



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

ÁGNES SALES ALVES DE SOUSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS EM REGIÕES  
ÚMIDAS: APLICAÇÕES DO MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED  
MODEL**

Caruaru

2022

ÁGNES SALES ALVES DE SOUSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS EM REGIÕES  
ÚMIDAS: APLICAÇÕES DO MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED  
MODEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do  
Campus Agreste da Universidade Federal de  
Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo  
científico, como requisito parcial para obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos

**Orientador(a):** Prof. Dr. José Almir Cirilo

Caruaru  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeira instância, a Deus e a Nossa Senhora por me conduzirem ao longo de toda formação acadêmica, fornecendo-me discernimento e diligência.

Aos meus pais, José Eraldo Alves de Sousa e Rozelane de Sales Marinho Sousa, cujos plurais sacrifícios realizados proporcionaram-me educação, saúde, bem estar e integridade, outrossim são parâmetros inenarráveis de renúncia em detrimento da minha formação adequada, sou grata por todo amor e paciência. Aos meus irmãos Sávio Sales, Isabelle Sales, Mykaelly Sales, Miguel Arcanjo, Beatriz Sales e Catarina Sales pelo companheirismo e amizade em todas as circunstâncias. Ao meu namorado, Matheus Araújo, que tanto admiro, pela cumplicidade, conforto e amor em todos os momentos, em especial perante as adversidades inerentes à jornada, pelas vezes em que me auxiliou e ensinou ao longo do curso.

A todos os meus amigos e família, por me incentivarem e apoiarem durante a trajetória. Em especial a minha amiga Maria Eduarda Rodrigues, que trilhou comigo esta jornada integralmente desde os primeiros períodos do curso, sendo canal de fortalecimento de fé e perseverança, estimulando-me a aceitar e enfrentar desafios.

Ao meu orientador, o professor José Almir Cirilo por compartilhar o seu conhecimento e fornecer orientação com tamanha dedicação, sempre paciente e acolhedor, sendo incessantemente sinônimo de humildade e generosidade.

A todos os professores e colaboradores da Universidade Federal de Pernambuco, por todas as suas contribuições à minha formação acadêmica. Evidenciando, sobretudo, os professores Arthur Coutinho e Edevaldo Miguel pelas primeiras oportunidades no âmbito de Recursos Hídricos, estimulando a elaboração de artigos científicos, bem como a participação em simpósios nesse segmento logo no início da graduação.

A toda equipe do GeoLab (Laboratório de Geoprocessamento – UFPE/ CAA), pelo constante aprimoramento de abordagens no tocante às demandas que transcendem o âmbito acadêmico, uma vez que contribui diretamente com o desenvolvimento de projetos como o PE3D (Pernambuco Tridimensional), o qual possui vasto potencial de utilização para as intervenções que requerem detalhamento preciso do terreno, como estradas, ferrovias, barragens, sistemas de irrigação, redes de água, esgotos, energia, gás, serviços de mineração e toda a gama de empreendimentos públicos e privados de maior porte.

Gratidão, também, a todos os princípios transmitidos pela Empresa Júnior Pórtis Soluções em Engenharia, cuja missão vislumbra a expansão da matriz de competências e habilidades pertinentes para inserção no mercado de trabalho.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”*

*(Josué 1:9)*

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                                                 |
|----------|-------------------------------------------------|
| $\alpha$ | Parâmetro de evaporação complementar            |
| $\beta$  | Parâmetro de infiltração                        |
| $A_b$    | Área da sub-bacia                               |
| CN       | <i>Curve number</i>                             |
| $E_d$    | Evapotranspiração direta                        |
| $E_s$    | Evapotranspiração suplementar                   |
| $F_d$    | Fluxo de escoamento superficial direto          |
| $F_g$    | Fluxo subterrâneo                               |
| $F_L$    | Perdas de água do sistema                       |
| $F_r$    | Escoamento na calha fluvial                     |
| $F_s$    | Fluxo subsuperficial                            |
| G        | Lâmina de água acumulada subterrânea            |
| I        | Declividade                                     |
| K        | Parâmetro de escoamento da calha do rio         |
| $K_G$    | Parâmetro de permeabilidade do solo profundo    |
| $K_L$    | Parâmetro de perdas                             |
| $K_S$    | Parâmetro de permeabilidade do solo superficial |
| $L_t$    | Comprimento da rede de rios                     |
| $P_m$    | Precipitação média                              |
| $P_s$    | Recarga do solo                                 |
| $P_n$    | Precipitação efetiva                            |
| R        | Calha fluvial                                   |
| S        | Capacidade máxima de retenção de água no solo   |
| $S_t$    | Retenção água no solo ao longo do tempo         |

## **Modelagem hidrológica para bacias hidrográficas em regiões úmidas: aplicações do modelo Campus Agreste Watershed Model**

### **Hydrological modeling for watersheds in humid regions: applications of the Campus Agreste Watershed Model**

**Ágnes Sales Alves de Sousa<sup>1</sup>**

---

#### **RESUMO**

A modelagem hidrológica configura-se como um instrumento eficaz para o processo de planejamento de estratégias pertinentes a eventos vinculados aos recursos hídricos, tendo em vista que permite avaliar a operação de reservatórios e a ocorrência de cheias e secas, bem como analisar o impacto de obras hidráulicas e ações antrópicas, e prever a resposta do sistema a mudanças. Todavia, inegavelmente há empecilhos no âmbito referente à coleta de dados inerentes ao processamento da modelagem hidrológica. Por conseguinte, a fim de atenuar os impasses, adota-se a regionalização de parâmetros hidrológicos, a qual consiste em transferir parâmetros de um modelo chuva-vazão numa bacia monitorada, denominada “doadora”, para uma bacia não monitorada, mas hidrologicamente semelhante. Os modelos chuva-vazão surgiram a partir da necessidade de obtenção de dados fluviométricos frente à escassez de redes de monitoramento hidrológico fluvial. Em detrimento dos fatores expostos, o trabalho em questão aplica um novo modelo chuva-vazão conceitual, o CAWM V (*Campus Agreste Watershed Model V*), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, cujo objetivo é voltado à regionalização de valores dos seus parâmetros para um conjunto de bacias hidrográficas com escassez de dados hidrológicos. Desencadeando, dessa forma, a ampliação da matriz de dados para promover a parametrização de mais bacias. No tocante à modelagem hidrológica, as áreas que estão sendo analisadas nesse estudo compreendem os rios litorâneos dos estados da Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco. O desempenho do modelo para estas bacias foi medido através dos coeficientes *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), percentual de tendência bias (PBIAS) e a razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações (RSR). Estes coeficientes mostraram um bom desempenho geral do modelo CAWM V para as bacias litorâneas abordadas.

**Palavras-chave:** CAWM V; modelos hidrológicos; escoamento em regiões úmidas.

---

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: agnes.sales@ufpe.br

---

**ABSTRACT**

The hydrological modeling is configured as an effective instrument for the process of planning strategies relevant to events linked to water resources, considering for evaluating the operation of reservoirs and the occurrence of floods and droughts, as well as analyzing the impact of works hydraulics and human actions, and predict the system's response to changes. However, there are undeniably obstacles in the scope of data collection inherent to the processing of hydrological modeling. Therefore, to alleviate the impasses, the regionalization of hydrological parameters is adopted, which consists of transferring parameters from a rainfall-runoff model in a monitored basin, called “donor”, to an unmonitored, but hydrologically similar, basin. The rainfall-runoff models emerged from the need to obtain fluviometric data in view of the scarcity of river hydrological monitoring networks. To the detriment of the exposed factors, the work in question applies a new conceptual rain-runoff model, the CAWM V (Agreste Campus Watershed Model V), developed at the Federal University of Pernambuco, whose objective is to regionalize the values of its parameters for a set of watersheds with scarcity of hydrological data. Thus, triggering the expansion of the data matrix to promote the parameterization of more basins. With regard to hydrological modeling, the areas being analyzed in this study comprise the coastal rivers of the states of Alagoas, Bahia, Paraíba and Pernambuco. The performance of the model for these basins was measured through the coefficients Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), percentage of trend bias (PBIAS) and the ratio between the RMSE and the standard deviation of the observations (RSR). These coefficients showed a good general performance of the CAWM V model for the littoral basins approached from the states of Alagoas, Bahia, Paraíba and Pernambuco. The performance of the model for these basins was measured through the coefficients Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), percentage of trend bias (PBIAS) and the ratio between the RMSE and the standard deviation of the observations (RSR). These coefficients showed a good general performance of the CAWM V model for the littoral basins addressed.

**Keywords:** CAWM V; hydrological models; river flow in wet regions.

---

**DATA DE APROVAÇÃO:** 25 de maio de 2022.

---

**1 INTRODUÇÃO**

A gestão adequada dos recursos hídricos requer o entendimento dos processos hidrológicos que operam dentro da bacia hidrográfica. Dentro desse contexto, a modelagem hidrológica se apresenta como uma ferramenta essencial para o processo de planejamento uma vez que permite avaliar a operação de reservatórios e a ocorrência de cheias e secas, analisar o impacto de obras hidráulicas e ações antrópicas, e prever a resposta do sistema a mudanças (HARTNETT et al., 2007).

É notório que apesar dos avanços realizados nos últimos anos, a modelagem hidrológica continua sendo uma atividade complexa e desafiadora, especialmente em áreas com escassez de dados monitorados. Os altos custos de implementação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica e a baixa cobertura são as principais causas da carência de informações hidrológicas em diversas bacias hidrográficas no Brasil. Para suprir essa deficiência, uma técnica que tem sido amplamente difundida é a regionalização de parâmetros hidrológicos, cujo escopo consiste em transferir parâmetros de um modelo chuva-vazão de uma bacia monitorada, denominada “doadora”, para uma bacia não monitorada, mas hidrológicamente semelhante (SIVAPALAN et al., 2003).

As técnicas de regionalização mais utilizadas são: regressão, proximidade espacial e similaridade física. Diversos estudos têm avaliado essas diferentes abordagens de transferência de parâmetros de modelos hidrológicos de bacias monitoradas para bacias não monitoradas (OUDIN et al., 2008; ZHANG; CHIEW, 2009; PATIL; STIEGLITZ, 2012; HRACHOWITZ et al., 2013). No entanto, devido a fatores como a não linearidade das respostas das bacias, alterações no clima e no solo e a grande heterogeneidade espacial e temporal do clima e das propriedades do solo, essa extrapolação de informação permanece repleta de dificuldades e incertezas (Lima et al., 2007), sendo necessários ainda mais estudos. Além disso, conforme demonstrado por Kay et al. (2006), a performance de cada método de regionalização depende da estrutura e parametrização utilizadas no modelo chuva-vazão aplicado.

Um dos grandes entraves na modelagem hidrológica é a escassez de dados para o processo de simulação de eventos na bacia hidrográfica. Desta forma, a regionalização de parâmetros pode ser vista como uma alternativa facilitadora para a avaliação da resposta hidrológica em regiões com poucos dados disponíveis. Com esse objetivo, é necessária a boa estruturação de uma base de dados para que seja possível a regionalização.

Neste contexto, o presente trabalho aplica um novo modelo chuva-vazão conceitual, o CAWM V (*Campus Agreste Watershed Model* versão V), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, que vem apresentando resultados promissores (Ferraz, 2019), cujo objetivo é regionalizar os valores dos seus parâmetros para um conjunto de bacias hidrográficas com escassez de dados hidrológicos.

As áreas que estão sendo analisadas nesse estudo compreendem os rios litorâneos dos estados da Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco. Outrossim, são abordadas sub-bacias com dados que apresentem viabilidade para o estudo em questão, uma vez que é necessário

selecionar corpos hídricos com o intuito de calibrá-los para regionalização de parâmetros e aprimoramento do modelo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Este trabalho objetiva a consolidação do modelo chuva-vazão *Campus Agreste Watershed Model V* (CAWM V), através da modelagem hidrológica para um conjunto de bacias hidrográficas litorâneas nos estados nordestinos de Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco. Por conseguinte, possibilita a calibração do modelo e a previsão da vazão em bacias que possuam dados fluviométricos insuficientes.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do presente trabalho podem ser explicitados nos tópicos subsequentes:

- Através do software de geoprocessamento QGIS, adquirir os dados iniciais de caracterização das bacias;
- Utilizar o modelo CAWM V para calibração de bacias para as quais se dispõe de dados fluviométricos e obter seus parâmetros regionalizáveis.

---

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Área de estudo**

Nesse estudo são abordados os rios litorâneos dos seguintes estados do Nordeste brasileiro: Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco.

#### **2.1.1 Alagoas**

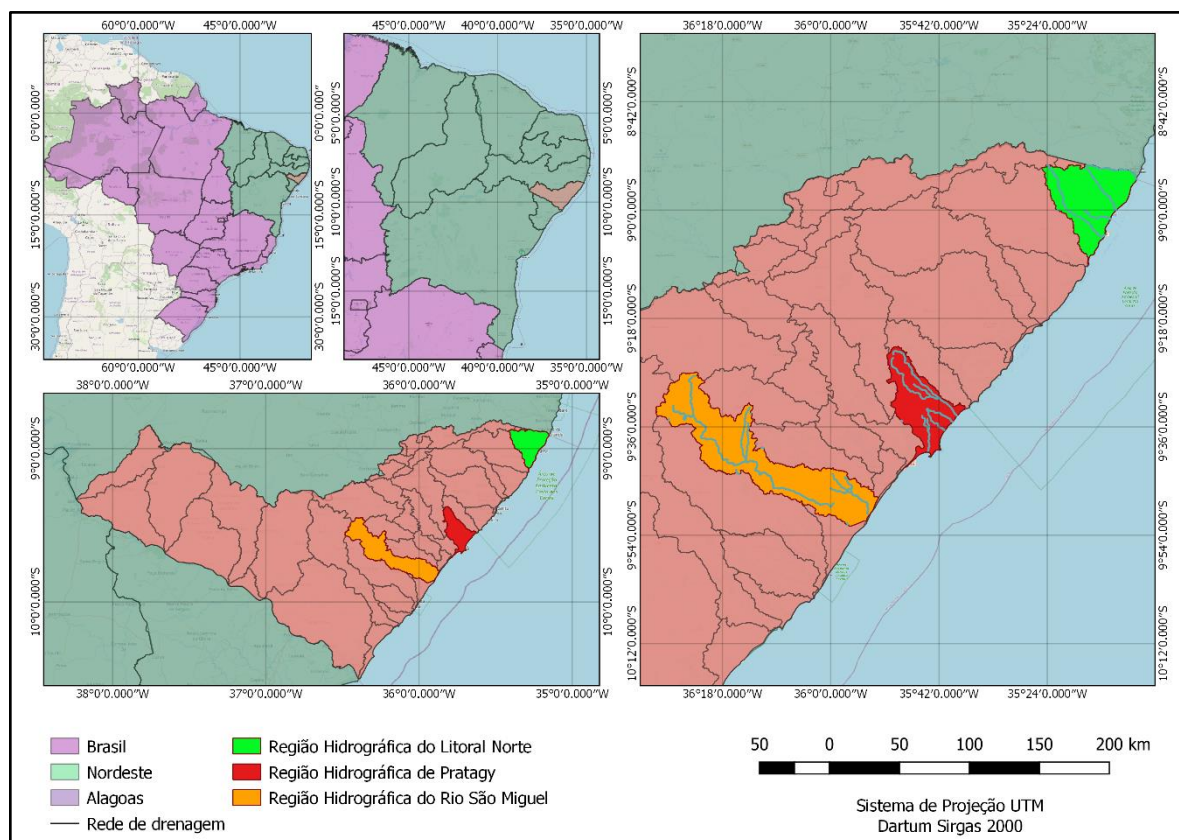
A rede de drenagem de Alagoas pertence às bacias do Rio São Francisco (oeste) e do Atlântico Nordeste Oriental (leste). Entre os seus principais cursos d'água estão os rios Mundaú, Camaragibe, Coruripe, Ipanema, Manguaba e São Francisco. São localizadas no Estado de Alagoas, na região Nordeste do Brasil, incluídas por força da Lei nº13.702, de 06 de agosto de 2018, e mantidas sob a Lei nº14.053, de 08 de setembro de 2020, as bacias dos rios Coruripe, São Miguel, Bandeira, Camaragibe, Carvão, Jirituba, Manguaba, Poxinzinho, Persinunga, Pratagi e riacho Comandatuba, além de diversas outras bacias litorâneas diminutas.

Essas bacias apresentam área total de 7.749,89 km<sup>2</sup>, onde se distribuem 57 municípios com população agregada estimada em 2.514.432 habitantes (CODEVASF/IBGE, 2020). As demais bacias hidrográficas do Estado de Alagoas estão sob jurisdição da 5ª Superintendência Regional da Companhia de Desenvolvimento do Vale São Francisco (CODEVASF).

A modelagem hidrológica foi direcionada às regiões hidrográficas do Litoral Norte, que são Pratagy e São Miguel, conforme explicitado na Figura 1 e na Figura 2.

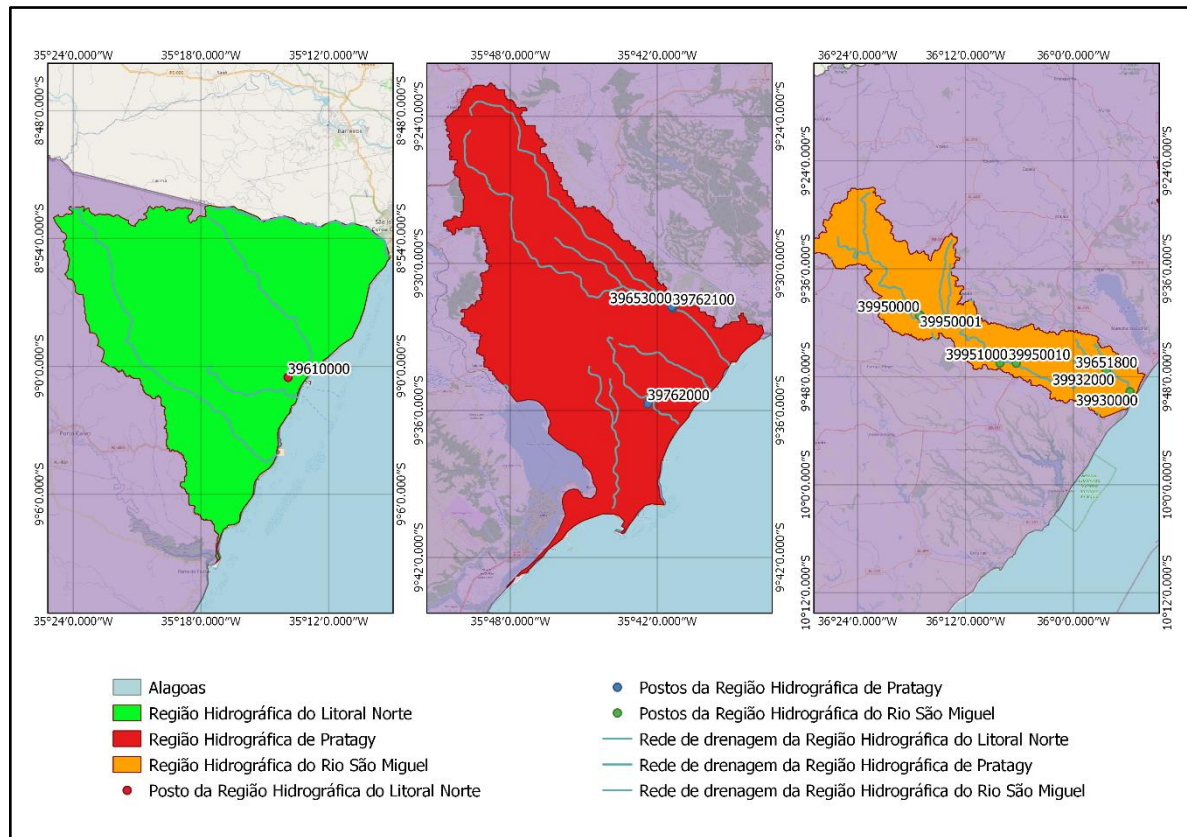
Ressalta-se, ainda, que os postos pluviométricos viáveis para implementar calibração, no tocante à volume suficiente de dados com ínfimas falhas no período abordado, são evidenciados na Figura 2. Na Tabela A.1 – Apêndice A, elenca-se os períodos de simulações dos postos selecionados.

**Figura 1 – Regiões hidrográficas selecionadas referentes ao litoral do estado de Alagoas**



Fonte: Autora (2022)

**Figura 2 – Postos pluviométricos abordados associados a Alagoas**



Fonte: Autora (2022)

## 2.1.2 Bahia

As regiões hidrográficas da Bahia recebem a denominação oficial de Regiões de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA). A divisão hidrográfica do estado foi definida pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH). Diferentemente das bacias hidrográficas, que podem ultrapassar os limites político-territoriais, as regiões hidrográficas, como são estabelecidas por legislação, estão restritas ao espaço territorial baiano. Ainda assim, há as regiões de gestão exclusiva da Bahia e outras de gestão compartilhadas com outras entidades governamentais. As RPGAs, levando em consideração a divisão nacional, estão localizadas na região hidrográfica do Atlântico Leste ou do São Francisco.

A resolução nº 43 de março de 2009 do CONERH estabeleceu inicialmente 26 regiões. Mais tarde, a resolução nº 88 de 26 de novembro de 2012 do CONERH alterou a configuração das regiões: diminuiu uma RPGA, ao incluir as sub-bacias dos riachos da Serra Dourada e Brejo Velho, que formavam sozinhas uma RPGA, na RPGA XXIII.

As demais bacias hidrográficas a destacar, localizadas no Estado da Bahia, na região

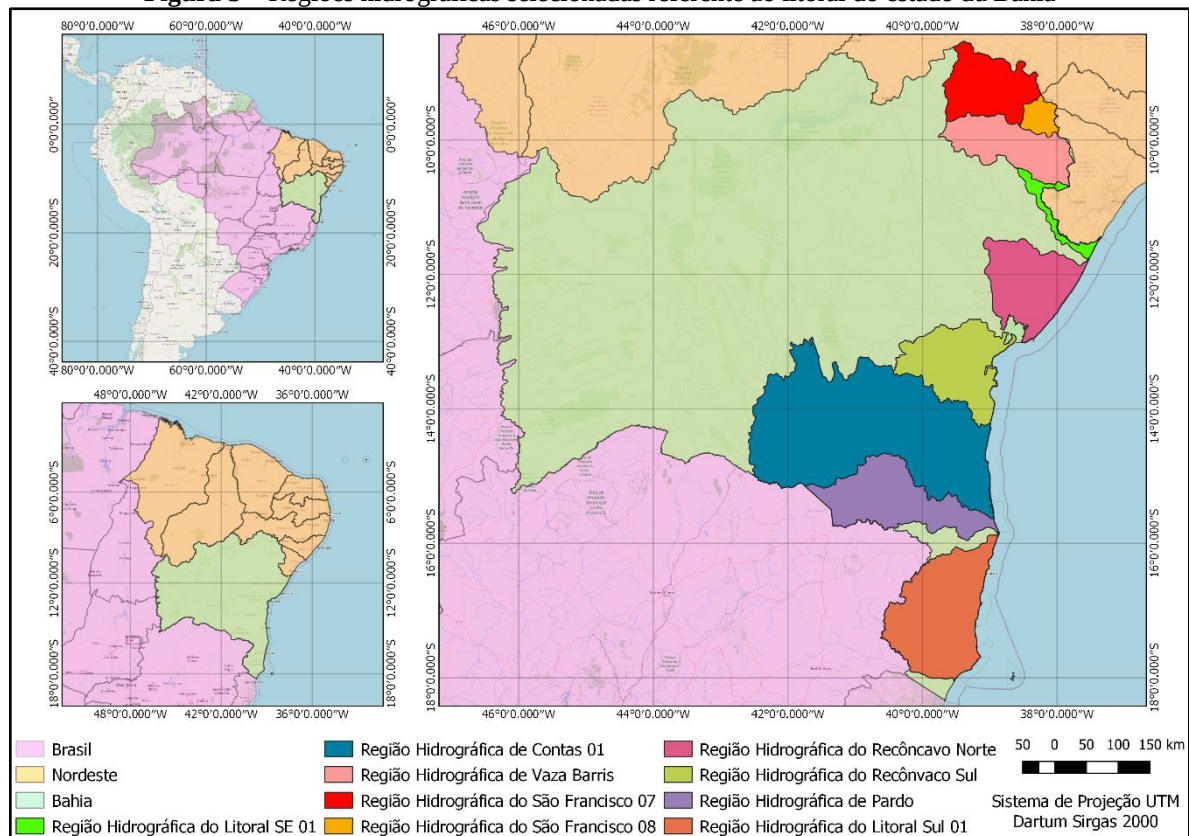
Nordeste do Brasil, incluídas por força da Lei nº14.053, de 08 de setembro de 2020, são as bacias dos rios Aliança, Buranhém, Cachoeira, das Contas, dos Frades, Inhambupe, Itanhém, Jacuípe, Jacurucu, Jaguaripe, Jequié, Jequiriçá, João de Tiba, Peruípe, Pojuca, além de diversas outras bacias litorâneas diminutas.

Essas bacias apresentam área total de 128.243 km<sup>2</sup>, onde se distribuem 223 municípios com população agregada estimada em 10.002.222 habitantes (CODEVASF/IBGE, 2020).

Em consonância com o exposto, a modelagem hidrológica foi direcionada às regiões hidrográficas de Contas, Vaza Barris, São Francisco, Recôncavo Norte, Recôncavo Sul, Pardo e Litoral Sul, conforme explicitado na Figura 3.

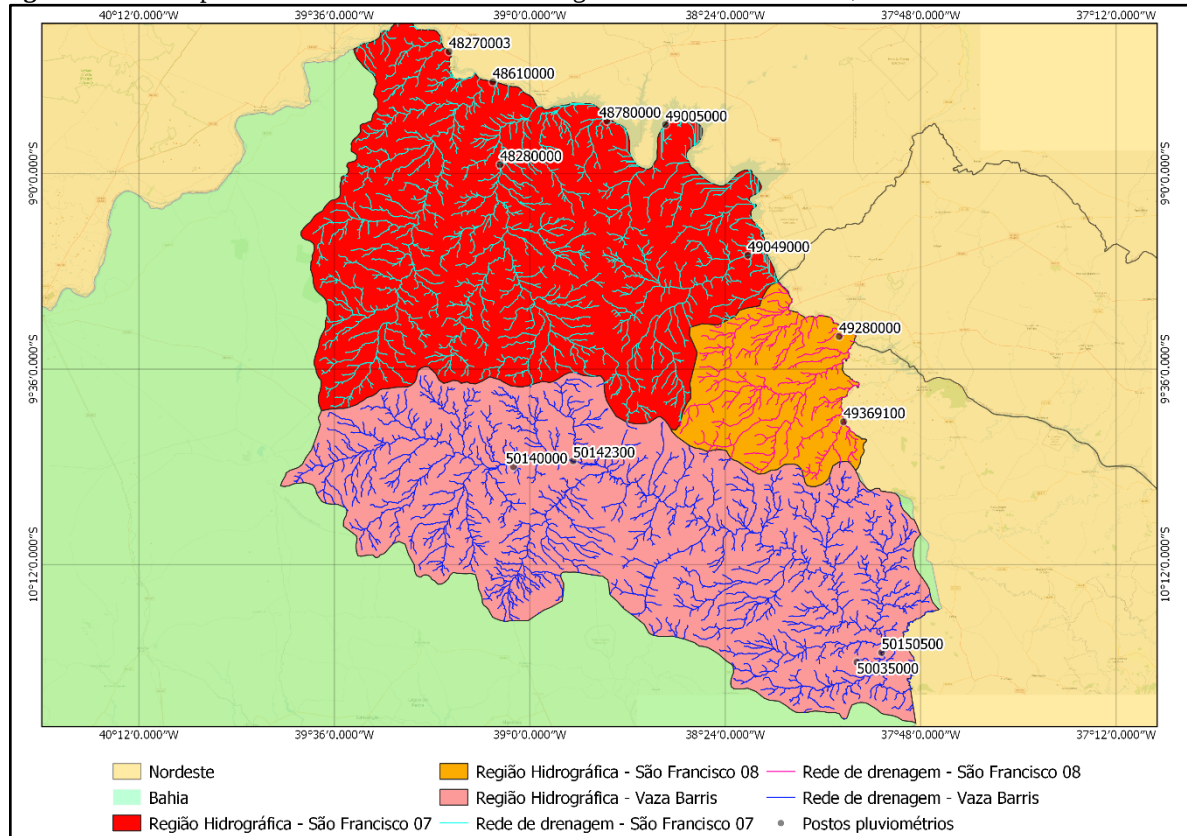
Nas Figuras 4, 5 e 6 são evidenciados os postos pluviométricos viáveis para realizar a calibração almejada. A partir da primeira triagem de postos com histórico de dados suficientemente constantes, antes de implementar os parâmetros no CAWM, foram reavaliados e excluídos do estudo os postos que apresentavam áreas de contribuição pequenas e que não eram representativas ou que faziam parte da área de contribuição de outros postos com áreas maiores. Na Tabela A.2 – Apêndice A, elenca-se os períodos de simulações dos postos selecionados.

**Figura 3 – Regiões hidrográficas selecionadas referente ao litoral do estado da Bahia**



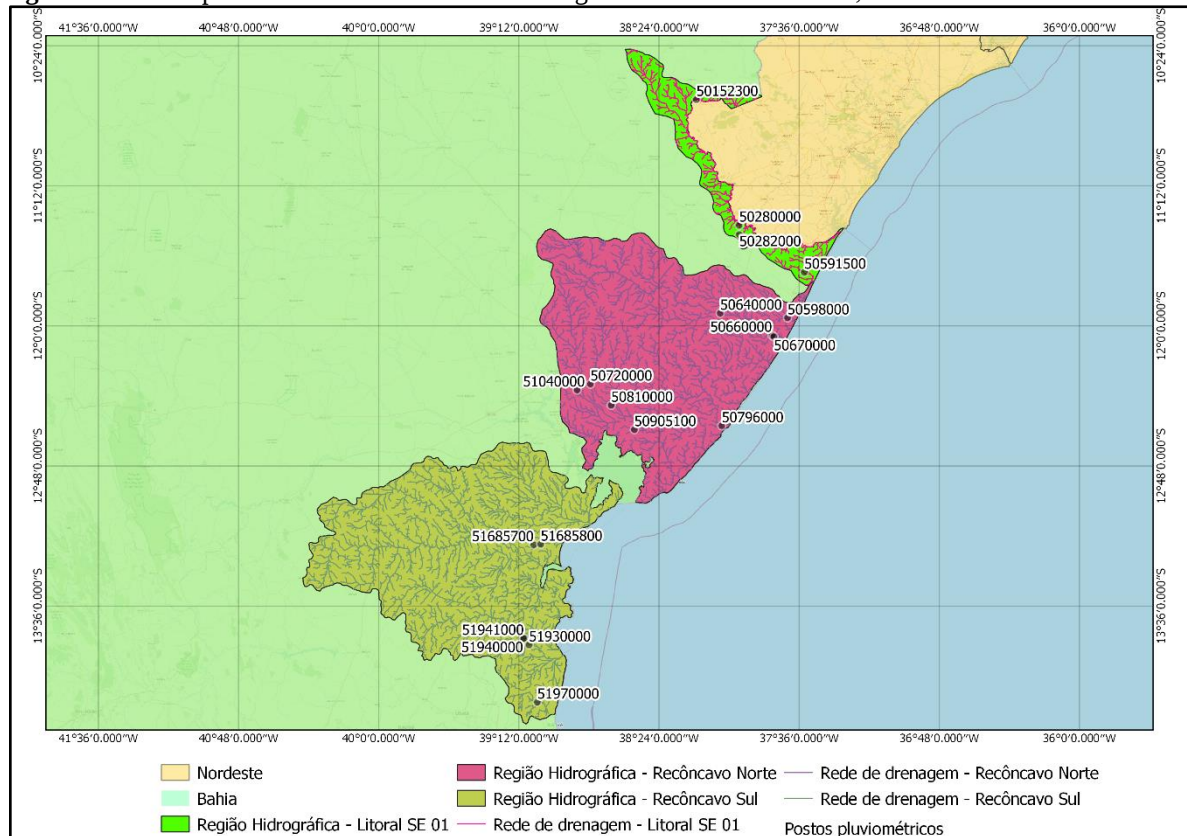
Fonte: Autora (2022)

**Figura 4** – Postos pluviométricos selecionados das regiões de São Francisco 07, São Francisco 08 e Vaza Barris

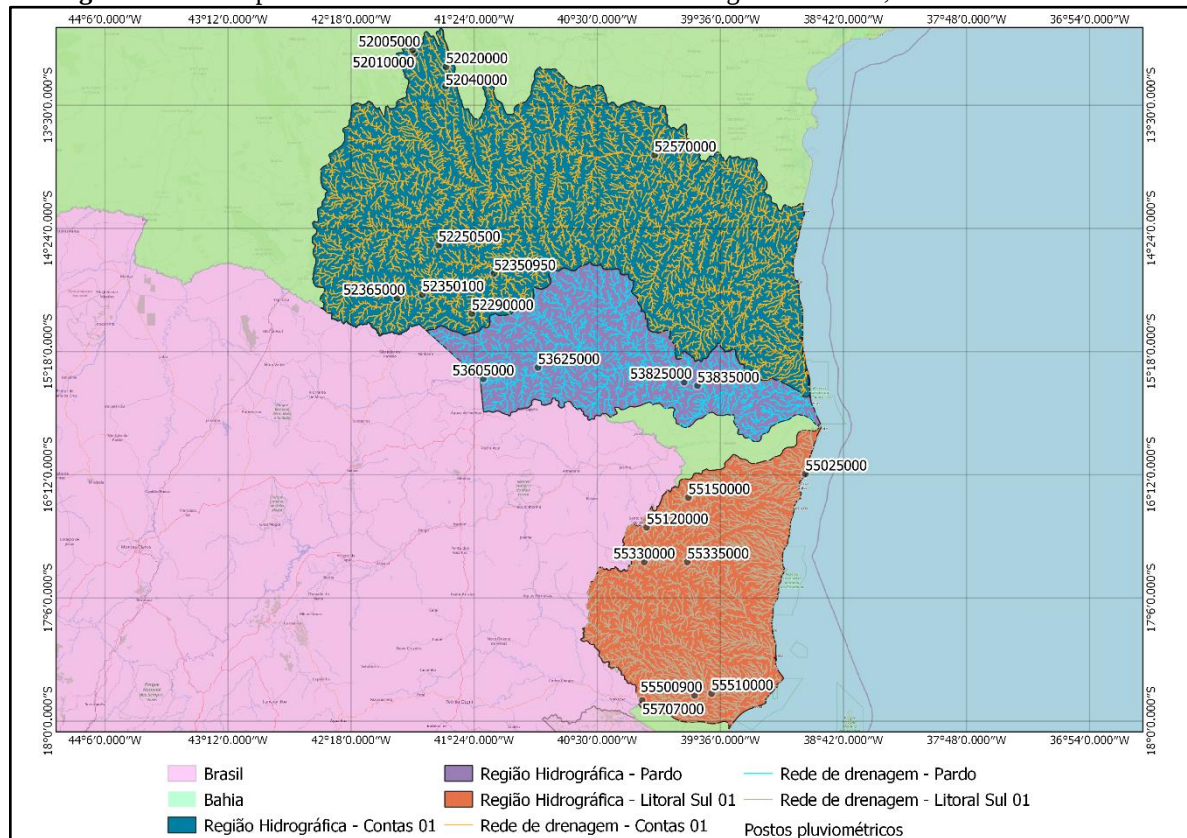


Fonte: Autora (2022)

**Figura 5** – Postos pluviométricos selecionados das regiões de Recôncavo Norte, Recôncavo Sul e Litoral SE 01



Fonte: Autora (2022)

**Figura 6** – Postos pluviométricos selecionados referentes às regiões de Pardo, Contas e Litoral Sul 01

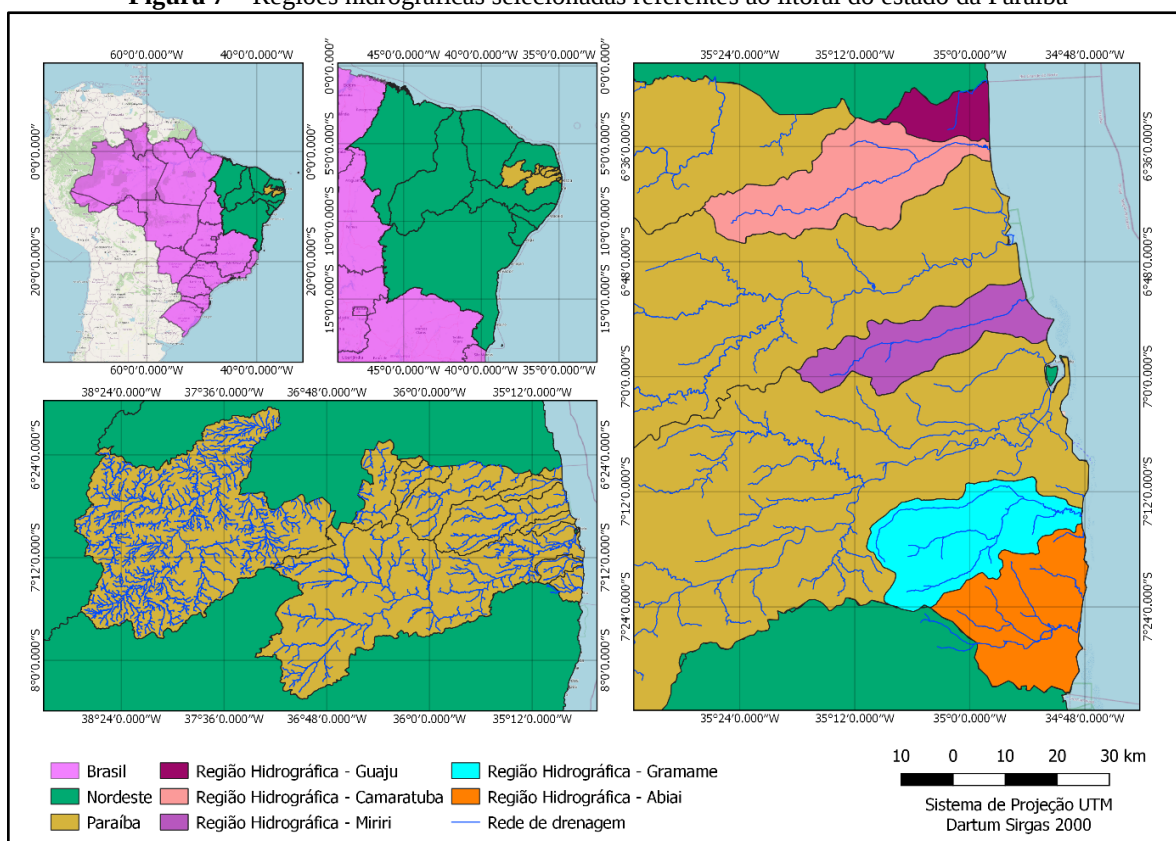
Fonte: Autora (2022)

### 2.1.3 Paraíba

O Estado da Paraíba está dividido em onze bacias hidrográficas: Rio Paraíba; Rio Abiaí; Rio Gramame; Rio Miriri; Rio Mamanguape; Rio Camaratuba; Rio Guaju; Rio Piranhas; Rio Curimataú; Rio Jacu; e Rio Trairi. As cinco últimas são bacias de domínio federal. A bacia do Rio Piranhas foi ainda dividida em quatro sub-bacias (Rio do Peixe, Rio Piancó, Rio Espinharas e Rio Seridó) e duas regiões hidrográficas (Alto Piranhas e Médio Piranhas). Similarmente, a bacia do Rio Paraíba foi dividida em uma sub-bacia (Rio Taperoá) e três regiões (Alto Paraíba, Médio Paraíba e Baixo Paraíba).

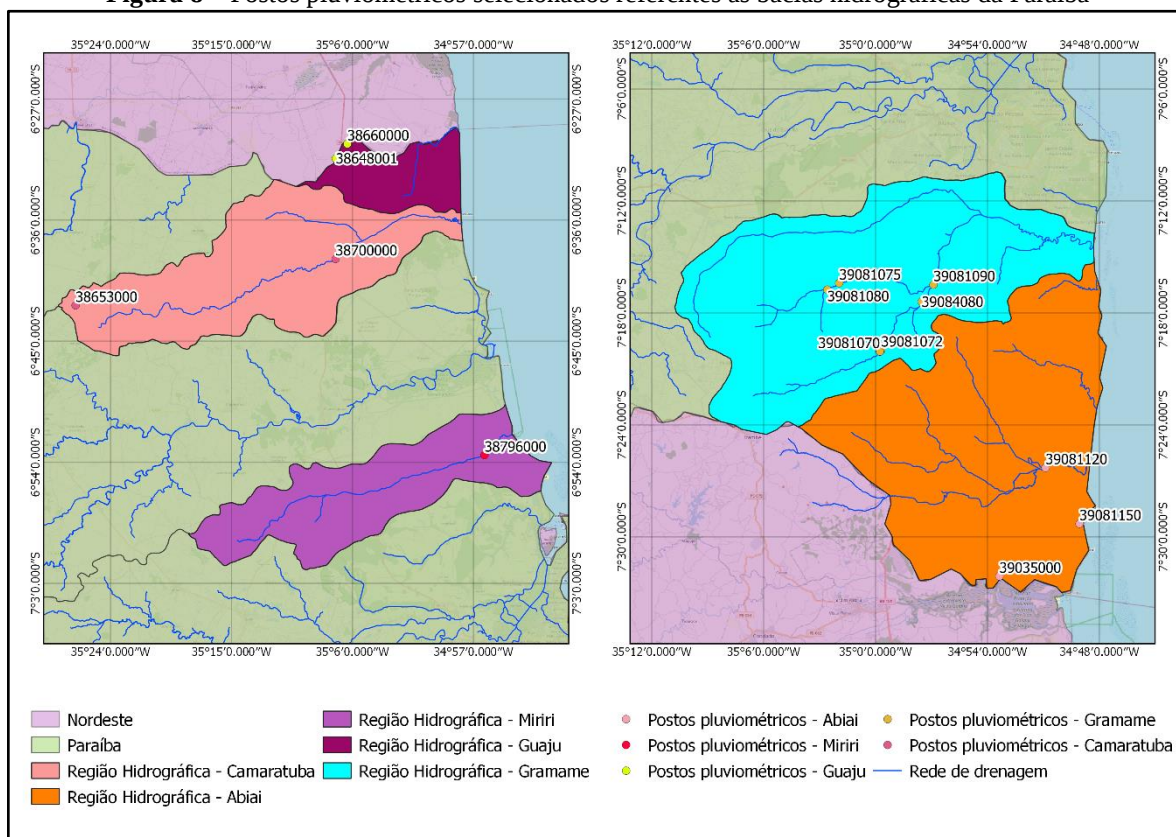
As bacias hidrográficas elencadas na calibração, vinculadas ao estado da Paraíba, foram as bacias dos Rios Abiaí, Gramame, Miriri, Camaratuba e Guaju, de acordo com a Figura 7. Na Figura 8, é possível identificar os postos pluviométricos filtrados para a calibração através do CAWM. A Tabela A.3 – Apêndice A, destaca os períodos de simulações dos postos selecionados.

**Figura 7 – Regiões hidrográficas selecionadas referentes ao litoral do estado da Paraíba**



Fonte: Autora (2022)

**Figura 8 – Postos pluviométricos selecionados referentes às bacias hidrográficas da Paraíba**



Fonte: Autora (2022)

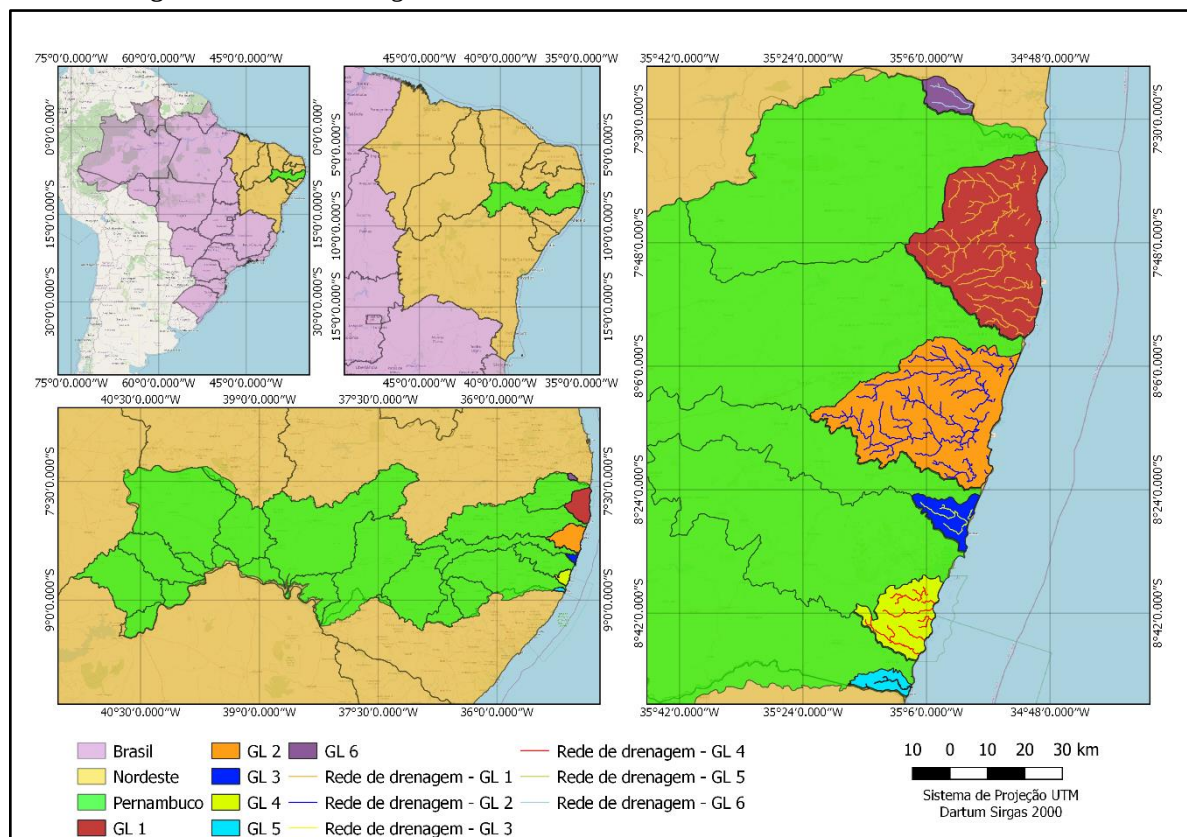
### 2.1.1 Pernambuco

As grandes bacias hidrográficas de Pernambuco possuem duas vertentes: o rio São Francisco e o Oceano Atlântico. As bacias que escoam para o rio São Francisco formam os chamados rios interiores sendo os principais: Pontal, Garças, Brígida, Terra Nova, Pajeú, Moxotó, Ipanema, além de grupos de pequenos rios interiores. As bacias que escoam para o Oceano Atlântico, constituem os chamados rios litorâneos, e os principais são: Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una e Mundaú e GL's.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos (1998) dividiu o Estado em 29 Unidades de Planejamento (UP), caracterizando assim, a Divisão Hidrográfica Estadual, composta de 13 Bacias Hidrográficas, 06 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL1 a GL6), 09 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI1 a GI9) e uma bacia de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha.

Em virtude das premissas supracitadas, salienta-se que a modelagem hidrológica foi direcionada às regiões hidrográficas dos Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL 1, GL 2, GL 3, GL 4, GL 5 e GL 6), conforme explicitado na Figura 9.

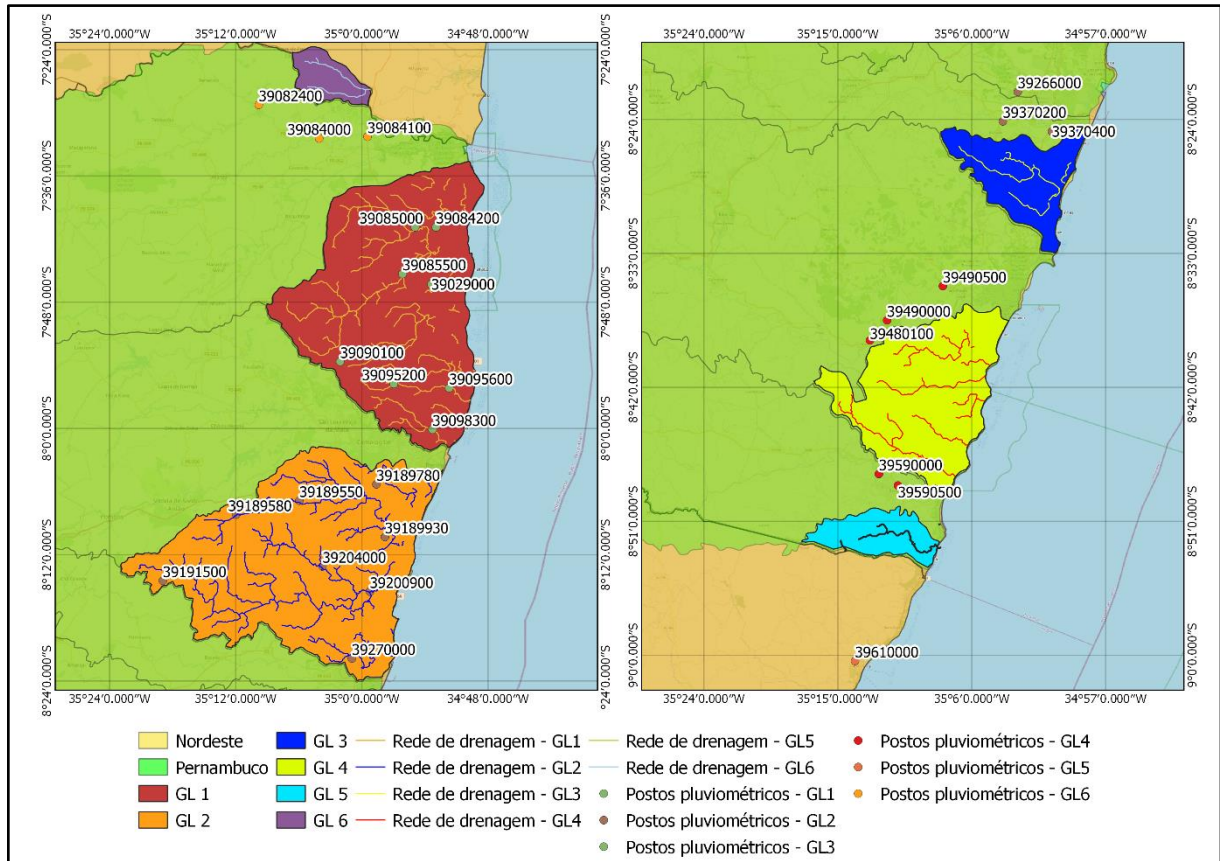
**Figura 9** – Bacias Hidrográficas selecionadas referentes ao litoral do estado de Pernambuco



Fonte: Autora (2022)

Na Figura 10 são evidenciados os postos pluviométricos críveis para realizar a calibração requerida. Na Tabela A.4 – Apêndice A, apresenta-se os períodos de simulações dos postos selecionados.

**Figura 10** – Postos pluviométricos selecionados referentes às bacias de Pernambuco



Fonte: Autora (2022)

Outrossim, é válido informar que foram procurados os postos da ANA (Agência Nacional de Águas) para as sub bacias com dados de vazão tendo uma série histórica igual ou superior a 30 anos com o intuito de ter dados suficientes para poder aplicar o modelo hidrológico CAWM.

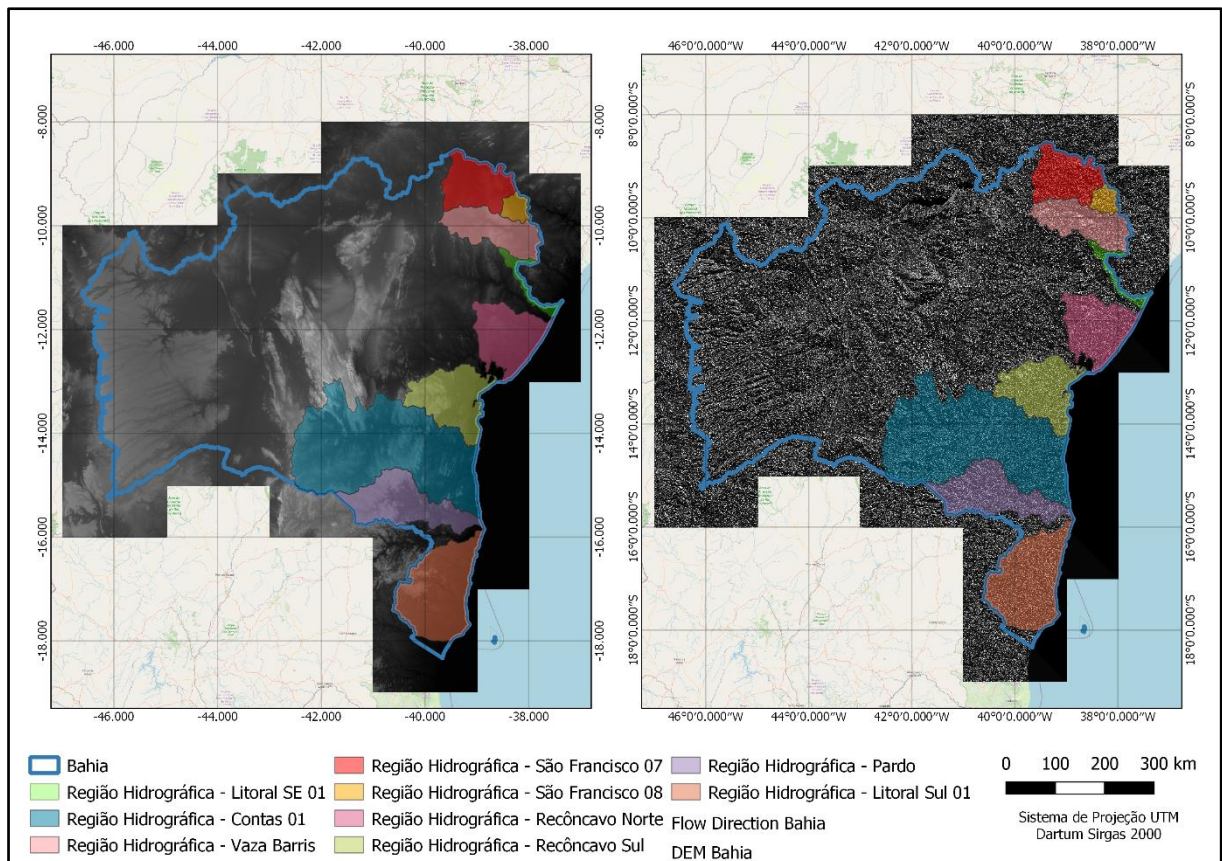
Outro cenário recorrente experienciado ao longo da seleção dos postos críveis para calibração foi associado ao fato de que alguns tinham a série suficiente de dados, porém não foram inseridos estudo de calibração. Os motivos que desencadearam essa seleção foram dois, sendo o primeiro pautado na premissa de que esses postos tinham áreas de contribuição pequenas e que não eram representativas, e o segundo porque faziam parte da área de contribuição de outros postos com áreas maiores.

## 2.2 Descrição do modelo CAWM

O CAWM (*Campus Agreste Watershed Model*) é um modelo chuva-vazão conceitual do tipo concentrado desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco. O modelo pertence ao grupo dos modelos de contabilidade de umidade do solo e tem como principais características a sua reduzida quantidade de parâmetros para calibrar e a incorporação de dados referentes às características físicas da bacia na determinação dos parâmetros do modelo.

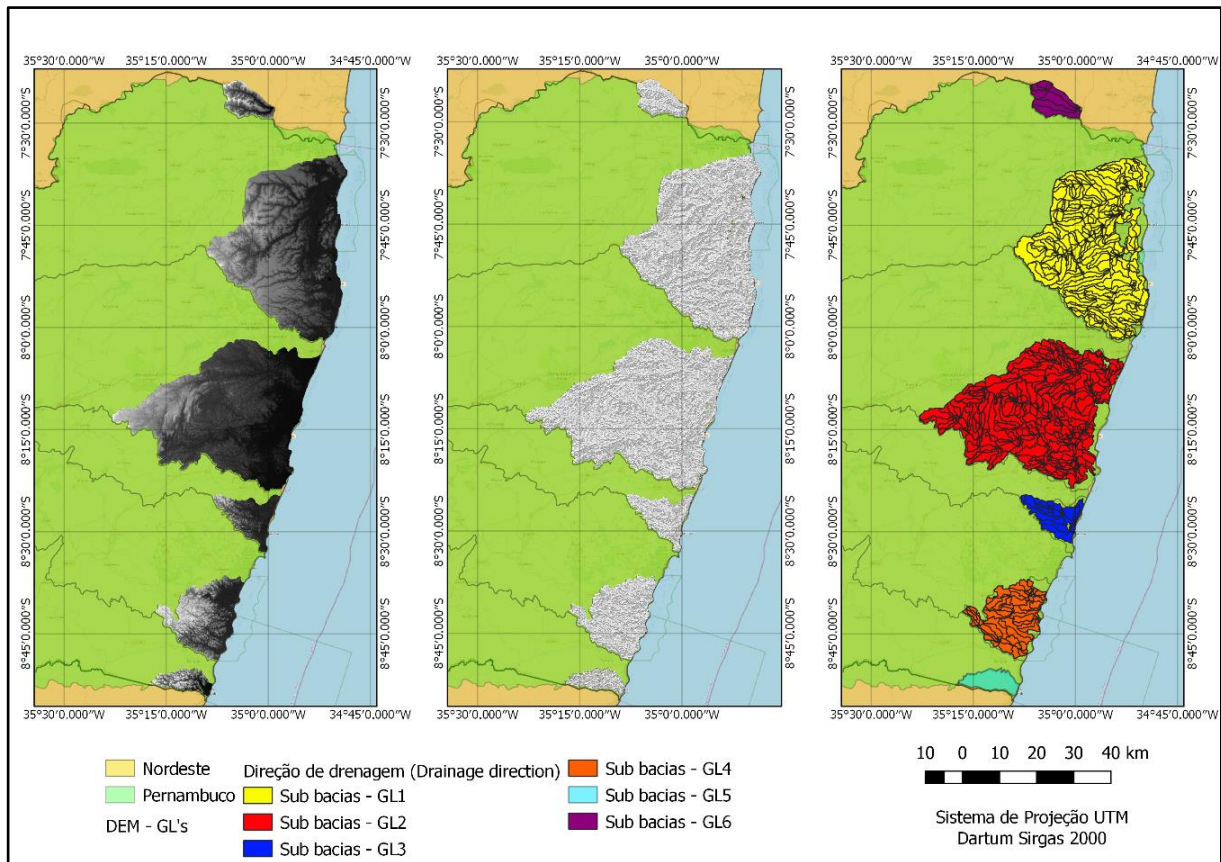
O modelo utiliza como dados de entrada dois conjuntos de informações: um representando as características hidrológicas da bacia (séries de precipitação, evapotranspiração e vazão) e o outro associado às características físicas da bacia, as quais podem ser obtidas através do mapeamento do solo, imagens aéreas e de satélite, Modelo Digital de Terreno (MDT), etc, conforme ilustram as Figuras 11 e 12.

**Figura 11** – DEM e Flow, respectivamente, associados ao estado da Bahia



Fonte: Autora (2022)

**Figura 12** – DEM, direção de drenagem e sub bacias respectivamente, associados ao GL's em Pernambuco

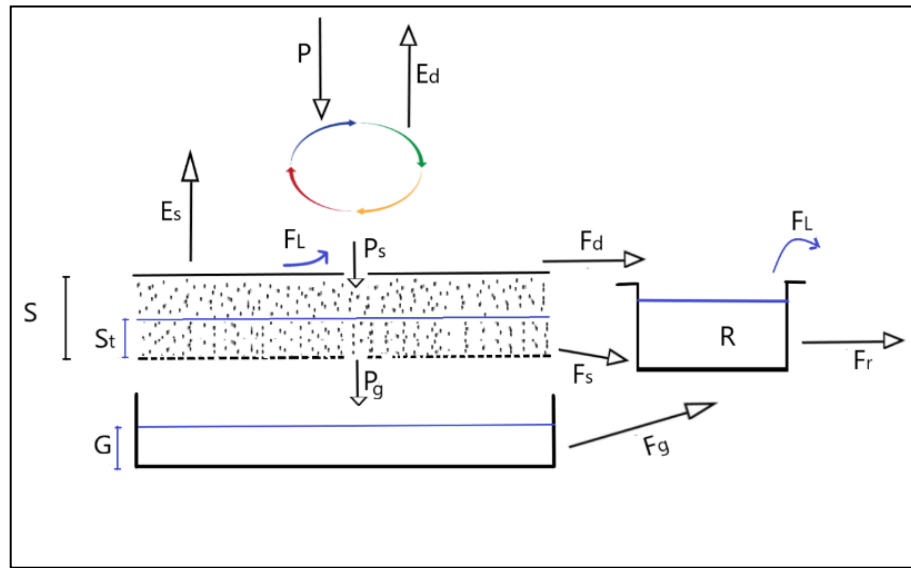


Fonte: Autora (2022)

Atualmente, o modelo está presente em duas versões: CAWM IV e CAMW V. A versão CAWM IV foi concebida para aplicação em bacias hidrográficas de regiões semiáridas e sua descrição matemática, bem como suas aplicações podem ser consultadas no estudo de Cirilo *et al.* (2020). A versão CAWM V, por sua vez, procura descrever os processos de fluxo em bacias de rios perenes, situadas em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem.

Sendo assim, essa versão, diferentemente do CAWM IV, possui um reservatório subterrâneo que passa a ser alimentado quando o reservatório do solo atinge a saturação, conforme representado na Figura 13.

Consecutivamente, inicia-se um fluxo de percolação profunda ( $P_g$ ) para alimentar o reservatório subterrâneo, acrescentando a lâmina acumulada (G). A partir deste ocorre o fluxo ( $F_g$ ), que alimenta o rio e complementa das parcelas  $F_d$  e  $F_s$ .

**Figura 13** – Esquema do modelo CAWM V

Fonte: Ferraz (2019)

O fluxo  $F_g$  é dado pela equação 1:

$$F_g = K_g \cdot G \quad (1)$$

Onde  $K_g$  é um parâmetro de transferência de água no solo e será calibrado de forma similar ao  $K_s$  (modelo CAWM IV). O cálculo da percolação ( $P_s$ ), a qual alimenta o reservatório subterrâneo, é realizado através da Equação 2:

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

Quando  $S_t$  atinge o valor de  $S$ , o excedente passa a compor a percolação profunda  $S_g$ . Sendo assim, o modelo CAWM V pode ter três ou quatro parâmetros de calibração, dependendo da disponibilidade de dados para avaliar o parâmetro  $S$ . O parâmetro  $\beta$  representa o processo de recarga do aquífero.

Nas sub-bacias, foram procurados os postos da ANA (Agência Nacional de Águas) com dados de vazão tendo uma série histórica igual ou superior a 30 anos com o intuito de ter dados suficientes para poder aplicar o modelo hidrológico CAWM. Tendo os postos e as séries históricas das vazões coletadas, é necessário obter os demais dados que geram os parâmetros para o modelo CAWM. Para isso é preciso utilizar a ferramenta de geoprocessamento QGIS, pois é através deste programa, ou um similar, que pode ser executado a metodologia que produz

as informações imprescindíveis para determinação dos parâmetros. Um dos arquivos necessários acerca da bacia em estudo é o Modelo Digital de Elevação (MDE) do local, porque é isso que possibilita a obtenção da rede de drenagem, a delimitação e o traçado do rio principal de cada bacia, produtos que resultam no parâmetro de escoamento da calha do rio (Equação 3), ou seja, parâmetro K. O MDE da bacia é obtido através da base de dados global SRTM (Shuttle Radar Topogahfy Mission) e com esse arquivo é possível proceder com a utilização do QGIS. Além disso, o Segmento de fluxo, no formato vetor, para fornecer o valor total do comprimento da rede de drenagem da bacia, é preciso exportá-lo para uma planilha e somar os comprimentos individuais de cada trecho.

Por último, há também a possibilidade de a bacia ser definida a partir do arquivo Meia-bacias dependendo de como estiver configurada os parâmetros da função `r.watershed`, entretanto, aconselha-se que seja realizado essa etapa de obtenção da bacia.

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

Onde  $A_b$  é a área da bacia,  $L_T$  é o comprimento total da rede de drenagem,  $I$  é a inclinação do rio e os demais parâmetros são constantes. Outro parâmetro de entrada para o modelo hidrológico é a retenção máxima do solo (Equação 4), ou seja, parâmetro S conforme é definido em Cirilo et al. (2020). Para determina-lo é necessário utilizar um arquivo que contenha o *Curver Number* (CN) da bacia em estudo e, portanto, usa-se o mapa de solos da região, em formato vetor, para obter o recorte da bacia. Além disso, o recorte é feito com o auxílio do arquivo da área da bacia, feito na etapa anterior da pesquisa, sendo utilizado o QGIS para tal tarefa. Assim, em seguida é preciso exportar o mapa de solo recortado para uma planilha, pois é feita uma média ponderada com os *Curve Numbers* de cada solo utilizando as áreas de cada tipo como os pesos nos cálculos, afim de calcular o CN médio da bacia e, posteriormente, o parâmetro S.

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

Onde CN é *Curver Number* médio da bacia em estudo.

O parâmetro restante é a série de dados pluviométricos que é extraída contendo as precipitações de postos selecionados para a bacia em estudo. Para mais, é aplicada a função polígono de Voronoi do QGIS nos postos selecionados com base na área da bacia, pois a partir disso é utilizado um algoritmo (`chuva_mediaII.py`) que corrige as precipitações para a área total

da bacia. Por fim, para bacias com área maior que dez mil quilômetros quadrados, é necessário aplicar a correção nas precipitações por causa do tempo de concentração das mesmas que é feita pelo método de Clark.

Tendo todos os parâmetros, calibra-se o modelo CAWM V para a bacia em estudo a partir de um intervalo de tempo escolhido e depois aplica-se aos dados no intervalo completo de tempo e verifica se os dados calculados estão bons em comparação com os medidos. Dessa forma, para a verificação são utilizadas as medidas estatísticas Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), percentual de tendência bias (PBIAS) e razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações (RSR), sendo o NSE o mais relevante. A Tabela 1 apresenta a classificação das simulações hidrológicas.

**Tabela 1** - 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)

Em suma, as etapas para o trabalho consistem em:

a) Obtenção do modelo digital de elevação, no caso o SRTM gerado pela NASA (diferente do que ocorre para Pernambuco, não se dispõe para os demais estados de levantamento de alta resolução como o PE3D – Pernambuco Tridimensional). Assim se fez necessário fazer o download das quadrículas do MDT de todo o estado da Bahia e em seguida criar miscelânea com as imagens para sua uniformização.

b) Para cada posto selecionado foi necessário traçar a rede hidrográfica e obter os elementos necessários para o modelo CAWM V: área da bacia; comprimento total da rede de rios; traçado do rio principal e daí sua declividade.

c) Utilizando imagens de satélite classificadas do uso e ocupação dos solos em cada sub-bacia e mapas de tipos de solos, quantifica-se a capacidade de retenção de água S na bacia em estudo, outro parâmetro físico requerido pelo modelo.

d) Calibra-se os demais parâmetros do modelo CAWM V já descritos.

Após a calibração, é possível agrupar os postos em sub-regiões hidrologicamente homogêneas, utilizando-se métodos estatísticos, buscando-se identificar conjuntos de parâmetros que representem se possível o comportamento de cada região. O objetivo desse trabalho, como explicitado anteriormente, é obter os dados calibrados a partir da implementação

de parâmetros no CAWM V, fomentando a base de dados para futuras análises de homogeneização de regiões hidrográficas.

---

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fins de calibração, foram selecionados os postos contendo mais de 10 anos contínuos de dados na região de estudo. Foi utilizada a quinta versão do CAWM, voltada para rios perenes, sendo, no total, calibradas com resultados satisfatórios as vazões de 124 estações fluviométricas, distribuídas de acordo com os estados abrangidos da seguinte maneira: 11 de Alagoas, 52 da Bahia, 15 da Paraíba e 46 de Pernambuco. Dentre os dados de entrada destes postos, 89 foram obtidos através das informações obtidas por geoprocessamento de Vasconcelos et al. (2020), e os demais foram gerados através da mesma metodologia que a descrita pelos autores. Após inseridos os dados de entrada, as quarenta estações foram calibradas de modo a resultar em coeficientes estatísticos NSE, Pbias e RSR o mais bem classificados o quanto possível.

A título de apresentação de resultados, serão evidenciadas as calibrações associadas a alguns postos, dentre os plurais abordados no estudo, associados aos estados de Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco, a fim de consolidar a eficácia do CAWM V.

Foram estimados dados de entrada a partir do estado inicial das vazões do rio, da comparação entre os totais de evapotranspiração registrados pelo INMET e as precipitações totais e da análise da rede de rios. Os demais itens se referem ao controle do processo de otimização ou simulação e resultados da validação/verificação ou calibração. Para calibrar o modelo têm sido usados 70% dos dados da série (mais antigos). Para validação os 30% mais recentes.

A seguir é apresentado, nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6, o sequenciamento padrão oriundo do CAWM V em nova versão, elencando os parâmetros da bacia, parâmetros para cálculo, possíveis variáveis de decisão, balanço hídrico de longo período e indicadores de eficiência do modelo, respectivamente, aprimorada computacionalmente por doutorandos da UFPE. Os dados e resultados são referentes ao posto Chorrochó, localizado no rio da Catarina, afluente do Rio São Francisco, associado à região hidrográfica São Francisco 07, na Bahia.

Os campos denominados: Largura equivalente da seção dos rios -  $Be$  (m) (típico: entre 1 e 5), Coeficiente de rugosidade de Manning -  $n$ , Coeficiente do expoente das perdas na calha (entre 0.9 e 1.2) -  $p$ , Coeficiente da função de evapotranspiração -  $\alpha$  (referência entre 0 e 10, representativas de nenhuma ou máxima evapotranspiração complementar, tendo como padrão

o valor de 1,4), e Capacidade de armazenamento percolação profunda –  $G_{max}$ , indicam os parâmetros pré-definidos antes da otimização dos parâmetros otimizados automaticamente pelo modelo.

Os itens: Área da bacia -  $A_b$  ( $km^2$ ), Comprimento total da drenagem -  $L_t$  (m), Declividade equivalente dos rios -  $I$  (m/m), Parâmetro do escoamento na calha (calculado) –  $K$ , Parâmetro do escoamento na calha (adotado) (referência de 0,01 a 0,06) –  $K$ , e Capacidade de armazenamento no solo -  $S$  –  $SUB_{max}$ , são dados obtidos por geoprocessamento. Outrossim, os campos intitulados: Parâmetro de percolação do reservatório profundo –  $K_d$ , Parâmetro de percolação do fluxo subsuperficial para a calha –  $K_s$ , Parâmetro de perdas na calha -  $K_L$ , e Parâmetro de infiltração -  $\beta$  (referência = 2), representam os parâmetros calibrados no modelo por técnicas de otimização.

**Tabela 2** – Parâmetros de entrada – Posto 48280000

| <b>PARÂMETROS DA BACIA</b>                                              |                                   |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Nome da bacia – Região Hidrográfica São Francisco 07</b>             | Rio da Catarina<br>Posto 48280000 |
| Área da bacia - $A_b$ ( $km^2$ )                                        | 3545                              |
| Comprimento total da drenagem - $L_t$ (m)                               | 1306970                           |
| Declividade equivalente dos rios - $I$ ( $m.m^{-1}$ )                   | 0,0011293                         |
| Largura equivalente da seção dos rios - $B_e$ (m) (típico: entre 1 e 5) | 2                                 |
| Coefficiente de rugosidade de Manning – $n$                             | 0,03                              |
| Gerar planilha                                                          | Sim                               |
| Nome da planilha com o modelo CAWM da bacia                             | CAWM                              |
| Tipo de planilha                                                        | Calibração                        |
| Tamanho sugerido do período de verificação dos resultados               | 30%                               |
| Função objetivo da calibração                                           | Max (NSE/MAE)                     |
| Método de otimização                                                    | GRG Non linear                    |
| Valor da Função Objetivo obtido                                         | 49145                             |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 3** – Parâmetros para cálculo – Posto 48280000

| <b>PARÂMETROS PARA CÁLCULOS</b>                                     |             |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|
| Intervalo de tempo - $\Delta t$ (s)                                 | 86400       |
| Parâmetro do escoamento na calha (calculado) - $K$                  | 0,090732578 |
| Coefficiente do expoente das perdas na calha (entre 1 e 2) - $p$    | 1           |
| Coefficiente da função de evapotranspiração - $\alpha$ (padrão 1,4) | 0,15        |
| Capacidade de armazenamento percolação profunda - $G_{max}$         | 5000        |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 4** – Possíveis variáveis de decisão – Posto 48280000

| <b>POSSÍVEIS VARIÁVEIS DE DECISÃO</b>                                 |             |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Parâmetro de percolação do reservatório profundo - $K_d$              | 0,090732578 |
| Parâmetro de percolação do fluxo sub-superficial para a calha - $K_s$ | 0,0016035   |

|                                                                              |             |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Parâmetro de perdas na calha - $K_L$                                         | 0,5071467   |
| Parâmetro de infiltração - $\beta$ (referência = 2)                          | 9,749231591 |
| Parâmetro do escoamento na calha (adotado) (0,01 a 0,06) - $K$               | 0,014       |
| Coefficiente do expoente do escoamento na calha ( $\approx 5/3^{-1}$ ) - $b$ | 1,667       |
| Capacidade de armazenamento no solo - $S - SUB_{max}$                        | 241,9       |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 5** – Balanço hídrico de longo período – Posto 48280000

| <b>BALANÇO HÍDRICO DE LONGO PERÍODO</b> |          |
|-----------------------------------------|----------|
| EVAPORAÇÃO POTENCIAL (mm)               | 24057,89 |
| EVAPORAÇÃO REAL MÁXIMA (mm)             | 11954,81 |
| LÂMINA Q OBS (mm)                       | 2526,50  |
| VOLUME PRECIPITADO (mm)                 | 14481,31 |
| EVAP REAL (mm)                          | 9067,72  |
| ESCOADO (mm)                            | 2544,85  |
| SOLO INICIO (mm)                        | 1099,46  |
| SOLO FIM (mm)                           | 1345,50  |
| Armazenamento SUPERFICIAL INICIO (mm)   | 10,16    |
| Armazenamento SUPERFICIAL FINAL (mm)    | 15,31    |
| PERDAS (mm)                             | 2618,66  |
| BALANÇO (mm)                            | -1,11    |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 6** – Indicadores de eficiência do modelo – Posto 48280000

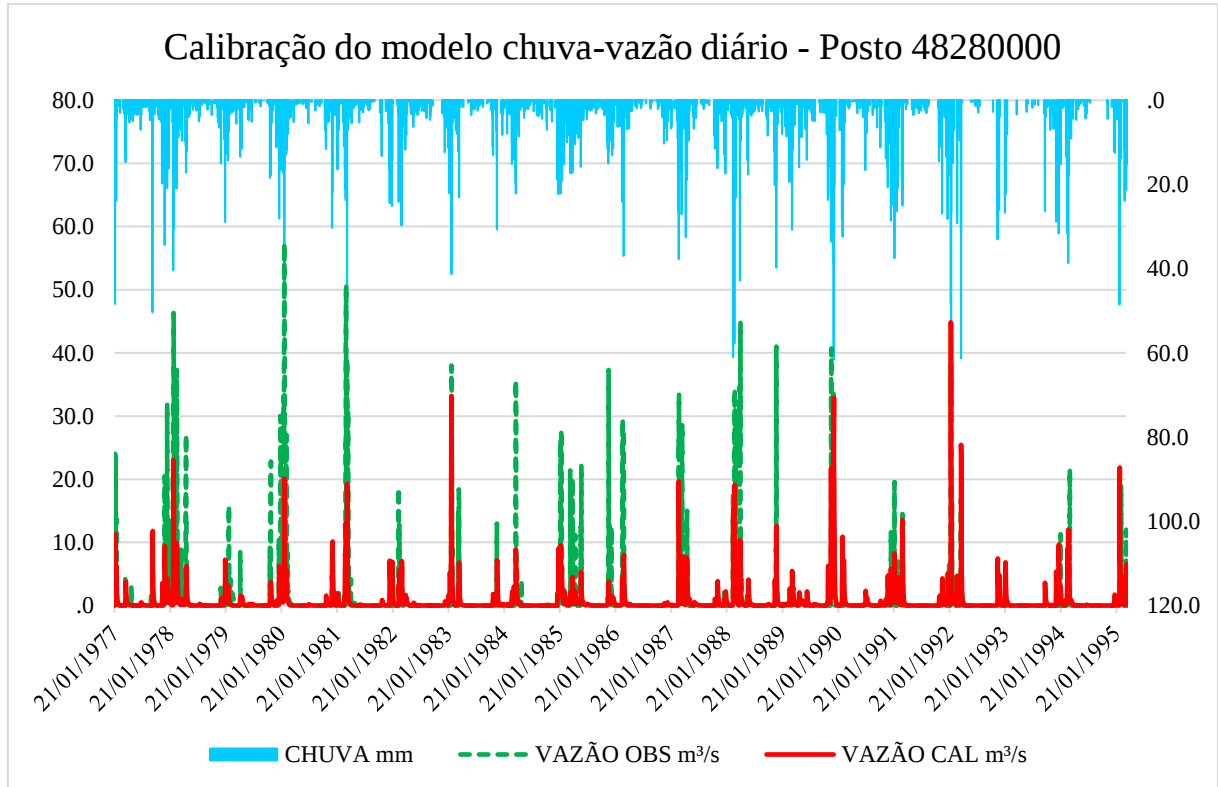
| <b>INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO</b>  |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                            | 25/03/1995 |
| Data final                                              | 31/12/2002 |
| Vazão média observada ( $m^3.s^{-1}$ )                  | 0,83       |
| Vazão média calculada ( $m^3.s^{-1}$ )                  | 0,95       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe – NSE         | 0,78       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores – NSE sqrt | 0,81       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores – NSE log    | 0,83       |
| Percentual de tendência – Pbias                         | -1,67      |
| Raiz do erro médio quadrático – RMSE                    | 3,55       |
| Erro médio absoluto – MAE                               | 0,98       |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão – RSR              | 0,74       |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                    | 0,46       |

Fonte: Autora (2022)

Os Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam a calibração do modelo chuva-vazão diário, vazão média no período de calibrações por dia do ano, simulação histórica do modelo chuva-vazão diário e verificação do modelo chuva-vazão diário, respectivamente, na aplicação do modelo CAWM V ao posto 48280000, localizado no rio da Catarina, afluente do Rio São Francisco, associado à região hidrográfica São Francisco 07.

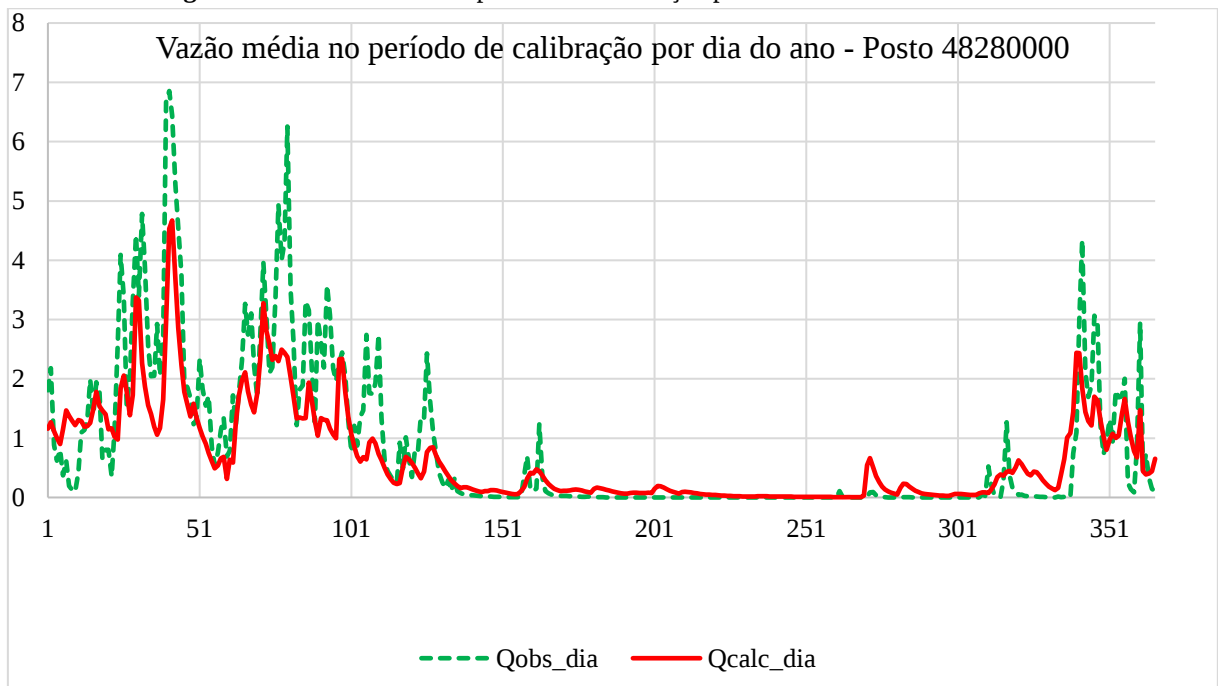
É possível identificar que os dados apresentados foram satisfatórios segundo os critérios estatísticos estabelecidos. Registre-se que a série utilizada decorre do período em que não existem falhas de observação. Uma das aplicações possíveis é o preenchimento de falhas do período em que elas ocorrem.

**Figura 14** – Calibração do modelo chuva-vazão diário – Posto 48280000

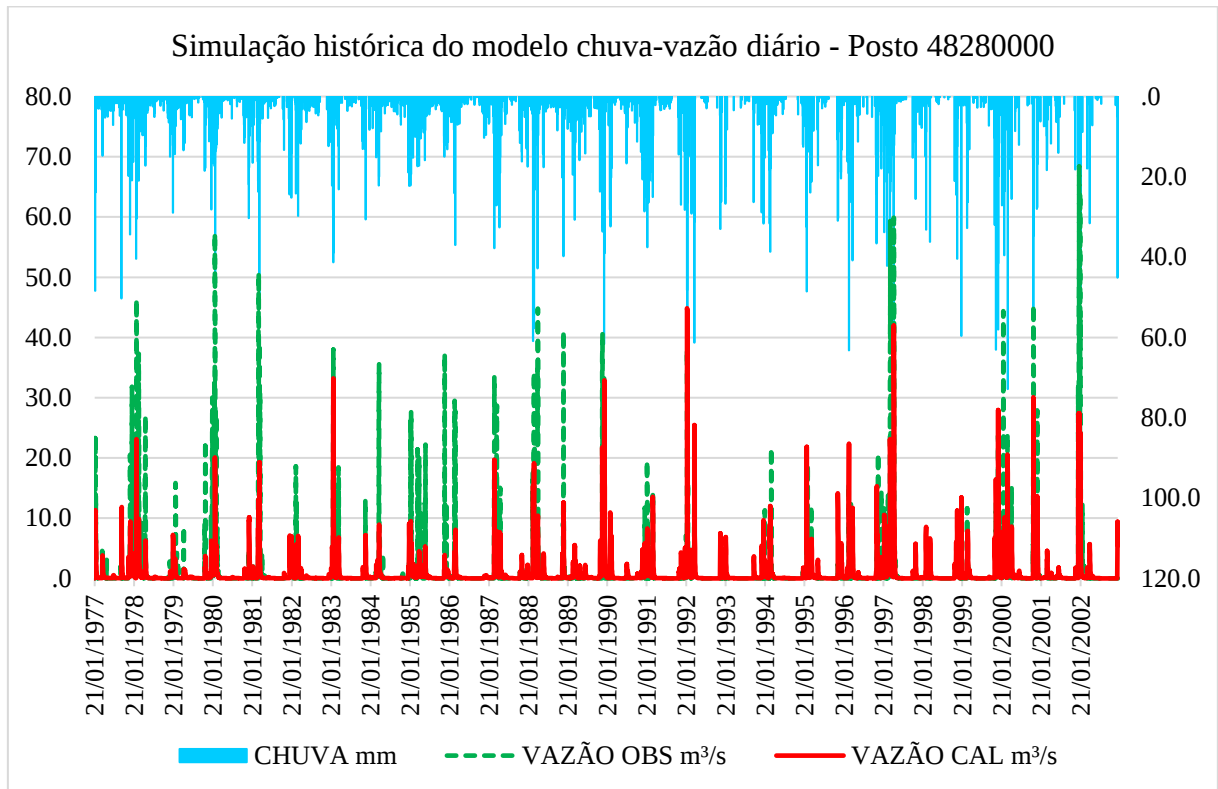


Fonte: Autora (2022)

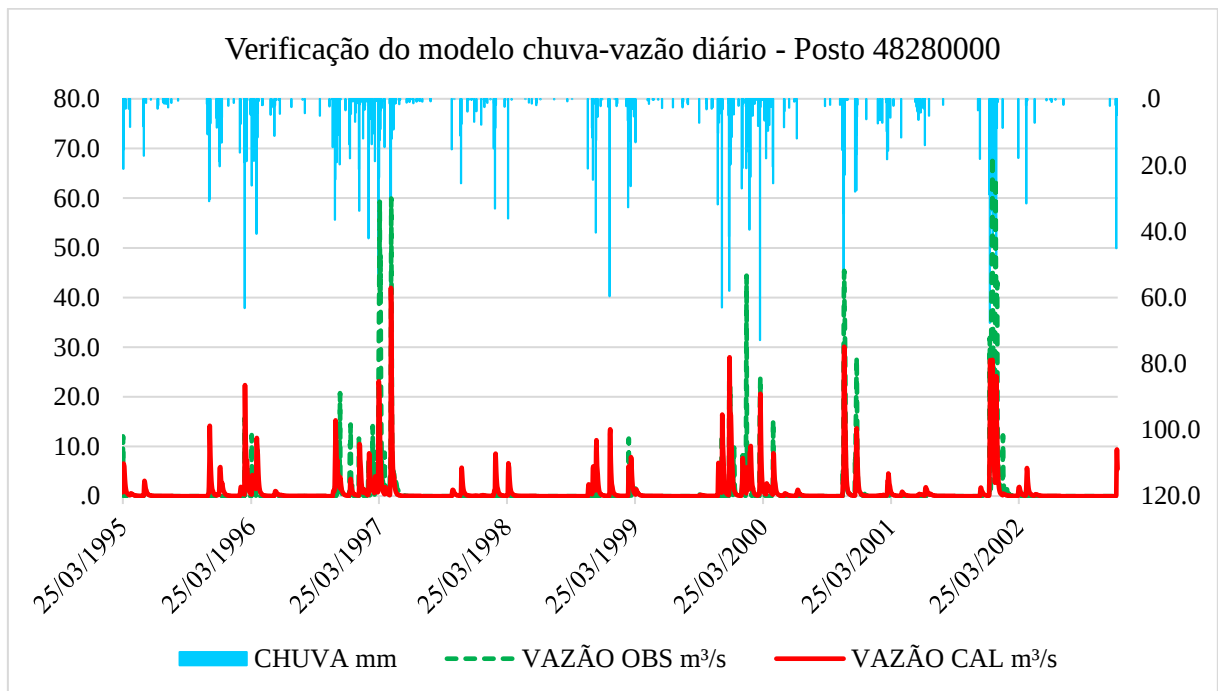
**Figura 15** – Vazão média no período de calibração por dia do ano – Posto 48280000



Fonte: Autora (2022)

**Figura 16** – Simulação histórica do modelo chuva-vazão diário – Posto 48280000

Fonte: Autora (2022)

**Figura 17** – Verificação do modelo chuva-vazão diário – Posto 48280000

Fonte: Autora (2022)

A Tabela 7 mostra os parâmetros resultantes da calibração da estação 50912200, rio Ipitanga na região hidrográfica do Recôncavo Norte, na Bahia. Os coeficientes estatísticos que representam o ajuste do modelo calibrado nesta bacia estão presentes na Tabela 8. As porcentagens indicam a quantidade de anos que apresentaram uma classificação no mínimo satisfatória, ou seja, com NSE acima de 0,36, Pbias com valor, em módulo, abaixo de 25, RSR abaixo de 0,7 e  $R^2$  acima de 0,5. Assim, os coeficientes NSE e RSR indicam ajuste satisfatório do modelo, e o Pbias um ótimo ajuste para a estação 50912200. A Tabela 9 evidencia os indicadores de eficiência do modelo associados a calibração e a Tabela 10 apresenta os indicadores de eficiência do modelo no quesito verificação, ambos referentes ao posto 50912200.

**Tabela 7** – Parâmetros da bacia hidrográfica do rio Ipitanga

| BACIA    | ESTAÇÃO  | $K_G$    | $K_s$   | $K_L$ | $\beta$ | $K$   | $\alpha$ |
|----------|----------|----------|---------|-------|---------|-------|----------|
| IPITANGA | 50912200 | 0,040000 | 0,03500 | 0,100 | 2,0     | 0,010 | 1,40     |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 8** – Coeficientes estatísticos da bacia hidrográfica do rio Ipitanga

| BACIA    | ESTAÇÃO  | NSE   | Pbias | RSR   | $R^2$ |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| IPITANGA | 50912200 | 87,0% | 80,9% | 73,9% | 95,7% |
|          |          | 0,830 | -1,67 | 0,620 | 0,790 |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 9** – Indicadores de eficiência do modelo associados a calibração para o posto 50912200

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 01/01/1977 |
| Data final                                             | 16/01/1986 |
| Vazão média observada ( $m^3.s^{-1}$ )                 | 1.06       |
| Vazão média calculada ( $m^3.s^{-1}$ )                 | 2.56       |
| Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE         | 0.78       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.81       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.83       |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -1.69      |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 29.23      |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 18.90      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.59       |
| Coeficiente de determinação - $R^2$                    | 0.75       |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 10** – Indicadores de eficiência do modelo associados a verificação para o posto 50912200

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                     | 17/01/1986 |
| Data final                                       | 30/11/1989 |
| Vazão média observada ( $m^3.s^{-1}$ )           | 1.27       |
| Vazão média calculada ( $m^3.s^{-1}$ )           | 2.37       |

|                                                        |       |
|--------------------------------------------------------|-------|
| Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE         | 0.83  |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.69  |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.70  |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -1.67 |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 27.46 |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 20.88 |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.62  |
| Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>           | 0.79  |

Fonte: Autora (2022)

As estações localizadas na bacia do rio de Contas, na Bahia, têm seus parâmetros do modelo CAWM V mostrados na Tabela 11, enquanto a Tabela 12 mostra os coeficientes que representam o ajuste do modelo. As estações 52005000, 52010000 e 52850000, em geral, não apresentaram bons ajustes, ao contrário das demais estações desta bacia. O NSE foi insatisfatório para a 52850000 e satisfatório para a 52005000 e 52010000, mas em uma baixa porcentagem de anos nesta última, enquanto os valores de RSR foram insatisfatórios para estas três estações, que apresentaram bons valores do Pbias. Já as estações 52886000, 53141000, 52650000, 52681000, 52828000 e 52681000 apresentaram valores satisfatórios do coeficiente NSE, Pbias bons ou muito bons e RSR satisfatórios ou bons.

**Tabela 11** – Parâmetros da bacia hidrográfica do rio Contas

| BACIA  | ESTAÇÃO  | K <sub>G</sub> | K <sub>S</sub> | K <sub>L</sub> | β    | K     | α    |
|--------|----------|----------------|----------------|----------------|------|-------|------|
| CONTAS | 52005000 | 0,000140       | 0,00100        | 0,000          | 6,3  | 0,025 | 0,65 |
|        | 52010000 | 0,000100       | 0,00090        | 0,000          | 30,0 | 0,025 | 0,65 |
|        | 52850000 | 0,000100       | 0,00100        | 0,100          | 20,0 | 0,020 | 0,65 |
|        | 52886000 | 0,000200       | 0,00080        | 0,320          | 25,0 | 0,020 | 0,65 |
|        | 53141000 | 0,000170       | 0,00100        | 0,120          | 15,0 | 0,020 | 0,65 |
|        | 52650000 | 0,000185       | 0,00070        | 0,100          | 13,0 | 0,020 | 0,65 |
|        | 52681000 | 0,000170       | 0,00200        | 0,100          | 6,0  | 0,010 | 1,40 |
|        | 52828000 | 0,000170       | 0,00080        | 0,180          | 7,0  | 0,010 | 1,40 |
|        | 52681000 | 0,000170       | 0,00100        | 0,100          | 6,2  | 0,010 | 1,40 |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 12** – Coeficientes estatísticos da bacia hidrográfica do rio Contas

| BACIA  | ESTAÇÃO  | NSE   | Pbias  | RSR   | R <sup>2</sup> |
|--------|----------|-------|--------|-------|----------------|
| CONTAS | 52005000 | 61,0% | 70,7%  | 36,6% | 85,4%          |
|        |          | 0,471 | -12,3  | 0,730 | 0,499          |
|        | 52010000 | 38,5% | 100,0% | 15,4% | 69,2%          |
|        |          | 0,408 | -9,1   | 0,770 | 0,578          |
|        | 52850000 | 28,6% | 97,1%  | 17,1% | 80,0%          |
|        |          | 0,322 | 0,7    | 0,820 | 0,502          |
|        | 52886000 | 75,0% | 100,0% | 58,3% | 75,0%          |
|        |          | 0,611 | 4,3    | 0,624 | 0,640          |
|        | 53141000 | 52,0% | 88,0%  | 38,0% | 74,0%          |
|        |          | 0,563 | -4,1   | 0,661 | 0,581          |
|        | 52650000 | 68,8% | 89,6%  | 54,2% | 91,7%          |
|        |          | 0,693 | -2,5   | 0,554 | 0,696          |

|          |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 52681000 | 83,7% | 83,7% | 72,1% | 95,3% |
|          | 0,726 | -2,7  | 0,524 | 0,727 |
| 52828000 | 83,3% | 81,0% | 61,9% | 92,9% |
|          | 0,703 | -4,3  | 0,545 | 0,713 |
| 52681000 | 80,0% | 66,7% | 66,7% | 90,0% |
|          | 0,697 | -10,5 | 0,551 | 0,710 |

Fonte: Autora (2022)

A fim de ilustrar a aplicação do CAWM V nesse contexto supracitado, a Tabela 13 evidencia os indicadores de eficiência do modelo no quesito verificação, referentes ao posto 52886000. Os indicadores de eficiência do modelo associados à calibração apresentam-se na Tabela B.1, Apêndice B.

**Tabela 13** – Indicadores de eficiência do modelo associados a verificação para o posto 52886000

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO       |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 24/02/1986 |
| Data final                                             | 09/11/2002 |
| Vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 4.75       |
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 4.97       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0.61       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.69       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.70       |
| Percentual de tendência - Pbias                        | 4,30       |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 27.46      |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 20.88      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.62       |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                   | 0.64       |

Fonte: Autora (2022)

Os parâmetros do modelo CAWM V dos postos localizados na bacia do rio Igarassu, inserido no GL 1, pertencente ao estado de Pernambuco, estão listados na Tabela 14. O GL1 possui uma área de drenagem de 1.1620,24  $\text{km}^2$ .

Dentre os ajustes dos postos, que estão representados na Tabela 15, apenas um mostrou resultados, em geral, insatisfatórios, sendo ele o 39084100. Este posto mostrou um NSE satisfatório, mas Pbias e RSR insatisfatórios. Para os demais postos, houve ajustes, em geral, muito bons, como os dos postos 39085300 e 39029100; ajustes, em geral, bons, como nas estações 39090300, 39088000, 39084020, 39085500, 39081000 e 39029000; e ajustes, em geral, satisfatórios, como é o caso das estações 39098600 e 39090100.

**Tabela 14** – Parâmetros da bacia hidrográfica do rio Igarassu

| BACIA    | ESTAÇÃO  | $K_G$    | $K_S$   | $K_L$ | $\beta$ | $K$   | $\alpha$ |
|----------|----------|----------|---------|-------|---------|-------|----------|
| IGARASSU | 39029100 | 0,000300 | 0,00250 | 0,450 | 25,0    | 0,010 | 1,40     |
|          | 39098600 | 0,000215 | 0,00230 | 0,620 | 17,0    | 0,010 | 1,40     |
|          | 39090100 | 0,000250 | 0,00038 | 0,000 | 32,0    | 0,010 | 1,40     |

|          |          |         |       |      |       |      |
|----------|----------|---------|-------|------|-------|------|
| 39090300 | 0,000250 | 0,00037 | 0,000 | 30,0 | 0,010 | 1,40 |
| 39088000 | 0,000180 | 0,00037 | 0,000 | 28,0 | 0,010 | 1,40 |
| 39084020 | 0,000200 | 0,00200 | 0,380 | 35,0 | 0,010 | 1,40 |
| 39085500 | 0,000420 | 0,00250 | 0,630 | 16,0 | 0,025 | 1,40 |
| 39030000 | 0,000600 | 0,00450 | 0,680 | 14,5 | 0,025 | 1,40 |
| 39081000 | 0,000600 | 0,00560 | 0,600 | 6,0  | 0,025 | 1,40 |
| 39084100 | 0,000300 | 0,06500 | 0,745 | 4,0  | 0,025 | 1,40 |
| 39029000 | 0,000600 | 0,00680 | 0,600 | 4,9  | 0,025 | 1,40 |
| 39085300 | 0,000600 | 0,00800 | 0,510 | 3,5  | 0,025 | 1,40 |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 15** – Coeficientes estatísticos da bacia hidrográfica do rio Igarassu

| BACIA    | ESTAÇÃO  | NSE   | Pbias  | RSR   | R <sup>2</sup> |
|----------|----------|-------|--------|-------|----------------|
| IGARASSU | 39029100 | 90,0% | 85,0%  | 75,0% | 100,0%         |
|          |          | 0,754 | 0,6    | 0,496 | 0,760          |
|          | 39098600 | 72,7% | 77,3%  | 54,5% | 95,5%          |
|          |          | 0,542 | 0,9    | 0,677 | 0,544          |
|          | 39090100 | 72,7% | 100,0% | 72,7% | 100,0%         |
|          |          | 0,565 | -2,1   | 0,659 | 0,615          |
|          | 39090300 | 77,3% | 100,0% | 72,7% | 100,0%         |
|          |          | 0,700 | -0,8   | 0,548 | 0,707          |
|          | 39088000 | 71,0% | 100,0% | 71,0% | 96,8%          |
|          |          | 0,718 | 0,4    | 0,531 | 0,721          |
|          | 39084020 | 64,7% | 98,0%  | 51,0% | 96,1%          |
|          |          | 0,668 | -3,1   | 0,576 | 0,680          |
|          | 39085500 | 90,2% | 95,1%  | 80,5% | 100,0%         |
|          |          | 0,694 | -5,2   | 0,553 | 0,704          |
|          | 39030000 | 83,3% | 89,6%  | 66,7% | 91,7%          |
|          |          | 0,652 | -9,3   | 0,590 | 0,669          |
|          | 39081000 | 70,2% | 72,3%  | 63,8% | 91,5%          |
|          |          | 0,653 | -6,3   | 0,589 | 0,661          |
|          | 39084100 | 62,5% | 31,3%  | 43,8% | 87,5%          |
|          |          | 0,442 | -38,5  | 0,750 | 0,605          |
|          | 39029000 | 90,5% | 69,0%  | 73,8% | 97,6%          |
|          |          | 0,654 | -9,4   | 0,588 | 0,701          |
|          | 39085300 | 94,7% | 68,4%  | 73,7% | 94,7%          |
|          |          | 0,773 | -13,2  | 0,476 | 0,795          |

Fonte: Autora (2022)

A Tabela 16 evidencia os indicadores de eficiência do modelo no quesito verificação, referentes ao posto 39085300. Os indicadores de eficiência do modelo associados à calibração apresentam-se na Tabela B.2, Apêndice B.

**Tabela 16** – Indicadores de eficiência do modelo associados a verificação para o posto 39085300

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO         |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                             | 14/09/1952 |
| Data final                                               | 31/12/1955 |
| Vazão média observada (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 1.72       |
| Vazão média calculada (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2.82       |
| Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE           | 0.77       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt   | 0.65       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog      | 0.75       |
| Percentual de tendência - Pbias                          | -13.20     |

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE          | 16.85 |
| Erro médio absoluto - MAE                     | 12.54 |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR    | 0.476 |
| Coefficiente de determinação - R <sup>2</sup> | 0.79  |

Fonte: Autora (2022)

A Tabela 17 contém os parâmetros provenientes das calibrações da quinta versão do modelo CAWM das estações localizadas na bacia do rio Gramame, na Paraíba. Os coeficientes estatísticos que demonstram o desempenho das calibrações, para esta bacia, estão expostos na Tabela 18. De acordo com estes coeficientes, as estações 39081075, 39081080, 39081070 e 39081090 apresentam ótimos ajustes ao modelo, com os coeficientes NSE, Pbias e RSR classificados como muito bons. A estação 39084080 apresentou um bom ajuste, como valor de Pbias classificado como muito bom, e com valores de NSE e RSR classificados como bons.

**Tabela 17** – Parâmetros da bacia hidrográfica do rio Gramame

| BACIA   | ESTAÇÃO  | K <sub>G</sub> | K <sub>S</sub> | K <sub>L</sub> | β   | K     | α    |
|---------|----------|----------------|----------------|----------------|-----|-------|------|
| GRAMAME | 39081075 | 0,050000       | 0,00730        | 0,710          | 3,4 | 0,010 | 1,40 |
|         | 39081080 | 0,008500       | 0,01000        | 0,750          | 5,5 | 0,010 | 1,40 |
|         | 39081070 | 0,007500       | 0,00950        | 0,730          | 5,5 | 0,010 | 1,40 |
|         | 39081090 | 0,019000       | 0,02600        | 0,640          | 6,0 | 0,010 | 1,40 |
|         | 39084080 | 0,007900       | 0,00250        | 0,480          | 5,5 | 0,010 | 1,40 |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 18** – Coeficientes estatísticos da bacia hidrográfica do rio Gramame

| BACIA   | ESTAÇÃO  | NSE   | Pbias | RSR   | R <sup>2</sup> |
|---------|----------|-------|-------|-------|----------------|
| GRAMAME | 39081075 | 88,9% | 59,3% | 81,5% | 96,3%          |
|         |          | 0,762 | -1,3  | 0,488 | 0,775          |
|         | 39081080 | 78,9% | 63,2% | 78,9% | 94,7%          |
|         |          | 0,786 | 3,8   | 0,462 | 0,787          |
|         | 39081070 | 91,3% | 69,6% | 87,0% | 100,0%         |
|         |          | 0,769 | -6,5  | 0,480 | 0,774          |
|         | 39081090 | 85,3% | 67,6% | 85,3% | 100,0%         |
|         |          | 0,755 | -2,2  | 0,495 | 0,776          |
|         | 39084080 | 80,0% | 60,0% | 53,3% | 100,0%         |
|         |          | 0,720 | -2,7  | 0,529 | 0,723          |

Fonte: Autora (2022)

A Tabela 19 evidencia os indicadores de eficiência do modelo no quesito verificação, referentes ao posto 39081090. Os indicadores de eficiência do modelo associados à calibração apresentam-se na Tabela B.3, Apêndice B.

**Tabela 19** – Indicadores de eficiência do modelo associados a verificação para o posto 39081090

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO         |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                             | 17/01/1986 |
| Data final                                               | 30/11/1989 |
| Vazão média observada (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2.27       |

|                                                        |       |
|--------------------------------------------------------|-------|
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 1.37  |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0,75  |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.69  |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.70  |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -2,2  |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 27.46 |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 20.88 |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0,49  |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                   | 0,77  |

Fonte: Autora (2022)

Outrossim, a tabela a Tabela 20 mostra os parâmetros resultantes da calibração da estação 39950010, situado na bacia hidrográfica do rio São Miguel, em Alagoas. Na Tabela 21, os coeficientes NSE e RSR indicam ajuste satisfatório do modelo, e o Pbias um ótimo ajuste para a estação 39950010. A Tabela 22 evidencia os indicadores de eficiência do modelo no quesito verificação, referentes ao posto 39950010. Os indicadores de eficiência do modelo associados à calibração apresentam-se na Tabela B.4, Apêndice B.

**Tabela 20** – Parâmetros da bacia hidrográfica do rio São Miguel

| BACIA      | ESTAÇÃO  | $K_G$    | $K_S$   | $K_L$ | $\beta$ | $K$   | $\alpha$ |
|------------|----------|----------|---------|-------|---------|-------|----------|
| SÃO MIGUEL | 39950010 | 0,040000 | 0,03500 | 0,100 | 2,0     | 0,010 | 1,40     |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 21** – Coeficientes estatísticos da bacia hidrográfica do rio São Miguel

| BACIA      | ESTAÇÃO  | NSE   | Pbias | RSR   | $R^2$ |
|------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| SÃO MIGUEL | 39950010 | 91,0% | 70,9% | 83,9% | 95,7% |
|            |          | 0,780 | -3,1  | 0,610 | 0,624 |

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 22** – Indicadores de eficiência do modelo associados a verificação para o posto 39950010

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO       |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 03/01/1986 |
| Data final                                             | 07/05/1989 |
| Vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 0.96       |
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 4.97       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0.65       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.67       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.70       |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -3,10      |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 27.46      |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 20.88      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.61       |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                   | 0.64       |

Fonte: Autora (2022)

---

## 4 CONCLUSÕES

Em consonância com o exposto, ressalta-se que o trabalho teve como objetivo utilizar o modelo CAWM V para bacias litorâneas dos estados da Alagoas, Bahia, Paraíba e Pernambuco, com o intuito de desenvolver os modelos, testá-los e trazer, portanto, melhorias para consolidá-los como importantes ferramentas para estudos que requerem a modelagem hidrológica. Além disso, a abordagem desta temática colabora com o desenvolvimento de uma base de dados que busca ter os parâmetros do modelo que transcende a região Nordeste, salientando-se que atualmente já estão sendo desenvolvidos trabalhos de doutorado designados à modelagem hidrológica em bacias associadas a outras regiões brasileiras.

Por conseguinte, foram executadas as etapas vinculadas ao geoprocessamento de dados inerente à execução do programa, tendo em vista que a regionalização ainda será efetivada nas regiões de estudos. É válido salientar que o modelo CAWM V vem apresentando resultados promissores, exceto nas sub-bacias que haviam falhas de dados nas séries de precipitações ou tinham controles de vazão no percurso do rio principal. Houve perceptíveis melhorias na modelagem que possibilitou os resultados serem mais satisfatórios, usando para isso ajustes nos parâmetros calibráveis. Dessa forma, os resultados que estão sendo obtidos nas calibrações evidenciaram que o modelo CAWM V está seguindo um rumo muito importante e favorável a ser utilizado em futuras pesquisas, pois é notório o quão é preciso que haja um modelo hidrológico adequado para as condições encontradas no Nordeste, assim como ilustra potencialidades para estudos em outras regiões do país, conforme os trabalhos atuais comprovam.

---

## 5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos**, 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 01 jan. 2022.

ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S.; CLARKE, R. T.; REIS JUNIOR, D. S. **Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos**. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa - PB, 2005.

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

ARAÚJO, C. B. O. **Caracterização física e Regionalização de vazão máxima na Bacia do Rio do Carmo, alto Rio Doce**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

BAENA, L.G.N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2002.

BAZZO, K. R.; GUEDES, H. A. S.; Castro, A. S.; SIQUEIRA, T. M.; TEIXEIRA-GRANDA, C. F. A. Regionalização da vazão  $Q_{95}$ : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Ambiente & Água**. v.12, n. 5, p. 855-870, 2017.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; DE ROO, A.; MIRALLES, D. G.; MCVICAR, T. R.; SCHELLEKENS, J.; BRUIJNZEEL, L. A. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 3599-3622, 2016.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. M.; GOMES, M. M. A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. F.; SILVA, B. M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.25, c15, 2020.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro. v. 2, 1985. FEITOZA, M. A. B. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (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.

GOMES, M. M. A.; VERÇOSA, L. F. M.; CIRILO, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **Natural Hazards**. Dordrecht, v. 1-37, p. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04817-3>. Acesso em: 22 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Zoneamento Geoambiental do Estado de Alagoas: subsídios gerais para a ordenação territorial**. Salvador: IBGE, 1997.

## APÊNDICE A – PERÍODOS DE SIMULAÇÃO DOS POSTOS CALIBRADOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS

**Tabela A.1-** Períodos de simulação dos postos calibrados nas bacias hidrográficas de Alagoas

| BACIA         | CÓDIGO   | NOME                  | PERÍODO DE SIMULAÇÃO |            |
|---------------|----------|-----------------------|----------------------|------------|
| LITORAL NORTE | 39610000 | MARAGOGI              | 01/05/1970           | 24/07/2012 |
|               | 39762100 | MACEIÓ                | 01/10/2003           | 06/10/2015 |
| PRATAGY       | 39762000 | MACEIÓ - JACARECICA   | 21/10/1981           | 30/05/2015 |
|               | 39653000 | MACEIÓ                | 10/01/1975           | 25/07/2012 |
| SÃO MIGUEL    | 39651800 | MARECHAL DEODORO      | 25/01/1979           | 31/07/2018 |
|               | 39932000 | MARECHAL DEODORO      | 01/10/2003           | 06/10/2015 |
|               | 39930000 | CAPTAÇÃO CASAL        | 01/01/1972           | 30/09/2018 |
|               | 39951000 | SÃO MIGUEL DOS CAMPOS | 01/06/1968           | 20/06/2005 |
|               | 39950010 | SÃO MIGUEL DOS CAMPOS | 10/01/1975           | 25/07/2012 |
|               | 39950001 | ANADIA                | 04/12/1999           | 30/09/2018 |
|               | 39950000 | FAZENDA SÃO PEDRO     | 08/12/1997           | 26/05/2014 |

**Tabela A.2-** Períodos de simulação dos postos calibrados nas bacias hidrográficas da Bahia

| BACIA            | CÓDIGO   | NOME                    | PERÍODO DE SIMULAÇÃO |            |
|------------------|----------|-------------------------|----------------------|------------|
| SÃO FRANCISCO 07 | 49005000 | FAZENDA LAGOA GRANDE    | 25/12/1971           | 31/05/2014 |
|                  | 48280000 | CHORROCHÓ               | 25/01/1979           | 31/07/2018 |
|                  | 49049000 | QUIXABA                 | 01/10/2003           | 06/10/2015 |
|                  | 48610000 | PORTO DE ABARÉ          | 21/10/1981           | 30/05/2015 |
|                  | 48270003 | ABARÉ                   | 27/10/2004           | 31/08/2015 |
|                  | 48780000 | RODELAS                 | 01/06/1968           | 03/01/2017 |
| SÃO FRANCISCO 08 | 49280000 | VELHA EUGENIA           | 01/01/1972           | 30/09/2018 |
|                  | 49369100 | SANTA BRIGIDA           | 03/02/1978           | 30/08/2018 |
| VAZA BARRIS      | 50035000 | FAZENDA QUITI           | 27/08/1989           | 30/09/2018 |
|                  | 50140000 | AÇUDE COCOROBO          | 11/09/1975           | 20/05/2017 |
|                  | 50150500 | PONTE DA BR-110         | 25/09/1992           | 31/05/2010 |
|                  | 50142300 | CABEÇA DE BOI           | 01/10/1991           | 31/12/2014 |
| LITORAL SE 01    | 50280000 | CAPTAÇÃO RIO REAL       | 05/10/1999           | 27/09/2018 |
|                  | 50591500 | CONDE                   | 01/06/1968           | 20/11/2018 |
|                  | 50152300 | FÁTIMA                  | 01/01/2002           | 14/03/2018 |
|                  | 50282000 | RIO REAL                | 04/12/1971           | 04/10/2017 |
| RECÔNCAVO NORTE  | 50660000 | CORTE GRANDE            | 01/05/1970           | 24/07/2012 |
|                  | 50720000 | FAZENDA SÃO FRANCISCO   | 01/06/1968           | 20/06/2005 |
|                  | 50905100 | PONTE BA-512 - CANDEIAS | 10/01/1975           | 25/07/2012 |
|                  | 50640000 | ENTRE RIOS              | 01/06/1968           | 04/10/2017 |
|                  | 50670000 | PALAME - BA-099         | 01/06/1968           | 24/07/2012 |
|                  | 50598000 | FAZENDA CAJAZEIRAS      | 19/05/1974           | 12/05/1989 |
|                  | 50796000 | MATA DE SÃO JOÃO        | 01/01/1975           | 22/07/2015 |
|                  | 50810000 | AMÉLIA RODRIGUES        | 01/10/1991           | 23/04/2009 |
|                  | 51040000 | FEIRA DE SANTANA        | 17/01/1993           | 30/09/2018 |

|                  |          |                               |            |            |
|------------------|----------|-------------------------------|------------|------------|
| RECÔNCAVO<br>SUL | 51940000 | ITUBERÁ                       | 25/11/1999 | 07/11/2017 |
|                  | 51685700 | PONTE DA AMIZADE              | 16/02/1990 | 18/10/2012 |
|                  | 51685800 | FAZENDA LURDINHA              | 16/01/1985 | 11/03/2018 |
|                  | 51930000 | IGRAPIUNA                     | 03/11/2004 | 30/09/2018 |
|                  | 51941000 | ITUBERÁ                       | 01/01/2002 | 14/03/2018 |
|                  | 51970000 | MARAU                         | 04/12/1971 | 04/10/2017 |
| CONTAS           | 52570000 | JEQUIÉ                        | 26/10/1993 | 14/08/2015 |
|                  | 52020000 | SANTANA                       | 24/08/1992 | 30/06/2018 |
|                  | 52365000 | AÇUDE CHAMPRÃO                | 21/08/1992 | 30/11/2012 |
|                  | 52250500 | CAPTAÇÃO DA EMBASA            | 01/11/2004 | 30/11/2017 |
|                  | 52010000 | GERAIS                        | 01/11/2004 | 28/02/2015 |
|                  | 52040000 | FAZENDA CAMPINHOS             | 26/08/1992 | 30/06/2016 |
|                  | 52290000 | AÇUDE TREMENDAL MONTANTE      | 04/12/1999 | 30/09/2018 |
|                  | 52350100 | PIRIPA                        | 08/12/1997 | 26/05/2014 |
|                  | 52350950 | ANAGÉ                         | 25/12/1971 | 31/05/2014 |
|                  | 52005000 | PIATÃ                         | 25/01/1979 | 31/07/2018 |
| LITORAL SUL      | 55150000 | DUAS BARRAS                   | 01/10/2003 | 06/10/2015 |
|                  | 55330000 | JUCURUÇU                      | 21/10/1981 | 30/05/2015 |
|                  | 55025000 | PONTE RIO SANTO ANTÔNIO       | 27/10/2004 | 31/08/2015 |
|                  | 55120000 | GUARATINGA                    | 01/06/1968 | 03/01/2017 |
|                  | 55707000 | MUCURI                        | 01/01/1972 | 30/09/2018 |
|                  | 55500900 | PONTE BR-101 - Rio Peruípe    | 17/01/1993 | 30/09/2018 |
|                  | 55335000 | ITAMARAJU                     | 25/11/1999 | 07/11/2017 |
| PARDO            | 53605000 | PORTO DE SANTA CRUZ           | 16/02/1990 | 18/10/2012 |
|                  | 53625000 | BARREIROS                     | 16/01/1985 | 11/03/2018 |
|                  | 53835000 | FAZENDA ORATÓRIO              | 03/11/2004 | 30/09/2018 |
|                  | 53825000 | PONTE DA BA 670 - (POTIRAGU?) | 01/01/2002 | 14/03/2018 |

**Tabela A.3-** Períodos de simulação dos postos calibrados nas bacias hidrográficas da Paraíba

| BACIA      | CÓDIGO   | NOME                              | PERÍODO DE<br>SIMULAÇÃO |            |
|------------|----------|-----------------------------------|-------------------------|------------|
| ABIAI      | 39035000 | CAAPORÃ                           | 09/12/1999              | 31/12/2014 |
|            | 39081120 | PITIMBU                           | 01/09/1993              | 04/10/2015 |
|            | 39081150 | PITIMBU                           | 05/10/1999              | 27/09/2018 |
| MIRIRI     | 38796000 | RIO TINTO                         | 01/06/1968              | 20/11/2018 |
| GUAJU      | 38690000 | FAZENDA ALMAS                     | 01/01/2002              | 14/03/2018 |
|            | 38660000 | FAZENDA ALMAS                     | 04/12/1971              | 04/10/2017 |
|            | 38648001 | CANGUARETAMA                      | 01/05/1970              | 24/07/2012 |
| GRAMAME    | 39084080 | AÇUDE GRAMAME/MAMUABA             | 01/06/1968              | 20/06/2005 |
|            | 39081072 | PEDRAS DE FOGO                    | 10/01/1975              | 25/07/2012 |
|            | 39081070 | AÇUDE GRAMAME/GRAMAME<br>MONTANTE | 01/06/1968              | 04/10/2017 |
|            | 39081090 | AÇUDE GRAMAME/MAMUABA JUSANTE     | 01/06/1968              | 24/07/2012 |
|            | 39081075 | AÇUDE GRAMAME/MAMUABA<br>MONTANTE | 19/05/1974              | 12/05/1989 |
|            | 39081080 | SANTA RITA                        | 01/01/1975              | 22/07/2015 |
| CAMARATUBA | 38653000 | AÇUDE DUAS ESTRADAS               | 01/10/1991              | 23/04/2009 |
|            | 38700000 | RIO TINTO                         | 17/01/1993              | 30/09/2018 |

**Tabela A.4-** Períodos de simulação dos postos calibrados nas bacias hidrográficas de Pernambuco

| BACIA       | CÓDIGO   | NOME                          | PERÍODO DE SIMULAÇÃO |            |
|-------------|----------|-------------------------------|----------------------|------------|
| <b>GL 1</b> | 39029100 | ENGENHO ITAPIREMA DE BAIXO    | 26/10/1993           | 14/08/2015 |
|             | 39098600 | RECIFE                        | 24/08/1992           | 30/06/2018 |
|             | 39090100 | CAPTAÇÃO PITANGA              | 21/08/1992           | 30/11/2012 |
|             | 39090300 | CAPTAÇÃO UTINGA               | 01/11/2004           | 30/11/2017 |
|             | 39088000 | AÇUDE BOTAFOGO                | 01/11/2004           | 28/02/2015 |
|             | 39084020 | ENGENHO ITAPISSIRICA          | 26/08/1992           | 30/06/2016 |
|             | 39084200 | ENGENHO ITAPIREMA DE BAIXO    | 04/12/1999           | 30/09/2018 |
|             | 39030000 | ENGENHO BARREIRINHA           | 08/12/1997           | 26/05/2014 |
|             | 39081000 | USINA SANTA TEREZA - JUSANTE  | 25/12/1971           | 31/05/2014 |
|             | 39084100 | PONTE BR-101 NORTE            | 25/01/1979           | 31/07/2018 |
|             | 39029000 | CANAL DE SANTA CRUZ           | 01/10/2003           | 06/10/2015 |
|             | 39085300 | VILA ARARIPE                  | 21/10/1981           | 30/05/2015 |
|             | 39085500 | PONTE DA BR-101 - NORTE       | 27/10/2004           | 31/08/2015 |
|             | 39090900 | PONTE DE IGARASSU             | 01/06/1968           | 03/01/2017 |
|             | 39095100 | ABREU E LIMA                  | 01/01/1972           | 30/09/2018 |
|             | 39095200 | PAULISTA                      | 27/08/1989           | 30/09/2018 |
|             | 39098300 | FABRICA DA ANTÁRTICA          | 11/09/1975           | 20/05/2017 |
|             | 39080000 | ENGENHO ITAPISSIRICA          | 25/09/1992           | 31/05/2010 |
|             | 39085000 | GRANJA UBU                    | 01/10/1991           | 31/12/2014 |
|             | 39090000 | USINA SÃO JOÃO                | 12/06/2004           | 18/04/2015 |
|             | 39095150 | JUSANTE INDÚSTRIA WOLF        | 09/12/1999           | 31/12/2014 |
|             | 39035000 | IGARASSU                      | 01/09/1993           | 04/10/2015 |
| <b>GL 2</b> | 39189550 | MORENO                        | 05/10/1999           | 27/09/2018 |
|             | 39204000 | AÇUDE SICUPEMA                | 01/06/1968           | 20/11/2018 |
|             | 39189780 | AÇUDE JANGADINHA              | 01/01/2002           | 14/03/2018 |
|             | 39189900 | PRÓXIMO A USINA MURIBECA      | 04/12/1971           | 04/10/2017 |
|             | 39191500 | ENGENHO PITÚ - JUSANTE        | 01/05/1970           | 24/07/2012 |
|             | 39270000 | ENGENHO JASMIM                | 01/06/1968           | 20/06/2005 |
|             | 39189580 | CAPTAÇÃO ENGENHO JUSSARA      | 10/01/1975           | 25/07/2012 |
|             | 39189930 | CAPTAÇÃO MURIBEQUINHA         | 01/06/1968           | 04/10/2017 |
| <b>GL 3</b> | 39200900 | JUSANTE DA CORN PRODUCTOS     | 01/06/1968           | 24/07/2012 |
|             | 39370400 | USINA SALGADO - JUSANTE       | 19/05/1974           | 12/05/1989 |
|             | 39370200 | PONTE PE-60                   | 01/01/1975           | 22/07/2015 |
| <b>GL 4</b> | 39266000 | AÇUDE BITA                    | 01/10/1991           | 23/04/2009 |
|             | 39590000 | BARREIROS                     | 17/01/1993           | 30/09/2018 |
|             | 39490000 | PCH GINDAI JUSANTE            | 25/11/1999           | 07/11/2017 |
|             | 39490500 | CAPTAÇÃO CAMBOINHA            | 16/02/1990           | 18/10/2012 |
|             | 39590500 | PONTE DA PE-60                | 16/01/1985           | 11/03/2018 |
| <b>GL 5</b> | 39480100 | PCH LUIZ DIAS LINS BARRAMENTO | 03/11/2004           | 30/09/2018 |
|             | 39590000 | BARREIROS                     | 01/01/2002           | 14/03/2018 |
|             | 39610000 | MARAGOGI                      | 04/12/1971           | 04/10/2017 |
| <b>GL 6</b> | 39590500 | PONTE DA PE-60                | 01/05/1970           | 24/07/2012 |
|             | 39082400 | AÇUDE GUARAREMA               | 01/06/1968           | 03/01/2017 |
|             | 39084100 | PONTE BR-101 NORTE            | 01/01/1972           | 30/09/2018 |
|             | 39084000 | CARICÓ                        | 03/02/1978           | 30/08/2018 |

## APÊNDICE B – INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO

**Tabela B.1** – Indicadores de eficiência do modelo associados a calibração para o posto 52886000 – Bacia de Contas (Bahia)

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 24/02/1986 |
| Data final                                             | 04/01/2010 |
| Vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 4.89       |
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 4.86       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0.78       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.61       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.83       |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -3.69      |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 29.23      |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 18.90      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.59       |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                   | 0.75       |

**Tabela B.2** – Indicadores de eficiência do modelo associados a calibração para o posto 39085300 - Bacia do rio Igarassu/ GL 1 (Pernambuco)

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 01/01/1945 |
| Data final                                             | 31/12/1955 |
| Vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 2.99       |
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 2.03       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0.61       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.62       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.73       |
| Percentual de tendência - Pbias                        | -12.20     |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                   | 20.24      |
| Erro médio absoluto - MAE                              | 15.11      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR             | 0.66       |
| Coefficiente de determinação - $R^2$                   | 0.78       |

**Tabela B.3** – Indicadores de eficiência do modelo associados a calibração para o posto 39081090 – Bacia de Gramame (Paraíba)

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                           | 01/01/1978 |
| Data final                                             | 16/01/1987 |
| Vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 3.06       |
| Vazão média calculada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )   | 2.56       |
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE        | 0.78       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt | 0.81       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog    | 0.83       |

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| Percentual de tendência - Pbias              | -0.67 |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE         | 29.23 |
| Erro médio absoluto - MAE                    | 18.90 |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR   | 0.62  |
| Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup> | 0.79  |

**Tabela B.4** – Indicadores de eficiência do modelo associados a calibração para o posto 39950010 – Bacia de São Miguel (Alagoas)

| INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| Data inicial                                             | 12/03/1978 |
| Data final                                               | 02/01/1986 |
| Vazão média observada (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 4.46       |
| Vazão média calculada (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 5.95       |
| Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE           | 0.78       |
| NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt   | 0.81       |
| NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog      | 0.83       |
| Percentual de tendência - Pbias                          | -3.67      |
| Raiz do erro médio quadrático - RMSE                     | 29.23      |
| Erro médio absoluto - MAE                                | 18.90      |
| Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR               | 0.61       |
| Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>             | 0.62       |

ÁGNES SALES ALVES DE SOUSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS EM REGIÕES  
ÚMIDAS: APLICAÇÕES DO MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED  
MODEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos

Aprovado em 25 de maio de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Avaliador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Rochele Sheila Vasconcelos (Avaliadora)  
Universidade Federal de Pernambuco