	24%	6%	24%	12%	6%	12%	47%	71%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	18%	6%	12%	12%	12%	6%	59%	76%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	12%	12%	0%	6%	18%	29%	71%	53%
	<b>PBIAS</b>	18%	0%	6%	6%	29%	12%	47%	82%
	<b>RSR</b>	82%	94%	0%	0%	0%	0%	18%	6%
<b>Toritama</b>	<b>NSE</b>	19%	19%	19%	13%	6%	6%	56%	63%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	19%	31%	13%	0%	13%	19%	56%	50%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	19%	13%	6%	19%	6%	6%	69%	63%
	<b>PBIAS</b>	6%	19%	6%	6%	25%	13%	63%	63%
	<b>RSR</b>	81%	81%	6%	0%	6%	0%	6%	19%
<b>São Lourenço</b>	<b>NSE</b>	37%	11%	0%	11%	11%	16%	53%	63%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	21%	5%	16%	0%	16%	11%	47%	84%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	21%	5%	11%	11%	16%	0%	53%	84%
	<b>PBIAS</b>	11%	11%	16%	11%	21%	16%	53%	63%
	<b>RSR</b>	84%	79%	0%	0%	0%	0%	16%	21%
<b>Inajá</b>	<b>NSE</b>	0%	9%	0%	0%	0%	0%	100%	91%
	<b>NSE<sub>RAIZ</sub></b>	0%	9%	9%	0%	9%	0%	82%	91%
	<b>NSE<sub>LOG</sub></b>	9%	0%	0%	18%	9%	9%	82%	73%
	<b>PBIAS</b>	0%	9%	0%	0%	0%	9%	100%	82%
	<b>RSR</b>	36%	82%	0%	0%	0%	0%	64%	18%

## APÊNDICE B – Coeficientes de critério de ajuste

Tabela B1 – Coeficientes de critério de ajuste para Sirinhaém

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
14/04/1993	17/10/1993	CAWM	0,63	-0,22	0,52	10	0,09
		GR4J	-0,03	-0,48	-0,25	-76	0,26
25/04/1994	01/03/1995	CAWM	0,85	0,84	0,87	21	0,04
		GR4J	0,86	0,90	0,93	3	0,03
01/03/1995	26/12/1995	CAWM	0,77	0,72	0,72	19	0,06
		GR4J	0,82	0,80	0,80	5	0,05
26/12/1995	29/01/1997	CAWM	0,69	0,74	0,80	-6	0,08
		GR4J	0,60	0,75	0,78	-29	0,10
29/01/1997	05/03/1998	CAWM	0,76	0,85	0,89	8	0,06
		GR4J	0,59	0,88	0,92	-19	0,10
28/04/2000	09/03/2001	CAWM	0,69	0,89	0,88	-26	0,08
		GR4J	-0,23	0,82	0,85	-59	0,31
09/03/2001	07/02/2003	CAWM	0,62	0,79	0,83	-9	0,09
		GR4J	0,33	0,76	0,77	-41	0,17
04/12/2003	17/04/2005	CAWM	0,72	0,84	0,77	-1	0,07
		GR4J	0,06	0,82	0,85	-31	0,24
17/04/2005	11/02/2006	CAWM	0,84	0,88	0,85	4	0,04
		GR4J	0,66	0,90	0,93	-24	0,08
11/02/2006	12/01/2008	CAWM	0,66	0,60	0,56	18	0,08
		GR4J	0,53	0,75	0,79	-11	0,12
12/01/2008	15/02/2009	CAWM	0,82	0,85	0,85	3	0,05
		GR4J	0,68	0,86	0,86	-26	0,08
15/02/2009	22/03/2010	CAWM	0,73	0,74	0,74	5	0,07
		GR4J	0,55	0,78	0,78	-22	0,11
22/03/2010	16/01/2011	CAWM	0,54	0,80	0,77	-16	0,12
		GR4J	0,29	0,77	0,72	-51	0,18
16/01/2011	30/05/2012	CAWM	0,84	0,89	0,88	5	0,04
		GR4J	0,65	0,87	0,88	-23	0,09
26/03/2013	20/01/2014	CAWM	0,65	0,83	0,81	-35	0,09
		GR4J	0,33	0,73	0,66	-61	0,17
20/01/2014	24/02/2015	CAWM	0,43	0,73	0,71	-30	0,14
		GR4J	-0,10	0,63	0,52	-72	0,28
24/02/2015	21/12/2015	CAWM	0,85	0,78	0,69	-24	0,04
		GR4J	0,70	0,67	0,41	-60	0,07
21/12/2015	16/10/2016	CAWM	0,64	0,10	0,59	-26	0,09
		GR4J	0,32	-0,04	0,38	-67	0,17

24/01/2017	20/11/2017	<b>CAWM</b>	0,89	0,93	0,90	-3	0,03
		<b>GR4J</b>	0,86	0,94	0,88	-24	0,04
01/04/1993	01/01/2018	<b>CAWM</b>	0,74	0,77	0,69	-5	0,07
		<b>GR4J</b>	0,46	0,74	0,64	-35	0,13
24/02/2015	20/11/2017	<b>CAWM</b>	0,85	0,78	0,80	-14	0,04
		<b>GR4J</b>	0,76	0,69	0,58	-46	0,06
17/10/1993	09/06/1995	<b>CAWM</b>	0,83	0,68	0,69	15	0,04
		<b>GR4J</b>	0,83	0,62	0,59	-3	0,04

Tabela B2 – Coeficientes de critério de ajuste para Floresta

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
21/03/1974	13/06/1974	<b>CAWM</b>	0,65	0,32	0,93	-16	0,09
		<b>GR4J</b>	-1,08	0,38	0,93	-185	0,52
28/02/1975	20/03/1975	<b>CAWM</b>	0,56	0,49	0,93	-11	0,11
		<b>GR4J</b>	0,25	-3,23	0,05	66	0,19
18/04/1977	27/06/1977	<b>CAWM</b>	0,33	-0,49	0,45	20	0,17
		<b>GR4J</b>	0,12	-5,91	-0,68	60	0,22
14/03/1978	23/05/1978	<b>CAWM</b>	0,58	0,48	0,56	-13	0,11
		<b>GR4J</b>	0,52	0,58	0,68	-52	0,12
27/02/1979	28/05/1979	<b>CAWM</b>	0,48	-0,27	-0,27	-29	0,13
		<b>GR4J</b>	0,44	0,16	0,56	21	0,14
02/02/1980	02/04/1980	<b>CAWM</b>	-0,62	0,56	0,35	-147	0,40
		<b>GR4J</b>	0,54	-0,35	0,07	52	0,11
08/03/1981	07/05/1981	<b>CAWM</b>	0,35	0,56	0,50	-37	0,16
		<b>GR4J</b>	0,67	0,55	0,47	33	0,08
01/04/1984	11/05/1984	<b>CAWM</b>	0,35	0,81	0,86	-82	0,16
		<b>GR4J</b>	0,64	0,86	0,88	-46	0,09
16/01/1985	26/05/1985	<b>CAWM</b>	0,81	0,79	0,80	23	0,05
		<b>GR4J</b>	0,46	0,68	0,67	-12	0,13
02/03/1986	31/05/1986	<b>CAWM</b>	0,61	0,76	0,93	-18	0,10
		<b>GR4J</b>	0,52	0,71	0,91	-26	0,12
06/04/1987	06/05/1987	<b>CAWM</b>	0,59	0,73	0,82	-53	0,10
		<b>GR4J</b>	0,68	0,18	0,83	13	0,08
10/04/1988	09/06/1988	<b>CAWM</b>	0,89	0,87	0,87	-10	0,03
		<b>GR4J</b>	0,95	0,92	0,93	-3	0,01
26/03/1989	24/06/1989	<b>CAWM</b>	0,34	0,59	0,79	-30	0,17
		<b>GR4J</b>	0,62	0,34	0,68	34	0,10
04/04/1995	13/06/1995	<b>CAWM</b>	0,29	0,57	0,41	-70	0,18
		<b>GR4J</b>	0,57	0,20	0,06	-1	0,11
28/12/2001	26/02/2002	<b>CAWM</b>	-0,50	-0,11	-0,84	-148	0,37
		<b>GR4J</b>	0,02	-2,00	0,06	61	0,24

01/12/2003	06/04/2004	<b>CAWM</b>	0,60	0,58	0,68	11	0,10
		<b>GR4J</b>	0,75	0,68	0,83	4	0,06
22/03/2005	31/05/2005	<b>CAWM</b>	-24,13	0,25	0,53	-349	6,28
		<b>GR4J</b>	-7,59	0,16	0,27	-188	2,15
25/02/2006	15/06/2006	<b>CAWM</b>	-2,52	0,23	0,07	-102	0,88
		<b>GR4J</b>	-0,38	0,43	0,54	-36	0,35
31/01/2007	01/04/2007	<b>CAWM</b>	-1,43	0,56	0,33	-188	0,61
		<b>GR4J</b>	0,49	0,09	0,27	1	0,13
06/03/2008	04/07/2008	<b>CAWM</b>	0,51	0,56	0,30	-26	0,12
		<b>GR4J</b>	0,20	0,64	0,68	-88	0,20
10/04/2009	29/06/2009	<b>CAWM</b>	0,36	0,12	-0,56	-34	0,16
		<b>GR4J</b>	0,41	0,22	-0,43	-36	0,15
21/02/1984	16/05/1985	<b>CAWM</b>	0,76	0,69	0,39	8	0,06
		<b>GR4J</b>	0,47	0,67	0,51	-12	0,13
16/01/1985	31/05/1986	<b>CAWM</b>	0,78	0,76	0,56	13	0,05
		<b>GR4J</b>	0,47	0,69	0,72	-14	0,13
10/03/1973	07/06/1991	<b>CAWM</b>	0,50	0,62	0,56	-27	0,12
		<b>GR4J</b>	0,18	0,58	0,69	-17	0,21
10/03/1973	29/06/2009	<b>CAWM</b>	0,40	0,58	0,53	-42	0,15
		<b>GR4J</b>	0,34	0,60	0,67	-23	0,17

Tabela B3 – Coeficientes de critério de ajuste para Limoeiro

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
06/03/1967	12/10/1967	<b>CAWM</b>	0,02	-0,83	-0,42	35	0,25
		<b>GR4J</b>	-0,18	-2,62	-0,65	72	0,30
03/02/1969	23/07/1969	<b>CAWM</b>	0,43	0,74	0,50	-26	0,14
		<b>GR4J</b>	0,10	0,49	0,15	11	0,23
08/07/1970	16/10/1970	<b>CAWM</b>	0,66	0,75	0,82	-15	0,09
		<b>GR4J</b>	0,66	0,58	0,29	34	0,09
19/03/1974	08/05/1974	<b>CAWM</b>	0,90	0,91	0,92	5	0,02
		<b>GR4J</b>	0,88	0,74	0,33	30	0,03
12/06/1975	20/09/1975	<b>CAWM</b>	0,60	0,70	-0,40	-129	0,10
		<b>GR4J</b>	-0,42	0,75	-0,01	-153	0,36
20/02/1981	01/05/1981	<b>CAWM</b>	0,63	0,85	0,87	-20	0,09
		<b>GR4J</b>	0,52	0,80	0,85	1	0,12
21/11/1984	09/06/1985	<b>CAWM</b>	0,80	0,81	0,56	12	0,05
		<b>GR4J</b>	0,83	0,82	0,54	13	0,04
22/06/1994	30/09/1994	<b>CAWM</b>	0,36	0,54	0,26	-17	0,16
		<b>GR4J</b>	0,06	0,61	0,55	-23	0,24
07/05/1997	15/08/1997	<b>CAWM</b>	-19,29	-0,26	-2,35	-677	5,07
		<b>GR4J</b>	-13,96	-0,11	-3,02	-446	3,74

21/01/2004	08/08/2004	<b>CAWM</b>	0,70	0,78	0,71	-77	0,07
		<b>GR4J</b>	0,59	0,83	0,84	-45	0,10
04/06/2005	12/09/2005	<b>CAWM</b>	0,15	0,68	0,58	-68	0,21
		<b>GR4J</b>	-0,90	0,57	0,56	-67	0,48
19/04/2008	28/07/2008	<b>CAWM</b>	-8,80	0,03	-0,37	-456	2,45
		<b>GR4J</b>	-7,03	0,03	-0,39	-341	2,01
13/07/2009	21/10/2009	<b>CAWM</b>	-56,62	-0,10	-1,32	-805	14,41
		<b>GR4J</b>	-70,67	0,05	-0,29	-684	17,92
25/11/2010	13/06/2011	<b>CAWM</b>	-0,45	0,57	0,76	-43	0,36
		<b>GR4J</b>	-1,63	0,51	0,54	-25	0,66
01/01/1966	31/12/1986	<b>CAWM</b>	0,50	0,49	0,10	-22	0,13
		<b>GR4J</b>	0,14	0,46	0,30	10	0,21
10/02/1985	30/05/1985	<b>CAWM</b>	0,80	0,81	0,65	12	0,05
		<b>GR4J</b>	0,83	0,81	0,59	13	0,04

Tabela B4 – Coeficientes de critério de ajuste para Paudalho

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
06/03/1967	12/10/1967	<b>CAWM</b>	0,08	-1,93	-0,57	53	0,23
		<b>GR4J</b>	-0,19	-2,08	-0,16	86	0,30
03/02/1969	23/07/1969	<b>CAWM</b>	0,72	0,74	0,65	22	0,07
		<b>GR4J</b>	0,30	-0,32	0,61	62	0,18
08/07/1970	16/10/1970	<b>CAWM</b>	0,73	0,68	0,32	22	0,07
		<b>GR4J</b>	0,33	-0,35	0,77	68	0,17
19/03/1974	08/05/1974	<b>CAWM</b>	0,74	0,55	0,59	40	0,07
		<b>GR4J</b>	0,68	0,04	-0,39	58	0,08
12/06/1975	20/09/1975	<b>CAWM</b>	0,92	0,85	0,55	-24	0,02
		<b>GR4J</b>	0,16	0,85	0,71	-50	0,21
20/02/1981	01/05/1981	<b>CAWM</b>	0,80	0,75	0,87	28	0,05
		<b>GR4J</b>	0,62	0,66	0,58	37	0,10
21/11/1984	09/06/1985	<b>CAWM</b>	0,49	-0,15	-0,69	61	0,13
		<b>GR4J</b>	0,53	-0,24	0,76	67	0,12
22/06/1994	30/09/1994	<b>CAWM</b>	0,31	-0,76	-0,26	48	0,17
		<b>GR4J</b>	0,34	-0,14	0,61	51	0,17
07/05/1997	15/08/1997	<b>CAWM</b>	-7,33	-0,30	-1,98	-157	2,08
		<b>GR4J</b>	-0,85	-0,10	-0,41	-15	0,46
21/01/2004	08/08/2004	<b>CAWM</b>	0,53	0,44	0,49	13	0,12
		<b>GR4J</b>	0,67	0,39	0,25	43	0,08
04/06/2005	12/09/2005	<b>CAWM</b>	0,23	-0,03	-0,85	16	0,19
		<b>GR4J</b>	0,13	0,15	-0,46	23	0,22
19/04/2008	28/07/2008	<b>CAWM</b>	-4,51	-0,63	-3,12	-349	1,38
		<b>GR4J</b>	-0,40	-1,21	-4,55	-134	0,35

13/07/2009	21/10/2009	<b>CAWM</b>	-29,36	0,06	-0,50	-403	7,59
		<b>GR4J</b>	-6,41	0,28	0,47	-194	1,85
25/11/2010	13/06/2011	<b>CAWM</b>	-0,20	0,15	0,19	8	0,30
		<b>GR4J</b>	-0,50	0,21	0,30	34	0,38
01/08/1966	31/12/1986	<b>CAWM</b>	0,70	0,45	-0,33	20	0,08
		<b>GR4J</b>	0,46	0,45	0,58	62	0,13
03/03/1977	01/07/1977	<b>CAWM</b>	0,95	0,89	0,86	2	0,01
		<b>GR4J</b>	0,93	0,70	0,37	21	0,02
10/02/1985	10/02/1919	<b>CAWM</b>	0,81	0,56	-0,62	2	0,05
		<b>GR4J</b>	0,47	0,59	0,64	53	0,13

Tabela B5 – Coeficientes de critério de ajuste para Toritama

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
06/03/1967	12/10/1967	<b>CAWM</b>	0,47	0,22	0,07	32	0,13
		<b>GR4J</b>	-0,15	0,51	0,46	-22	0,29
03/02/1969	23/07/1969	<b>CAWM</b>	0,69	0,49	0,14	42	0,08
		<b>GR4J</b>	0,67	0,79	0,52	10	0,08
08/07/1970	16/10/1970	<b>CAWM</b>	0,17	-2,95	-0,21	78	0,21
		<b>GR4J</b>	0,38	-0,64	0,12	61	0,15
19/03/1974	08/05/1974	<b>CAWM</b>	0,75	0,80	0,87	5	0,06
		<b>GR4J</b>	0,56	0,78	0,87	-36	0,11
12/06/1975	20/09/1975	<b>CAWM</b>	0,87	0,74	0,11	-21	0,03
		<b>GR4J</b>	0,89	0,56	-0,39	-75	0,03
20/02/1981	01/05/1981	<b>CAWM</b>	0,87	0,87	0,83	15	0,03
		<b>GR4J</b>	0,86	0,88	0,68	-3	0,04
21/11/1984	09/06/1985	<b>CAWM</b>	0,68	0,71	0,62	32	0,08
		<b>GR4J</b>	0,68	0,78	0,65	-4	0,08
22/06/1994	30/09/1994	<b>CAWM</b>	0,26	-1,36	-1,17	60	0,18
		<b>GR4J</b>	0,39	0,17	-1,57	17	0,15
07/05/1997	15/08/1997	<b>CAWM</b>	-51,89	-0,63	-6,21	-1194	13,22
		<b>GR4J</b>	-170,33	-0,51	-4,08	-2470	42,83
21/01/2004	08/08/2004	<b>CAWM</b>	-0,33	0,60	-0,80	-10	0,33
		<b>GR4J</b>	-0,54	0,58	-1,83	-52	0,38
04/06/2005	12/09/2005	<b>CAWM</b>	0,26	-1,73	-0,18	61	0,18
		<b>GR4J</b>	0,12	-0,40	0,29	29	0,22
19/04/2008	28/07/2008	<b>CAWM</b>	-1,72	0,62	0,66	-34	0,68
		<b>GR4J</b>	-15,89	0,48	0,73	-172	4,22
13/07/2009	21/10/2009	<b>CAWM</b>	-1,09	-0,02	-0,33	30	0,52
		<b>GR4J</b>	-10,71	0,36	0,33	-44	2,93
25/11/2010	13/06/2011	<b>CAWM</b>	0,28	-2,28	-1,52	68	0,18
		<b>GR4J</b>	0,27	-1,47	-0,39	47	0,18

01/01/1966	31/12/1986	<b>CAWM</b>	0,59	0,45	0,12	16	0,10
		<b>GR4J</b>	0,38	0,33	-0,06	-43	0,15
22/04/1977	22/05/1977	<b>CAWM</b>	0,89	0,81	0,83	19	0,03
		<b>GR4J</b>	0,88	0,80	0,78	1	0,03

Tabela B6 – Coeficientes de critério de ajuste para São Lourenço da Mata

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
01/05/1967	31/08/1967	<b>CAWM</b>	0,38	-0,45	-1,38	-39	0,15
		<b>GR4J</b>	-0,16	-1,08	-2,51	-40	0,29
03/02/1969	23/07/1969	<b>CAWM</b>	0,62	0,58	0,64	-24	0,10
		<b>GR4J</b>	0,28	-0,39	-2,24	-20	0,18
08/07/1970	16/10/1970	<b>CAWM</b>	0,77	0,54	-0,20	-44	0,06
		<b>GR4J</b>	0,62	-0,21	-3,25	-15	0,09
19/03/1974	08/05/1974	<b>CAWM</b>	0,78	0,75	0,80	10	0,05
		<b>GR4J</b>	0,46	0,36	0,70	45	0,13
12/06/1975	20/09/1975	<b>CAWM</b>	0,89	0,77	-0,51	-20	0,03
		<b>GR4J</b>	0,92	0,52	-2,53	-22	0,02
20/02/1981	01/05/1981	<b>CAWM</b>	-0,87	0,14	0,59	-28	0,47
		<b>GR4J</b>	0,08	-1,06	-1,41	25	0,23
21/11/1984	22/03/1985	<b>CAWM</b>	0,48	0,51	0,76	23	0,13
		<b>GR4J</b>	0,19	-21,16	-43,36	-15	0,20
22/06/1994	30/09/1994	<b>CAWM</b>	0,35	-0,20	-0,99	-11	0,16
		<b>GR4J</b>	-0,12	-0,71	-3,58	-49	0,28
07/05/1997	15/08/1997	<b>CAWM</b>	-12,58	-0,11	-0,69	-257	3,40
		<b>GR4J</b>	-17,81	-0,20	-0,79	-272	4,70
21/01/2004	08/08/2004	<b>CAWM</b>	0,46	0,25	-0,82	-53	0,14
		<b>GR4J</b>	0,11	-0,07	-0,91	-43	0,22
04/06/2005	12/09/2005	<b>CAWM</b>	-0,22	-0,13	-3,18	-64	0,31
		<b>GR4J</b>	-1,88	-0,82	-4,51	-103	0,72
19/04/2008	28/07/2008	<b>CAWM</b>	-6,24	-0,19	-0,57	-404	1,81
		<b>GR4J</b>	-8,95	-0,21	-0,60	-389	2,49
13/07/2009	21/10/2009	<b>CAWM</b>	-47,38	0,09	-0,05	-392	12,09
		<b>GR4J</b>	-136,19	0,11	-0,03	-524	34,30
25/11/2010	13/06/2011	<b>CAWM</b>	-0,75	0,42	0,31	-44	0,44
		<b>GR4J</b>	0,16	-0,17	-1,87	-26	0,21
01/08/1966	31/12/1986	<b>CAWM</b>	0,78	0,82	0,80	-10	0,05
		<b>GR4J</b>	0,71	0,04	-1,69	-64	0,07
03/03/1977	01/07/1977	<b>CAWM</b>	0,65	0,71	0,69	-26	0,09
		<b>GR4J</b>	0,52	0,16	-1,32	-8	0,12
01/08/1966	13/10/1980	<b>CAWM</b>	0,82	0,80	0,77	-19	0,04
		<b>GR4J</b>	0,74	-0,10	-2,35	-78	0,07

01/03/1974	30/07/1974	<b>CAWM</b>	0,76	0,73	0,74	15	0,06
		<b>GR4J</b>	0,53	0,58	0,72	20	0,12
01/05/1974	01/06/1974	<b>CAWM</b>	0,79	0,71	0,63	-7	0,05
		<b>GR4J</b>	0,85	0,86	0,84	-1	0,04

Tabela B7 – Coeficientes de critério de ajuste para Inajá

Evento		Coeficientes					
Início	Fim	Modelo	NSE	NSE <sub>RAIZ</sub>	NSE <sub>LOG</sub>	PBIAS	RSR
16/12/1977	04/07/1978	<b>CAWM</b>	-0,16	0,70	0,78	-53	0,29
		<b>GR4J</b>	0,39	0,35	0,69	21	0,15
05/01/1980	14/04/1980	<b>CAWM</b>	-46,13	0,16	0,25	-485	11,78
		<b>GR4J</b>	-0,43	-0,62	-0,19	51	0,36
08/02/1981	19/05/1981	<b>CAWM</b>	-6,77	0,49	0,54	-355	1,94
		<b>GR4J</b>	-0,83	0,46	0,51	-174	0,46
13/02/1984	12/07/1984	<b>CAWM</b>	-159,06	0,21	0,25	-919	40,02
		<b>GR4J</b>	-7,80	0,12	0,10	-247	2,20
09/12/1984	05/10/1985	<b>CAWM</b>	0,28	0,36	0,35	-37	0,18
		<b>GR4J</b>	0,79	0,79	0,67	-31	0,05
13/01/1986	20/09/1986	<b>CAWM</b>	-0,59	0,44	0,39	-73	0,40
		<b>GR4J</b>	0,31	-0,77	0,41	46	0,17
17/01/1989	24/09/1989	<b>CAWM</b>	-48,50	0,12	0,24	-310	12,37
		<b>GR4J</b>	-0,03	0,33	0,36	2	0,26
03/12/1991	01/05/1992	<b>CAWM</b>	-5,03	0,57	0,34	-218	1,51
		<b>GR4J</b>	0,23	-0,92	-0,06	49	0,19
20/12/2003	18/05/2004	<b>CAWM</b>	-0,37	-0,07	-0,39	-65	0,34
		<b>GR4J</b>	0,03	-1,87	-2,32	34	0,24
09/12/2007	15/08/2008	<b>CAWM</b>	-3,34	0,16	-0,84	-200	1,09
		<b>GR4J</b>	-3,08	0,39	-0,34	-256	1,02
12/01/2009	31/07/2009	<b>CAWM</b>	-6,59	0,10	-0,44	-306	1,90
		<b>GR4J</b>	-0,27	0,15	-0,99	-127	0,32

## APÊNDICE C – Hidrogramas

Figura C1 – Hidrograma com série total de dados de Sirinhaém

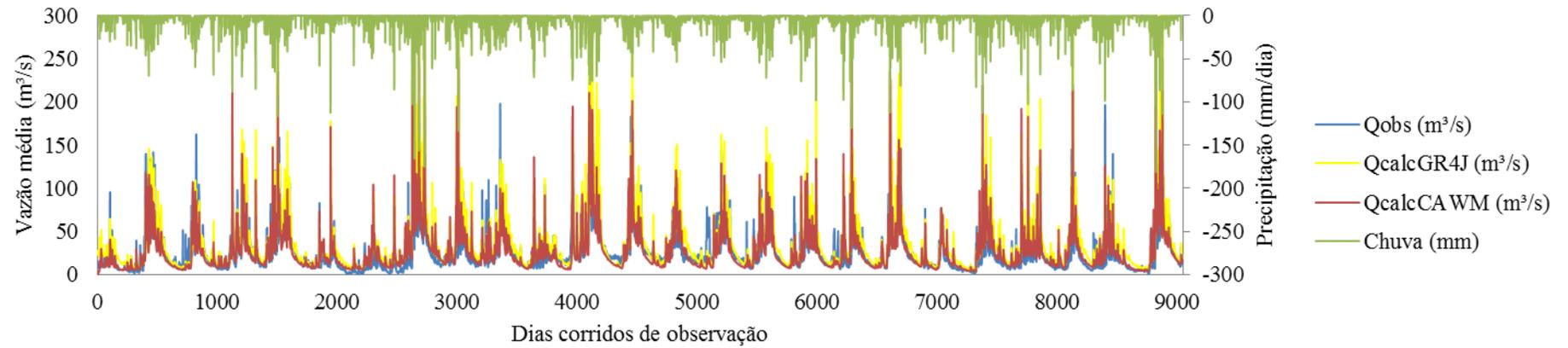


Figura C2 – Hidrograma com série total de dados de Floresta

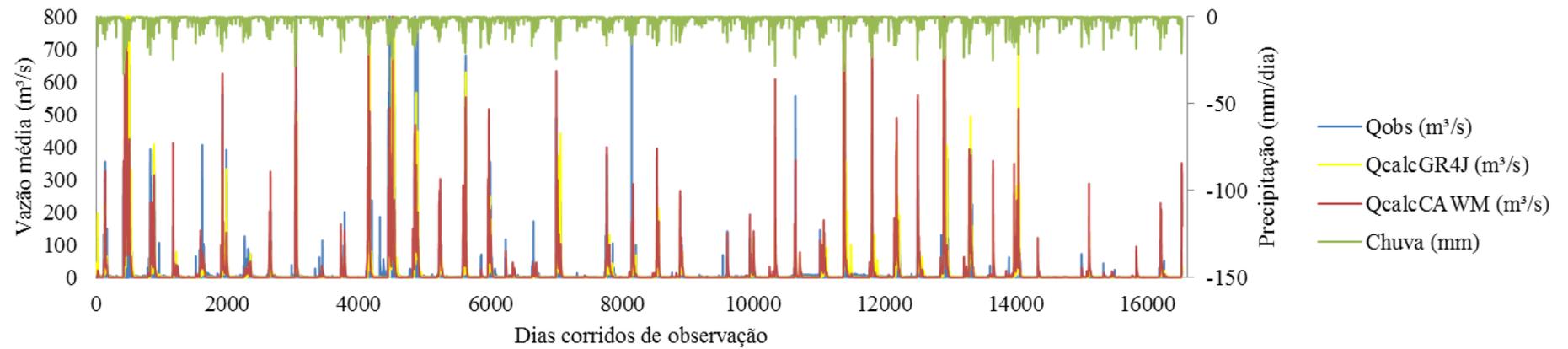


Figura C3 – Hidrograma com série total de dados de Limoeiro

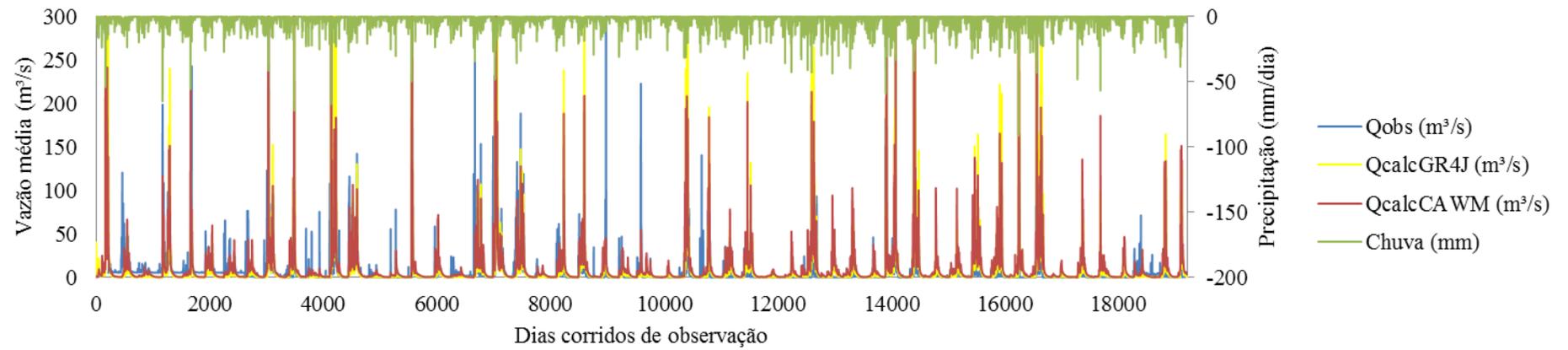


Figura C4 – Hidrograma com série total de dados de Toritama

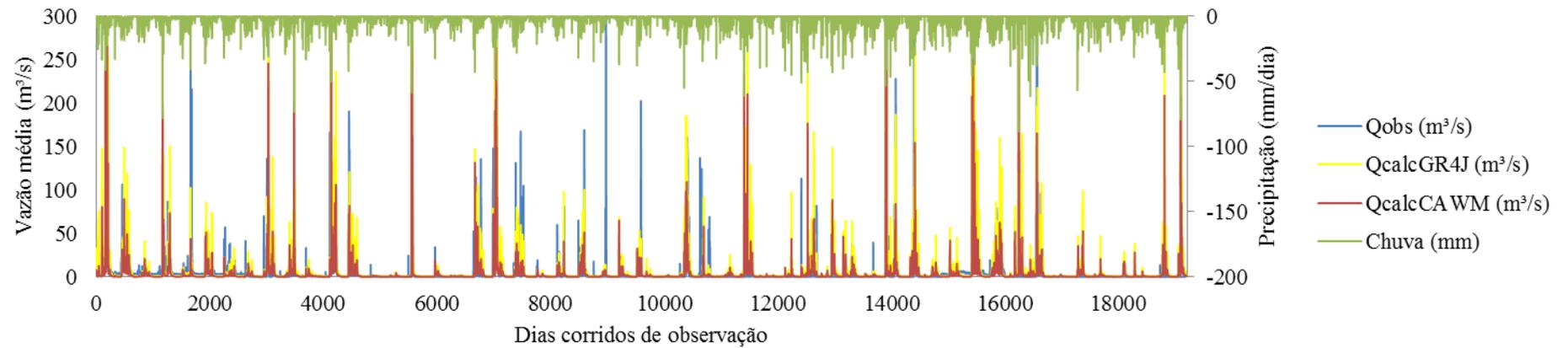


Figura C5 – Hidrograma com série total de dados de Paudalho

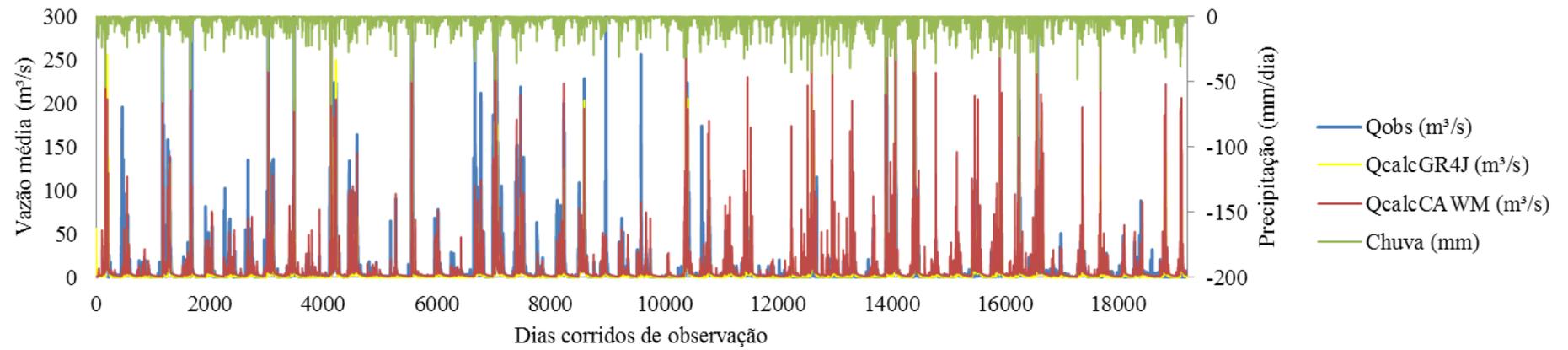


Figura C6 – Hidrograma com série total de dados de São Lourenço da Mata

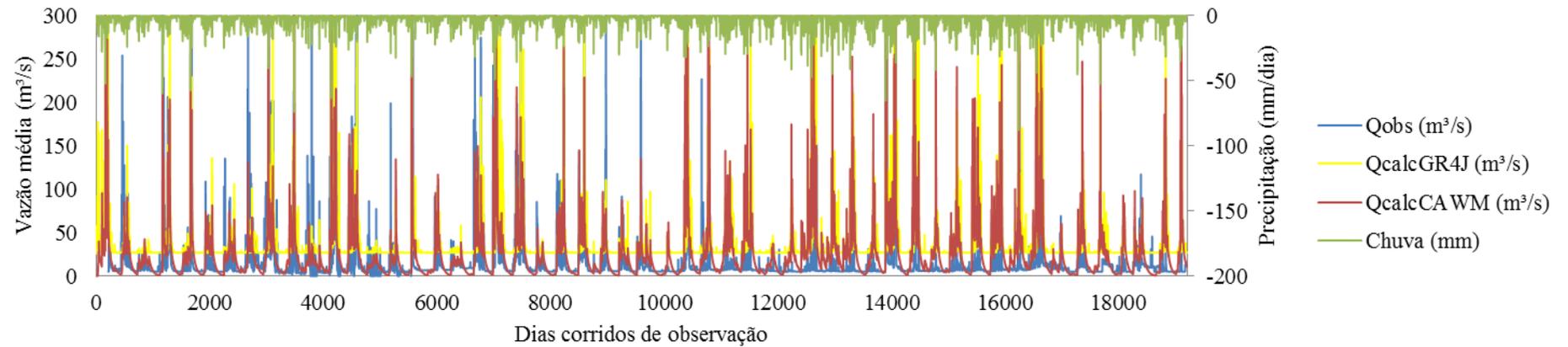


Figura C7 – Hidrograma com série total de dados de Inajá

