



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

MARIA EDUARDA VALENTIM CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO CAWM EM  
BACIAS HIDROGRÁFICAS PERNAMBUCANAS**

Caruaru - PE

2025

MARIA EDUARDA VALENTIM CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO CAWM EM  
BACIAS HIDROGRÁFICAS PERNAMBUCANAS**

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:** Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

**Coorientadora:** Profa. Dra. Sabrina da Silva Corrêa Raimundo

Caruaru - PE

2025

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por acalmar meu coração nos momentos de dúvida e me lembrar – em silêncio e fé – que havia propósito em cada esforço. A caminhada foi intensa, mas nenhum passo foi dado sozinha.

Aos meus pais, Breno Barreto e Lucicleide Valentim, os responsáveis por tudo o que sou hoje. Obrigada pelo amor incondicional. Cada conquista minha é, antes de tudo, de vocês.

À minha avó, Ivonete Galdino, pelas palavras de encorajamento e pelos olhares cheios de orgulho que sempre preencheram minha motivação.

Ao meu avô, Pedro Valentim (*in memoriam*), cuja memória me acompanhou em cada etapa dessa caminhada e que, mesmo ausente hoje, faz parte de tudo que sou e de cada passo que dou.

Ao meu companheiro, Diogo Arruda, por caminhar comigo durante toda a trajetória da graduação, acolhendo meu cansaço e celebrando minhas vitórias.

Aos meus amigos de curso, em especial a Brenda Manuella, Cléberon Marcelino, Igor Roberto, Izadora de Lima, Pedro Barros e Tiago Alves, por tornar a caminhada mais leve e pela oportunidade de crescer com vocês.

Aos professores do curso, por transmitir conhecimento e contribuir para a formação da profissional que sou hoje. Em especial, a Saulo de Tarso e Sabrina Corrêa, pelo apoio e orientação na construção deste estudo.

A todos vocês, meu sincero e profundo agradecimento.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CAWM	Campus Agreste <i>Watershed Model</i>
CN	<i>Curve Number</i>
DEM	Modelo de Elevação Digital
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GRASS	Sistema de Apoio à Análise de Recursos Geográficos
GRG2	Gradiente Reduzido Generalizado
MDT	Modelo Digital de Terreno
NSE	Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe
Pbias	Percentual de Tendência bias
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Parâmetro de evapotranspiração complementar
$\beta$	Parâmetro de infiltração
E	Evapotranspiração
$E_d$	Evapotranspiração direta
$E_n$	Parcela não atendida da evapotranspiração
$E_s$	Evapotranspiração suplementar
$F_d$	Fluxo de escoamento superficial direto
$F_G$	Fluxo subterrâneo
$F_L$	Perdas de água no sistema
$F_r$	Escoamento na calha fluvial
$F_s$	Fluxo subsuperficial
G	Lâmina acumulada de água
K	Parâmetro de escoamento da calha do rio
$K_G$	Parâmetro de transferência de água no solo
$K_L$	Parâmetro de perdas
$K_s$	Parâmetro de permeabilidade do solo
n	Número total de eventos
p	Coefficiente do expoente de perdas na calha
P	Precipitação
$P_g$	Fluxo de percolação profunda
$P_i$	Precipitação no posto i
$P_{m\u00e9dia}$	Precipitação média
$P_n$	Precipitação efetiva
$P_s$	Recarga do solo
Q	Vazão

$Q_{i,obs}$	Fluxo observado
$Q_{i,cal}$	Fluxo calculado
$R$	Volume de água na calha fluvial
$S$	Capacidade máxima de retenção de água no solo
$S_t$	Retenção de água no solo ao longo do tempo
$\omega_i$	Peso do valor da precipitação no posto $i$ sobre o centroide

## Aplicação do modelo hidrológico concentrado CAWM em bacias hidrográficas pernambucanas

### Application of the CAWM concentrated hydrological model in Pernambuco river basins

Maria Eduarda Valentim Cavalcanti<sup>1</sup>

---

#### RESUMO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, em especial em regiões semiáridas, como o Nordeste brasileiro. A irregularidade nas chuvas e as altas taxas de evapotranspiração dificultam o monitoramento e a previsão do fluxo hídrico. O presente trabalho busca aplicar o modelo hidrológico conceitual concentrado CAWM (*Campus Agreste Watershed Model*), que utiliza o método de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*) para a calibração dos parâmetros, nas bacias dos rios Capibaribe, Pajeú e Sirinhaém. A calibração via PSO proporciona uma alternativa eficiente aos métodos tradicionais, reduzindo o tempo de execução e a necessidade de ajustes manuais. Os resultados apontam que a modelagem permitiu simular satisfatoriamente vazões baixas, médias e altas em todos os cenários reduzidos, ou seja, sem influência de barragens, no período de calibração e demonstrou a capacidade do modelo em minimizar a diferença entre vazões simuladas e observadas em 100% dos cenários calibrados e 64% dos validados. Além disso, o estudo constatou que o PSO apresenta desempenho superior ao GRG2 (gradiente reduzido generalizado), método de otimização utilizado anteriormente para calibração de parâmetros do CAWM, especialmente em situações sem influência de barragens. O PSO alcançou resultados equivalentes ou superiores em 68% das comparações entre os índices estatísticos em relação aos resultados gerados com o GRG2, mostrando o potencial da ferramenta para aplicações hidrológicas. A combinação entre modelagem matemática, algoritmos de otimização e ferramentas de geoprocessamento representa um avanço significativo para o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos em ambientes com baixa densidade de dados.

**Palavras-chave:** Recursos Hídricos; QGIS; *Particle Swarm Optimization*; Pernambuco Tridimensional; Gradiente Reduzido Generalizado.

---

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

---

**ABSTRACT**

Hydrological modeling is an essential tool for water resource planning and management, especially in semi-arid regions such as northeastern Brazil. Irregular rainfall and high evapotranspiration rates make it difficult to monitor and predict water flow. This study seeks to apply the CAWM (Campus Agreste Watershed Model) conceptual hydrological model, which uses the PSO (Particle Swarm Optimization) method for parameter calibration, in the Capibaribe, Pajeú, and Sirinhaém river basins. Calibration via PSO provides an efficient alternative to traditional methods, reducing execution time and the need for manual adjustments. The results show that the modeling satisfactorily simulated low, medium, and high flows in all reduced scenarios, which means there is no dam influence, during the calibration period and demonstrated the model's ability to minimize the difference between simulated and observed flows in 100% of the calibrated scenarios and 64% of the validated scenarios. In addition, the study found that PSO outperforms GRG2 (generalized reduced gradient), an optimization method previously used for CAWM parameter calibration, especially in situations without the influence of dams. The PSO achieved equivalent or superior results in 68% of comparisons between statistical indices when compared to studies with GRG2, demonstrating the tool's potential for hydrological applications. The combination of mathematical modeling, optimization algorithms, and geoprocessing tools represents a significant advance for monitoring and managing water resources in environments with low data density.

**Keywords:** Water Resources; QGIS; Particle Swarm Optimization; *Pernambuco Tridimensional*; Generalized Reduced Gradient.

---

**DATA DE APROVAÇÃO:** 19 de agosto de 2025.

---

**1 INTRODUÇÃO**

A gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas apresenta desafios complexos, especialmente devido à variabilidade espacial e temporal da precipitação, altas taxas de evapotranspiração e solos de baixa capacidade de armazenamento hídrico. Nessa realidade, modelos hidrológicos tornam-se ferramentas indispensáveis para a simulação dos processos

chuva-vazão, possibilitando o planejamento eficiente e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Entre os modelos existentes, destaca-se o Campus Agreste *Watershed Model* (CAWM), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, que foi projetado inicialmente para bacias de pequeno e médio porte em regiões semiáridas, e posteriormente englobou as regiões áridas, incorporando características físicas das bacias e reduzindo o número de parâmetros a serem calibrados (Cirilo *et al.*, 2020).

Um aspecto crítico na modelagem hidrológica é a calibração de parâmetros, que pode ser um processo demorado e impreciso quando realizado por tentativa e erro. Nesse contexto, o uso do algoritmo metaheurístico PSO (*particle swarm optimization*) apresenta vantagens significativas em relação ao método de otimização Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2), utilizado antes da integração do PSO ao CAWM, como rápida convergência e baixa exigência de parâmetros iniciais. Estudos como os de Jahandideh-Tehrani (2020) e Corrêa (2023) demonstram que o PSO é altamente eficiente em problemas de otimização na área hidrológica, sendo uma alternativa promissora para calibrar modelos como o CAWM.

Este estudo propõe a aplicação do CAWM, em sua versão concentrada, em bacias hidrográficas pernambucanas, utilizando o método PSO para aprimorar a calibração de parâmetros. Além de explorar as especificidades hidrológicas dessas bacias, o estudo contribui para avaliação do desempenho do modelo em cenários com diferentes níveis de regularização de vazão.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Objetiva-se, por meio deste estudo, aplicar o modelo chuva-vazão concentrado CAWM em bacias pernambucanas, utilizando o método de otimização PSO.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar esse objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar o modelo concentrado CAWM em linguagem *Python* no software QGIS utilizando o algoritmo PSO no processo de calibração de parâmetros;

- Avaliar o desempenho das técnicas de otimização PSO e GRG2 na calibração dos parâmetros do modelo CAWM, identificando qual método fornece melhores resultados em termos de acurácia, robustez e eficiência computacional;
- Validar o modelo concentrado CAWM ajustado para bacias hidrográficas pernambucanas a partir da comparação com resultados de outro estudo.

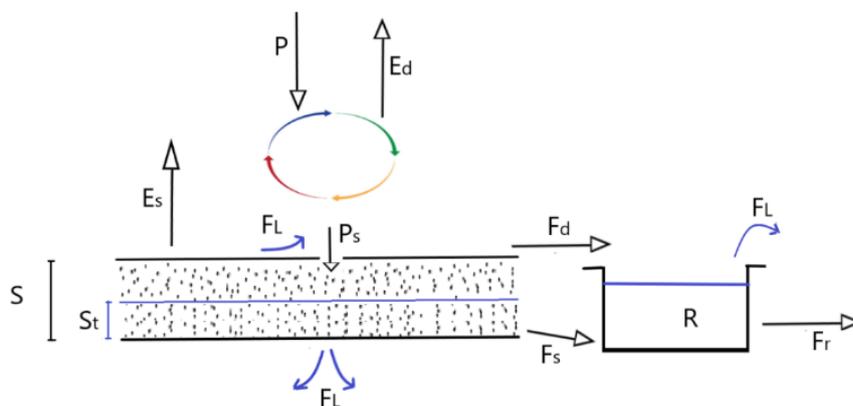
## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Descrição do modelo hidrológico

O algoritmo desenvolvido para o CAWM consiste atualmente em dois módulos com formulações matemáticas distintas. Neste estudo, aplicou-se o módulo para regiões semiáridas, que simula o escoamento sobre solos rasos e com baixa capacidade de acumulação, comum no semiárido nordestino brasileiro, onde estão localizadas em maior parcela as bacias do rio Capibaribe e Pajeú, e o módulo para regiões úmidas, destinado a regiões úmidas com recarga dinâmica de aquíferos e fluxo subterrâneo, relacionado a bacias hidrográficas perenes, como é o caso da bacia do rio Sirinhaém.

No módulo região semiárida, o balanço precipitação- evapotranspiração potencial é feito em primeira instância, comparando-se seus valores. Durante os processos físicos, quando a precipitação ( $P$ ) é maior que a evapotranspiração potencial ( $E$ ), a diferença entre elas corresponde à precipitação efetiva ( $P_n$ ). Caso contrário, toda a precipitação é tratada como evapotranspiração direta ( $E_d$ ), e a parcela não atendida ( $E_n$ ) pode ser total ou parcialmente extraída do reservatório do solo, a depender da capacidade de atender a demanda. A Figura 1 ilustra os processos físicos no modelo CAWM para regiões semiáridas.

**Figura 1** – Representação esquemática do CAWM para regiões semiáridas



Fonte: Cirilo *et al.* (2020)

A precipitação efetiva é dividida em três parcelas. A primeira se refere à recarga do solo ( $P_s$ ), conforme a Equação 1:

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

sendo  $S_t$  a quantidade de água acumulada no solo a cada intervalo de tempo e  $S$  a capacidade máxima de retenção do solo.

A segunda parcela refere-se à evapotranspiração suplementar ( $E_s$ ), limitada pela precipitação efetiva. Calcula-se a evapotranspiração suplementar por meio da Equação 2, cuja magnitude depende do valor atribuído a  $\alpha$ , um parâmetro introduzido devido à imprecisão dos dados na estimativa da evapotranspiração.

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

A parcela final é utilizada apenas quando positiva, e representa o escoamento superficial direto ( $F_d$ ), seguindo a Equação 3:

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

Do reservatório de água no solo, ocorre o fluxo subsuperficial  $F_s$  que percola até aumentar o volume de água na calha fluvial ( $R$ ), de acordo com a Equação 4:

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

sendo  $K_s$  é o parâmetro de permeabilidade do solo, a ser calibrado posteriormente.

O volume de água retido na calha fluvial é incrementado pelos fluxos  $F_s$  e  $F_d$ . O escoamento na calha fluvial  $F_r$  é admitido como uma função não-linear do volume armazenado  $R$ , de acordo com a Equação 5, sendo  $b$  uma constante de valor considerado 5/3, e  $K$  um parâmetro que depende da área da bacia.

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

As perdas de água no sistema são extraídas do escoamento superficial direto, e calculadas pela Equação 6:

$$F_L = K_L \cdot R^p \quad (6)$$

Quanto ao expoente  $p$ , o valor pode variar de 1 a 2. O parâmetro de perdas,  $K_L$ , pode ser calculado a partir da primeira simulação, conforme a Equação 7:

$$K_L = \frac{V_{Prec} - V_{Qobs} - V_{Evap}}{V_{Prec} - V_{Evap}} \quad (7)$$

O parâmetro  $S$  é estimado como sendo igual à capacidade de retenção de água no solo, calculada a partir do *Curve Number* médio (CN) da bacia, embasado pelo mapa de uso e ocupação do solo, conforme Equação 8:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (8)$$

O parâmetro a ser calibrado no modelo CAWM para regiões do semiárido é o  $K_S$ , enquanto o parâmetro  $K_L$  deve ser calculado em cada iteração no período de especificação definido.

Na versão desenvolvida inicialmente, o CAWM foi implementado por meio de macros do Microsoft Excel, nas quais a calibração dos parâmetros era feita com a seleção de aplicações de otimização *Solver* (GRG2) ou métodos evolucionários à escolha do usuário (Cirilo, 2023).

Visando maximizar o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), representado na Equação 9, o método de otimização PSO foi aplicado. As métricas do PSO são medidas por esta função de avaliação, também conhecida como função objetivo, que corresponde à otimalidade do problema. Para cada iteração, foi necessário realizar a simulação hidrológica do modelo, caracterizado pelos novos valores dos parâmetros, e o novo desempenho foi investigado a partir da função objetivo e seu gráfico de convergência.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (9)$$

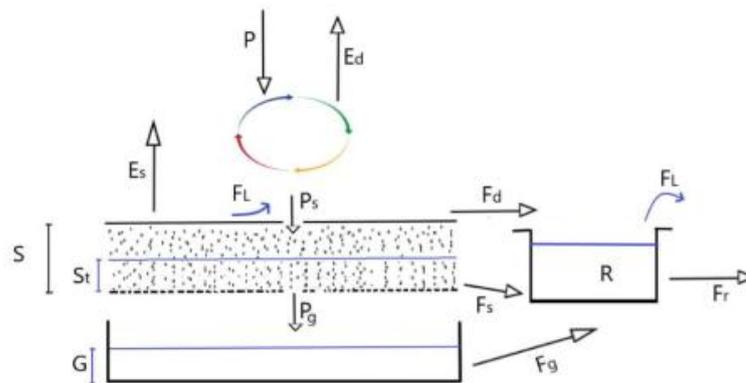
sendo  $n$  o número total de dados de eventos,  $Q_{i,obs}$  o fluxo observado,  $Q_{i,cal}$  o fluxo calculado,

$i$  o tempo, e  $\overline{Q_{obs}}$  o fluxo médio observado no período.

O código de calibração foi inserido no terminal *Python* do QGIS. Previamente, é necessário a redefinição do intervalo. O parâmetro  $K_S$  é calibrado a partir dos dados de entrada. Definiu-se o número de partículas e quantidade máxima de iterações como 10. Após a execução do código, são exibidos os valores calibrados, além da função objetivo para cada iteração e o NSE.

No módulo para regiões úmidas, é adicionado um reservatório subterrâneo que é reabastecido quando o reservatório do solo atinge a saturação, como ilustrado na Figura 2.

**Figura 2** – Representação esquemática do CAWM para regiões úmidas



Fonte: Ferraz (2019)

Então, um fluxo de percolação profunda ( $P_g$ ) começa a alimentar o reservatório subterrâneo, somando-se à lâmina acumulada de água ( $G$ ). O fluxo  $F_G$  é extraído do reservatório de água subterrânea e contribui para o fluxo do rio, complementando as parcelas  $F_d$  e  $F_s$ , conforme Equação 10.

$$F_G = K_G \cdot G \quad (10)$$

sendo  $K_G$  um parâmetro de transferência de água no solo similar ao  $K_S$ . Para esse módulo, a percolação  $P_s$  passa a ser calculada pela Equação 11.

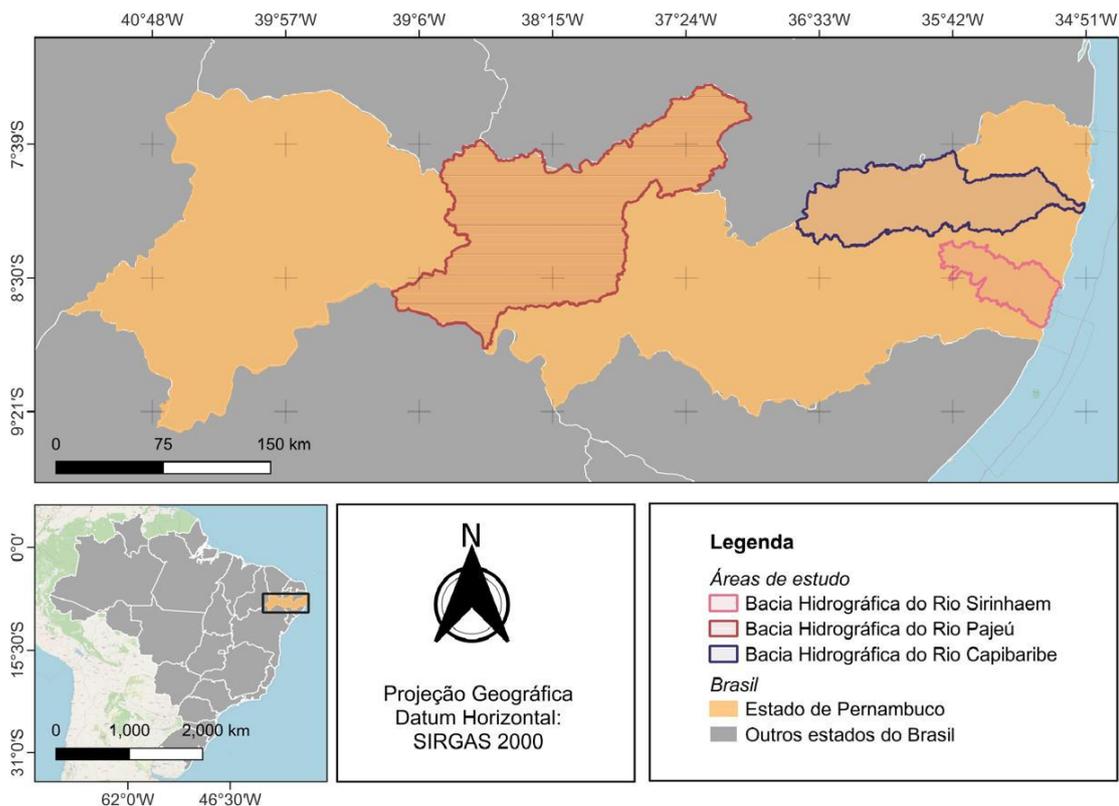
$$P_s = P_n \cdot \left(1 - \frac{S_t}{\beta \cdot S}\right) \quad (11)$$

Sempre que  $S_t$  atinge o valor de  $S$ , o excedente compõe a percolação profunda. Assim, há 3 parâmetros básicos calibráveis para esse módulo:  $K_S$ ,  $K_G$  e  $\beta$ .

## 2.2 Área de estudo

Os modelos foram aplicados em sub-bacias localizadas no semiárido de Pernambuco, associadas às bacias dos rios Capibaribe e Pajeú. A fim de demonstrar a aplicação em região úmida, o modelo também foi aplicado à bacia de Sirinhaém. As bacias são ilustradas na Figura 3. De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (2025), a bacia do rio Pajeú é a maior do estado, com uma área de 16685,63 km<sup>2</sup>, correspondendo a 16,97% da área do Estado. A bacia do rio Capibaribe, por sua vez, possui uma área de 7454,88 km<sup>2</sup>, que abrange 42 municípios. A do rio Sirinhaém, de menor extensão, abrange 19 municípios em sua área de 2090,64 km<sup>2</sup>. As sub-bacias estudadas se enquadram em áreas de regime pluviométrico irregular, com solos rasos e elevadas evapotranspirações, características que dificultam a gestão dos recursos hídricos. A existência de estudos prévios nestas regiões facilita a posterior comparação com outros métodos de otimização anteriormente propostos.

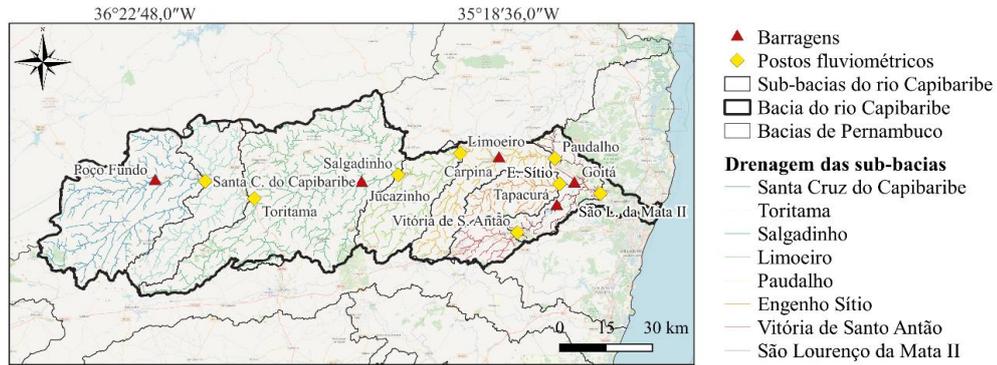
**Figura 3** – Localização das bacias do rio Capibaribe, Pajeú e Sirinhaém



Fonte: Raimundo (2025)

Na bacia do rio Capibaribe (Figura 4), o modelo hidrológico foi aplicado para as seguintes estações fluviométricas: Engenho Sítio, Limoeiro, Paudalho, Salgadinho, Santa Cruz do Capibaribe, São Lourenço da Mata II, Toritama, e Vitória de Santo Antão.

**Figura 4 – Postos fluviométricos e barragens de influência da bacia do rio Capibaribe**

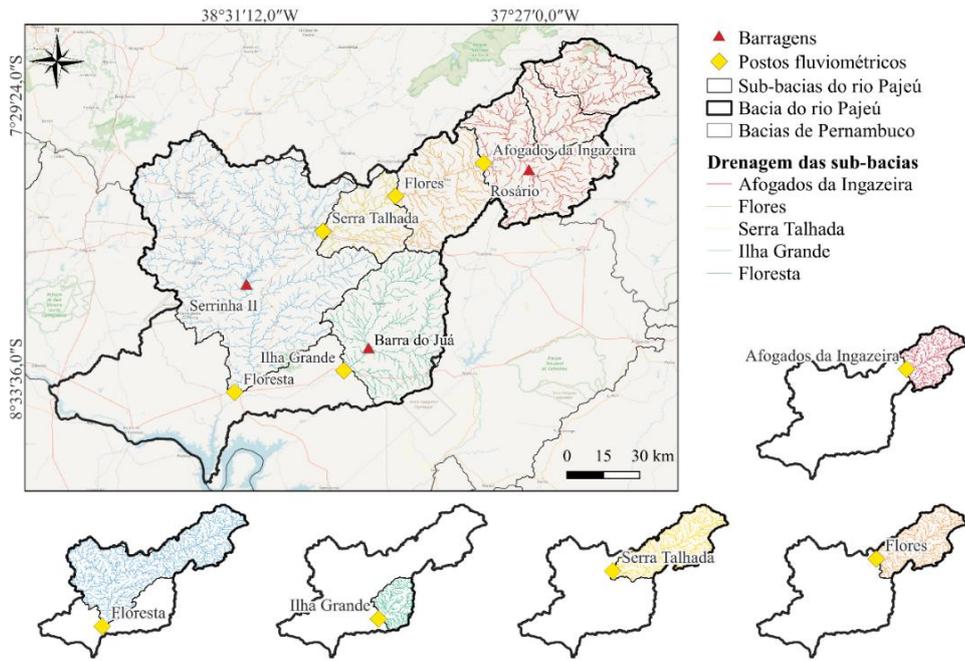


Sistema de coordenadas geográficas: SIRGAS 2000 | Dados sobre a base Open Street Map

Fonte: Raimundo (2025)

Quando aplicado à bacia do rio Pajeú (Figura 5), o CAWM foi simulado para as seguintes estações fluviométricas: Afogados da Ingazeira, Flores, Floresta, Ilha Grande e Serra Talhada.

**Figura 5 – Postos fluviométricos e barragens de influência da bacia do rio Pajeú**

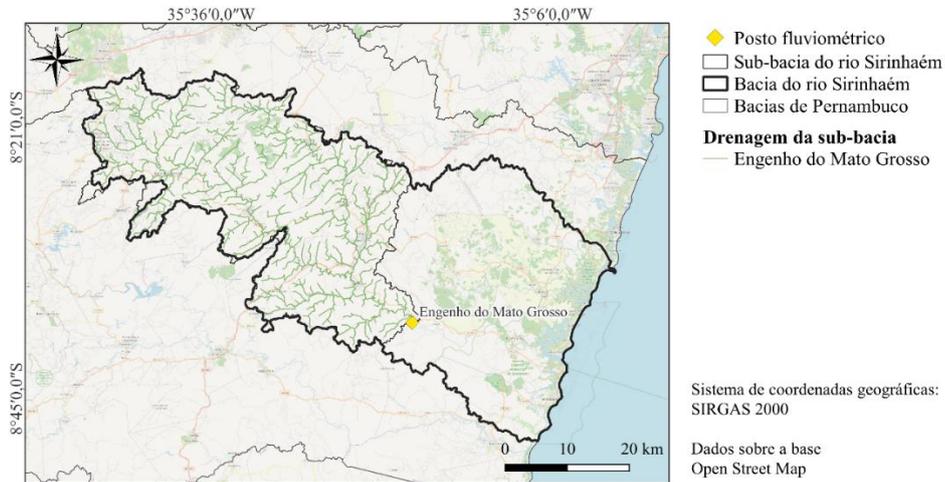


Sistema de coordenadas geográficas: SIRGAS 2000 | Dados sobre a base Open Street Map

Fonte: Raimundo (2025)

Na bacia do rio Sirinhaém (Figura 6), o CAWM foi aplicado para a estação fluviométrica do Engenho do Mato Grosso.

**Figura 6** – Posto fluviométrico da bacia do rio Sirinhaém



Fonte: Raimundo (2025)

### 2.3 Discretização das bacias hidrográficas

As bacias estudadas foram discretizadas em sub-bacias, como descrito na Tabela 1, de modo que cada uma possuísse um trecho do rio correspondente. Para discretizá-las, utilizou-se técnicas de geoprocessamento por meio da ferramenta GRASS – Sistema de Apoio à Análise de Recursos Geográficos, integrada ao *software* QGIS 3.40.7. A base de dados espaciais utilizada para tal foi o Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido através do PE3D.

**Tabela 1** – Passos para a discretização da bacia hidrográfica

Passo	Ferramenta	Descrição	Entrada	Saída	Observação
1	r.fill.dir	Preenche as depressões do MDT	MDT da bacia hidrográfica	<i>Depressionless</i> DEM (MDT semdepressões)	-
2	r.watershed	Gera arquivos matriciais da rede de drenagem e da direção de drenagem, entre outros	<i>Depressionless</i> DEM	<i>Stream segments</i> (rede de drenagem) e <i>Drainage direction</i> (direção da drenagem)	Utilizou-se o valor 1000 para a densidade da rede de rios
3	r.to.vect	Vetoriza arquivos <i>rasters</i>	<i>Stream Segments</i>	Rede de rios vetorizada	-

4	r.water.outlet	Geração das sub-bacias	Delimita a sub-bacia a partir do ponto onde se deseja localizar seu exutório	<i>Basin</i> (sub-bacia)	Realizar esse procedimento para cada sub-bacia que deseja gerar
5	r.to.vect	Vetoriza arquivos <i>rasters</i>	<i>Basin</i>	Sub-bacia vetorizada	Realizar esse procedimento para cada sub-bacia gerada

Fonte: adaptada de Raimundo (2025)

## 2.4 Aquisição e manipulação dos dados de entrada

O modelo utilizado neste estudo exige dois conjuntos de dados de entrada: um que represente as características hidrológicas e outro que represente as características físicas de cada sub-bacia estudada. Os dados hidrológicos consistem nas séries temporais de precipitação, evapotranspiração e vazão, que são utilizados para gerar os resultados. Os dados físicos consistem nos *rasters*, obtidos por meio do PE3D, uma ferramenta com potencial de utilização para intervenções que requerem detalhamento preciso do terreno. A partir do *raster*, é possível delimitar as bacias e sub-bacias, baseadas nos postos fluviométricos obtidos na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

As precipitações médias foram obtidas por meio da aplicação do método de ponderação inversa (IDW) nos dados dos postos pluviométricos, utilizando como centroide da bacia o ponto com coordenadas médias entre os postos pluviométricos. Para o cálculo da interpolação da precipitação do centroide da sub-bacia para a qual se deseja obter a chuva média, utiliza-se a Equação 12.

$$P_{m\u00e9dia} = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (12)$$

sendo  $P_{m\u00e9dia}$  a precipitação média referente ao centroide da \u00e1rea de estudo (mm),  $n$  a quantidade de postos pluviométricos pr\u00f3ximos ao centroide,  $\omega_i$  o peso do valor de  $P_i$  sobre o centroide, e  $P_i$  o valor da precipita\u00e7\u00e3o no posto  $i$  (mm).

Visando otimizar essa manipula\u00e7\u00e3o de dados, um c\u00f3digo em *Python* foi desenvolvido. Este recebe a longitude e a latitude do centroide da \u00e1rea analisada, e o caminho da pasta onde est\u00e3o os dados dos postos pluviométricos, e retorna uma pasta com as precipita\u00e7\u00f5es m\u00e9dias para cada data, de maneira ordenada, tamb\u00e9m aplicando o m\u00e9todo IDW.

Os dados de vaz\u00e3o e precipita\u00e7\u00e3o foram obtidos por meio do plugin HIDROWEB, que re\u00fane

informações do banco de dados da ANA. Comumente, séries temporais de dados apresentam falhas, como períodos em que não há dados ou há dados inválidos. Para suprir essa dificuldade, sem excluir os períodos com dados faltantes, os dados fluviométricos utilizados foram aqueles previamente tratados pelo processo de preenchimento de falhas com Redes Neurais Artificiais (RNA). O modelo de aplicação desse método foi desenvolvido e aprimorado por Almir Cirilo. A estrutura das RNA utilizada consiste em três camadas: a de entrada, a intermediária e a de saída. A camada de entrada possui quatro neurônios (X1, X2, X3 e X4), que constituem os dados de chuva e de vazão. A seleção e distribuição desses dados passou por uma fase de testes, considerando-se a proximidade entre os postos e a relevância e influência de uns com os outros, até atingir a formatação final, que gerou os melhores resultados. Para o presente estudo, utilizou-se os dados em versão consistida gerados por Vasconcelos (2023).

A evapotranspiração, por sua vez, foi obtida do conjunto de dados fornecido na versão 3 do Índice Global de Aridez e Banco de Dados Mensal de Evapotranspiração, abordado por Trabucco e Zomer (2019) e utilizado em múltiplos estudos em regiões áridas e semiáridas, tais como os estudos de Tidimalo *et al.* (2024) e Miguez-Macho (2025). A evapotranspiração média, contudo, é obtida por meio do *raster* global, aplicando rotina de cálculo existente em *Python*.

É preciso, também, calcular o parâmetro S através do mapa de uso de ocupação do solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que permite calcular a *Curve Number*, para então aplicar a Equação 8. Esse tem seu valor médio obtido também por meio de rotina de cálculo em *Python*.

## 2.5 Calibração do CAWM e simulação hidrológica

Para a simulação hidrológica, é necessária a inserção do *shapefile* da bacia estudada no QGIS para que o cálculo das áreas e outros parâmetros possa ser realizado. O modelo conta com parâmetros de entrada, tais como precipitação média, evapotranspiração potencial e vazão, que precisam estar no formato .csv e com datas no formato MM/DD/AAAA.

Para cada sub-bacia estudada, a simulação por meio do script em *Python* inicia pelo cálculo da área da bacia hidrográfica a partir da inserção do *shapefile* na interface do QGIS, seguida do cálculo do parâmetro K e das leituras de dados de evapotranspiração potencial (E), chuva média (P) e vazão (Q). Para cada intervalo de simulação, são calculados a precipitação efetiva ou a evapotranspiração direta e não atendida, a recarga do solo, a evapotranspiração suplementar, o escoamento direto, o fluxo subsuperficial, o escoamento da calha fluvial, as perdas de água do sistema e, para o caso de regiões úmidas, o fluxo subterrâneo. Por fim, é calculada a vazão e os

gráficos são gerados.

Para a calibração, vários testes foram realizados até que se encontrasse o comportamento mais satisfatório do modelo, de acordo com os coeficientes estatísticos. Na verificação, foi considerado o período de, pelo menos, 30% da série de dados mais atuais, variando a cada 10%, e a partir de 60%, a cada 5%, até no período máximo de 85%. Ao encontrar o período de calibração que proporcionou o melhor ajuste, definiram-se os parâmetros do modelo para cada sub-bacia.

Os indicadores de eficiência do modelo, tanto para verificar a calibração quanto para o período de validação, são: NSE e suas derivações ( $NSE_{sqrtQ}$  e  $NSE_{logQ}$ ), e Pbias (Erro Percentual Médio). No presente estudo, para a análise de desempenho, utilizou-se as faixas de valores recomendadas por Moriasi *et al.* (2007), apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Indicadores de performance recomendados para simulações mensais

<b>Classificação</b>	<b>NSE</b>	<b>Pbias</b>
Muito bons	0,75 - 1,00	<±10
Bons	0,65-0,75	±10-±15
Satisfatórios	0,50-0,65	±15-±25
Não satisfatórios	<0,5	>±25

Fonte: adaptado de Moriasi *et al.* (2007)

---

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação foi feita nas sub-bacias apresentadas na Tabela 3, junto às suas características físicas.

**Tabela 3** - Características físicas das sub-bacias estudadas

<b>Postos fluviométricos</b>			
<b>Bacia</b>	<b>Sub-bacia</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Parâmetro S (mm)</b>
Pajeú	Afogados da Ingazeira	3485,66	65
	Flores	4914,23	64
	Floresta	12089,80	70
	Ilha Grande	2262,05	67
	Serra Talhada	5825,48	65
Capibaribe	Engenho Sítio	375,6	143
	Limoeiro	5592,84	130
	Paudalho	6145,44	79
	Salgadinho	4904,19	62
	Santa Cruz do Capibaribe	1555,6	80
	São Lourenço da Mata	7236,07	77
	Toritama	2432,83	80
Sirinhaém	Vitória de Santo Antão	263,93	121
	Engenho Mato Grosso	1313,44	141

Fonte: Autora (2025)

Optou-se por utilizar 15 iterações com 5 partículas. A partir do cenário escolhido, são apresentados dois resultados para a calibração e validação do modelo hidrológico, podendo levar em consideração as séries completas ou as vazões com o período reduzido (r.), retirando-se a influência das barragens relevantes. Todos as séries utilizadas na bacia do rio Capibaribe utilizaram os dados de entrada de Vasconcelos (2023), submetidos ao processo de preenchimento de falhas com RNA, para fins de comparação posterior entre os métodos de otimização.

### 3.1 Aplicação do CAWM concentrado na bacia do rio Capibaribe

As estações de Engenho Sítio, Vitória de Santo Antão, Santa Cruz do Capibaribe e São Lourenço da Mata II foram calculadas apenas no cenário de séries completas, dado que as duas primeiras não possuem influência de barragens e as duas últimas têm séries históricas recentes, iniciadas em 1986 e 1990, respectivamente. As demais foram calculadas para os dois cenários possíveis, com e sem a influência das barragens relevantes. Os períodos considerados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Períodos de calibração e validação das estações fluviométricas da bacia do rio Capibaribe

<b>Estação</b>	<b>Período de calibração</b>	<b>Período de validação</b>
Engenho Sítio	01/04/1973 a 11/04/1985	12/04/1985 a 31/12/1992

Limoeiro	01/02/1973 a 06/08/1980	06/07/1980 a 28/02/2023
Limoeiro (r.)	01/02/1973 a 21/12/1976	22/12/1976 a 31/12/1998
Paudalho	01/08/1966 a 14/07/1983	15/07/1983 a 31/01/2023
Paudalho (r.)	01/08/1966 a 13/01/1974	14/01/1974 a 31/12/1978
Salgadinho	01/08/1966 a 25/01/1975	26/01/1975 a 28/02/2023
Salgadinho (r.)	01/08/1966 a 08/09/1974	09/09/1974 a 31/12/1998
Santa Cruz do Capibaribe	01/04/1986 a 08/05/2008	09/05/2008 a 31/01/2023
São Lourenço da Mata II	01/01/1990 a 06/02/2003	07/02/2003 a 30/09/2022
Toritama	01/01/1973 a 24/09/1980	07/07/1980 a 31/01/2023
Toritama (r.)	01/01/1973 a 02/07/1980	03/07/1980 a 31/12/1987
Vitória de Santo Antão	08/04/1967 a 14/03/1981	15/03/1981 a 31/12/2022

Fonte: Autora (2025)

Dado que a bacia está inserida no semiárido pernambucano, as variáveis calibradas foram o parâmetro de percolação e o coeficiente do expoente de perdas na calha, além do parâmetro de perdas, que é calculado a partir da solução ótima encontrada durante a calibração. O valor do coeficiente  $\alpha$ , por sua vez, oscila entre um intervalo de 0 a 10, e foi obtido por meio de testes no momento da calibração. Esses parâmetros assumiram os valores apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Parâmetros de calibração do CAWM na Bacia do rio Capibaribe

<b>Estação</b>	<b>p</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>K_s</math></b>	<b><math>K_L</math></b>
Engenho Sítio	0,8036	0,3838	0,0044	0,5375
Limoeiro	0,8659	10	0,0019	0,6061
Limoeiro (r.)	0,8209	0,4647	0,0008	0,6188
Paudalho	0,9971	10	0,0291	0,8592
Paudalho (r.)	0,9600	0,0099	0,0025	0,8164
Salgadinho	0,9998	10	0	0,8616
Salgadinho (r.)	0,9853	10	0	0,8672
Santa Cruz do Capibaribe	1,0468	10	0	0,2935
São Lourenço da Mata II	1,1023	1,2624	0,0116	0,6789
Toritama	0,9430	10	0	0,5206
Toritama (r.)	0,8000	1,0802	0,0051	0,1209
Vitória de Santo Antão	0,8671	0,1704	0,0148	0,5095

Fonte: Autora (2025)

Em Santa Cruz do Capibaribe e São Lourenço da Mata II, o coeficiente de perdas assumiu valor maior que 1, o que implica que o melhor ajuste se deu pelo aumento de perdas de transbordamento, enquanto nas demais estações fluviométricas, este se deu pela redução de perdas de transbordamento, aumentando os picos de vazão. Nas estações em que o parâmetro de percolação assumiu nulidade, não houve infiltração considerada durante a simulação.

A Tabela 6, por sua vez, expõe os coeficientes estatísticos de eficiência NSE,  $NSE_{sqrtQ}$ ,

$NSE_{logQ}$  e  $Pbias$ , avaliados a partir dos critérios adotados por Moriasi *et al.* (2007).

**Tabela 6** - Coeficientes estatísticos de eficiência do CAWM na Bacia do rio Capibaribe

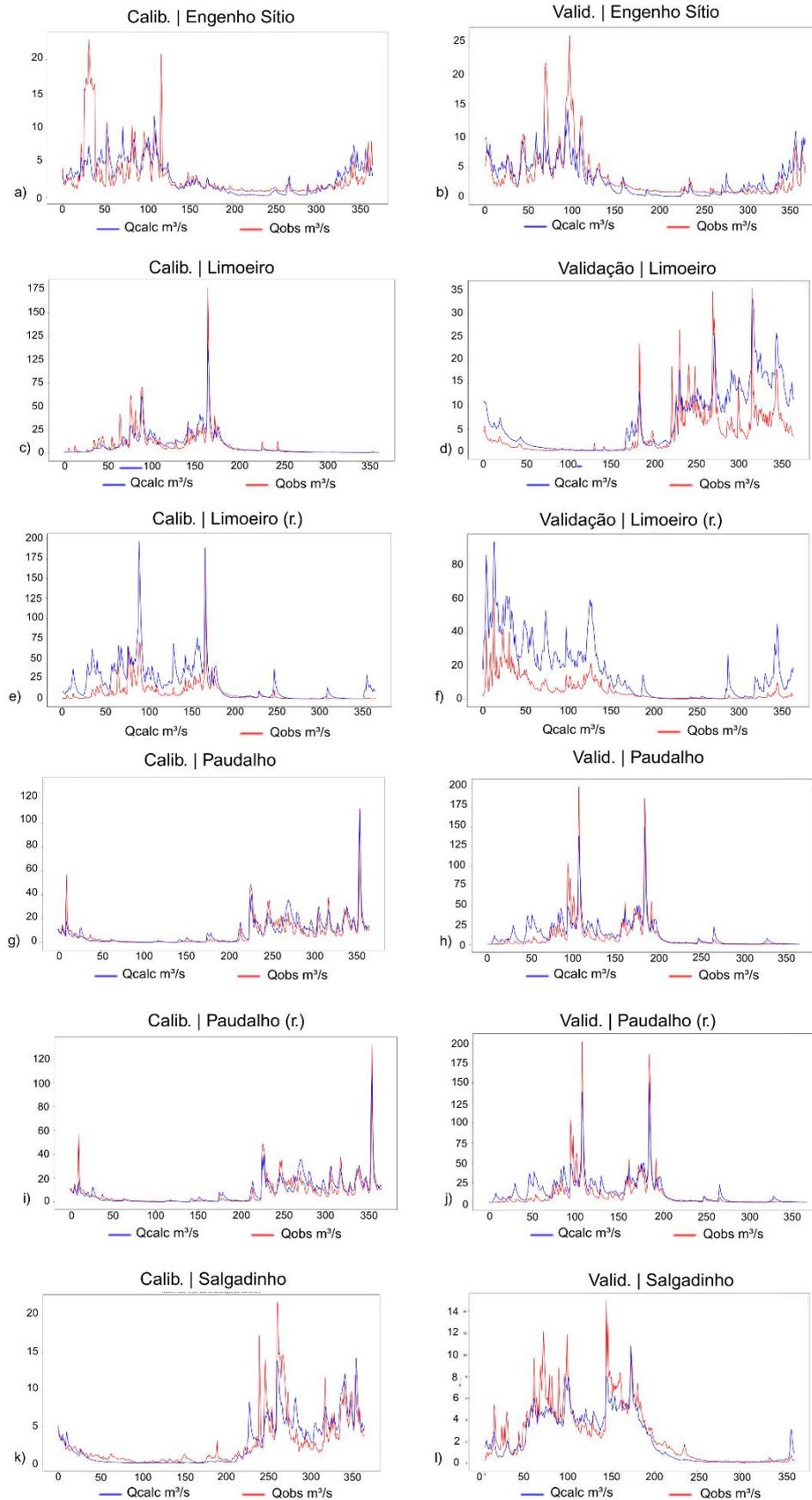
Estação	$NSE$		$NSE_{sqrtQ}$		$NSE_{logQ}$		$Pbias$	
	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Engenho Sítio	0,11	0,38	0,38	0,64	0,16	0,45	-10,48	-12,26
Limoeiro	0,77	0,45	0,79	0,36	0,78	0,46	1,56	70,82
Limoeiro (r.)	0,80	0,60	0,81	0,71	0,80	0,62	-7,09	-3,52
Paudalho	0,35	0,28	0,43	0,41	0,37	0,32	0,04	2,38
Paudalho (r.)	0,63	0,71	0,64	0,54	0,65	0,72	0,04	23,43
Salgadinho	0,51	0,48	0,55	0,67	0,54	0,50	-0,12	-16,00
Salgadinho (r.)	0,52	0,57	0,54	0,77	0,55	0,60	1,18	-35,91
Santa Cruz do Capibaribe	0,45	0,45	0,55	0,66	0,47	0,46	-18,81	-39,03
São Lourenço da Mata II	0,32	0,28	0,54	0,24	0,38	0,31	-0,66	31,88
Toritama	0,69	0,30	0,79	0,28	0,70	0,32	-0,01	57,14
Toritama (r.)	0,75	0,73	0,83	0,84	0,76	0,74	-4,08	-4,30
Vitória de Santo Antão	0,53	0,55	0,61	0,61	0,55	0,56	-0,23	-4,24

Fonte: Autora (2025)

Com base no  $NSE$  e seus derivados, dentre os 12 eventos simulados, a calibração foi classificada como pelo menos satisfatória em 67%, 83% e 67% dos eventos, respectivamente para  $NSE$ ,  $NSE_{sqrtQ}$  e  $NSE_{logQ}$ . Dentre os eventos simulados no período reduzido, no entanto, 100% dos eventos apresentaram desempenho pelo menos satisfatório, e no período longo, a porcentagem foi de 50%, 75% e 50%, respectivamente. No período de validação, a simulação foi classificada como pelo menos satisfatória em 42%, 67% e 50% para  $NSE$ ,  $NSE_{sqrtQ}$  e  $NSE_{logQ}$ , respectivamente, dos quais 100% apresentaram resultado pelo menos satisfatório no cenário sem influência de barragens. Ao analisar o  $Pbias$ , no entanto, tem-se que os resultados da calibração são pelo menos satisfatórios em 100% dos eventos, sendo 83,33% muito bons, enquanto os de validação são pelo menos satisfatórios em 58%. Observa-se ainda que, devido ao método de otimização utilizado focar apenas no período calibrado, os resultados de validação se tornam mais satisfatórios à medida que o período de calibração inclui uma parcela maior de tempo.

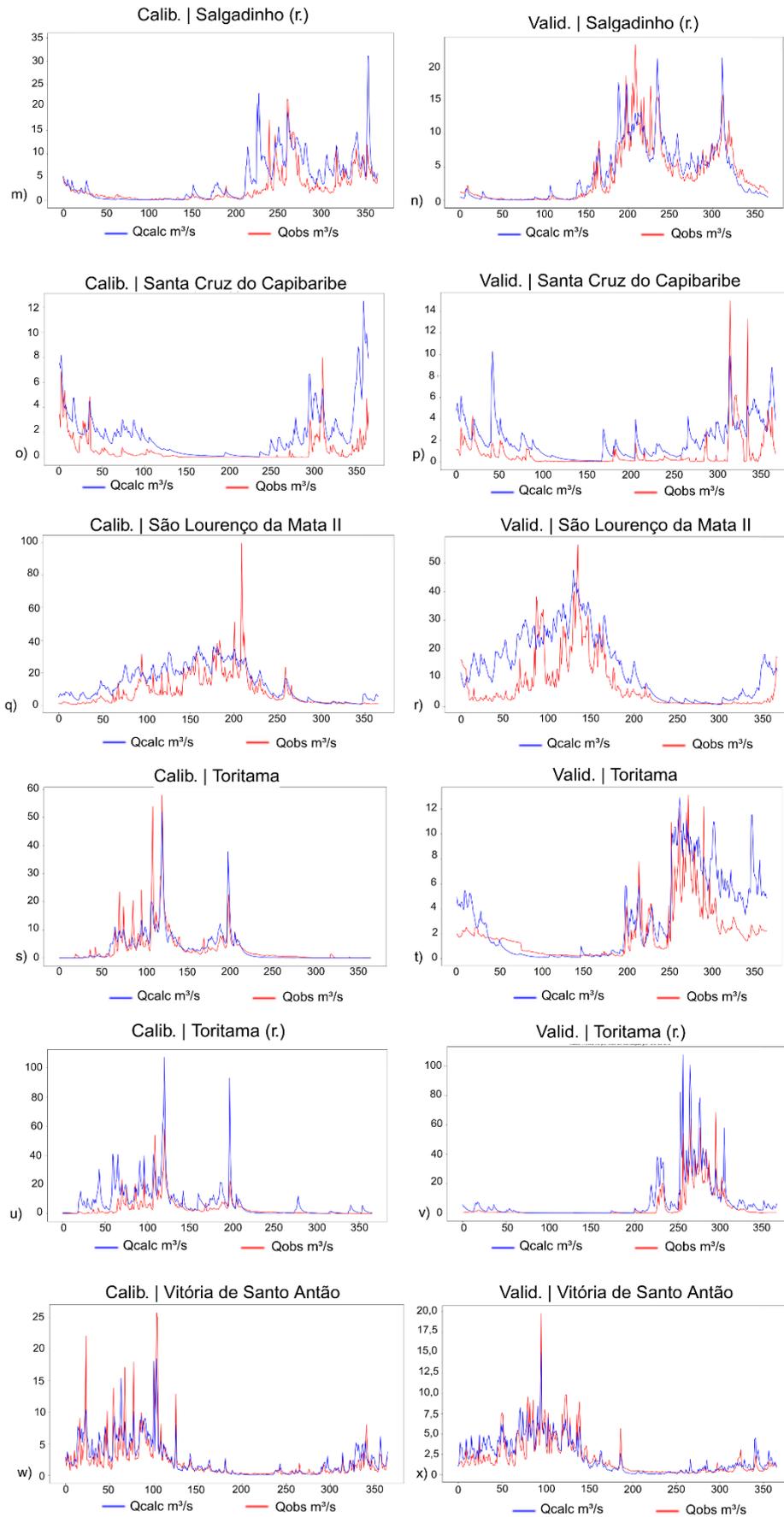
Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os hidrogramas de vazões médias observadas e calculadas nas sub-bacias do Capibaribe. Graficamente, o ajuste se assemelha mais com a curva de vazões observadas nas sub-bacias de Limoeiro, com e sem a influência de barragens, Toritama e Salgadinho, ambas também no cenário sem influência de barragens. Tal resultado é apoiado pelos índices estatísticos, cujos resultados foram expostos anteriormente.

**Figura 7 – Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe, parte 1**



Fonte: Autora (2025)

**Figura 8** – Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe, parte 2



Fonte: Autora (2025)

### 3.2 Aplicação do CAWM concentrado na bacia do rio Pajeú

Todas as estações fluviométricas do Pajeú foram calculadas para os dois cenários estudados, com e sem a influência das barragens relevantes. Os períodos considerados são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** – Períodos de calibração e validação das estações fluviométricas da bacia do rio Pajeú

<b>Estação</b>	<b>Período de calibração</b>	<b>Período de validação</b>
Afogados da Ingazeira	01/01/1985 a 03/03/2002	04/03/2002 a 31/07/2011
Flores	01/01/1973 a 04/07/1982	05/07/1982 a 28/02/2023
Flores (r.)	01/01/1973 a 03/02/1976	04/02/1976 a 31/12/1985
Floresta	01/04/1972 a 11/11/1979	12/11/1979 a 28/02/2023
Floresta (r.)	01/04/1972 a 17/08/1979	18/08/1979 a 31/12/1996
Ilha Grande	01/03/1973 a 19/04/2000	20/04/2000 a 31/01/2023
Ilha Grande (r.)	01/03/1973 a 19/11/1978	20/11/1978 a 31/05/1982
Serra Talhada	01/04/1972 a 11/11/1979	12/11/1979 a 28/02/2023
Serra Talhada (r.)	01/04/1972 a 18/12/1974	19/12/1974 a 31/12/1985

Fonte: Autora (2025)

Assim como a bacia do Capibaribe, a bacia do Pajeú está inserida no semiárido pernambucano, logo, as variáveis calibradas foram o parâmetro de percolação, o coeficiente do expoente de perdas na calha, e o parâmetro de perdas, calculado a partir da solução ótima encontrada durante a calibração. O valor do coeficiente  $\alpha$ , por sua vez, oscila entre um intervalo de 0 a 10, e foi obtido por meio de testes no momento da calibração. Esses parâmetros assumiram os valores apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** – Parâmetros de calibração do CAWM na bacia do rio Pajeú

<b>Estação</b>	<b>p</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>K_s</math></b>	<b><math>K_L</math></b>
Afogados	0,9845	10	0	0,6916
Flores	1,0318	10	0	0,5219
Flores (r.)	0,9830	10	0	0,5045
Floresta	0,9881	10	0	0,6203
Floresta (r.)	0,9952	10	0	0,6208
Ilha Grande	0,9504	10	0	0,6413
Ilha Grande (r.)	0,8000	1,3237	0	0,6248
Serra Talhada	1,1777	10	0	0,2411
Serra Talhada (r.)	1,0713	10	0	0,3068

Fonte: Autora (2025)

A Tabela 9, expõe os coeficientes estatísticos de eficiência NSE,  $NSE_{sqrtQ}$ ,  $NSE_{logQ}$  e Pbias,

representando o comportamento das vazões altas, médias, baixas e a diferença de volume relativo entre valores observados e calculados, respectivamente. Tais coeficientes estatísticos foram avaliados a partir dos critérios adotado por Moriasi *et al.* (2007).

**Tabela 9** – Coeficientes estatísticos de eficiência do CAWM na bacia do rio Pajeú

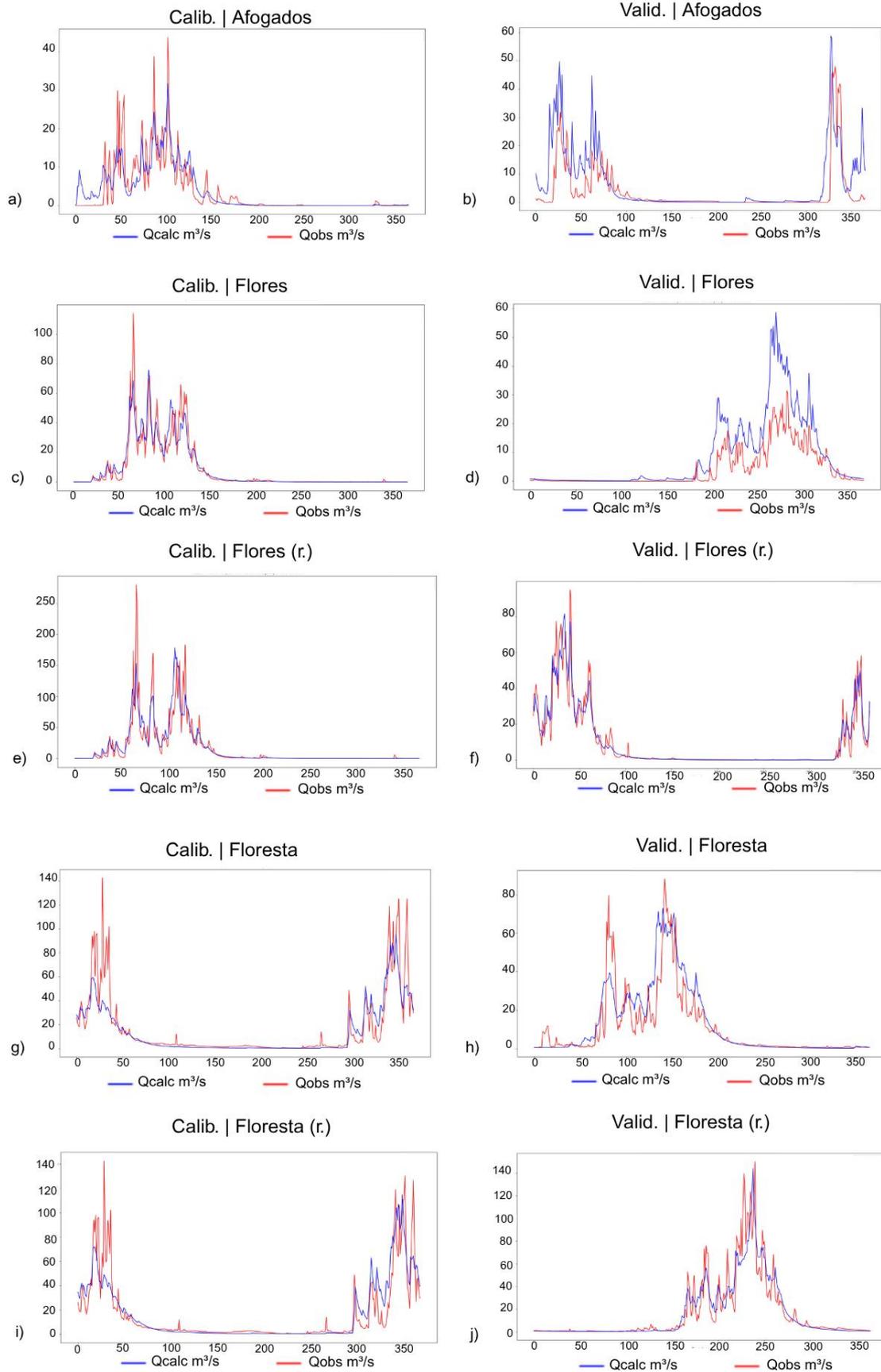
Estação	NSE		NSE <sub>sqrtQ</sub>		NSE <sub>logQ</sub>		Pbias	
	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Afogados	0,51	0,37	0,57	0,38	0,52	0,38	2,55	67,31
Flores	0,71	0,01	0,88	0,42	0,72	0,02	1,63	103,52
Flores (r.)	0,69	0,79	0,88	0,90	0,71	0,80	-2,21	-2,43
Floresta	0,60	0,48	0,76	0,52	0,62	0,50	1,22	40,46
Floresta (r.)	0,60	0,60	0,76	0,79	0,62	0,61	1,26	-2,48
Ilha Grande	0,44	0,38	0,36	0,24	0,44	0,38	-1,97	-6,47
Ilha Grande (r.)	0,65	0,70	0,77	0,74	0,66	0,70	13,68	11,98
Serra Talhada	0,63	0,57	0,84	0,75	0,65	0,59	0,16	-17,03
Serra Talhada (r.)	0,63	0,57	0,84	0,75	0,65	0,59	-4,29	-20,64

Fonte: Autora (2025)

No total, foram simulados 9 eventos, sendo 4 no cenário reduzido. Desses, o ajuste foi considerado pelo menos satisfatório na calibração em 89% dos casos segundo a interpretação do NSE e seus derivados. Interpretando o Pbias segundo os critérios de Moriasi *et al.* (2007), 100% dos eventos referentes ao período de calibração foram pelo menos satisfatórios. No período de validação, as simulações geraram resultados pelo menos satisfatórios em 67% dos eventos, sendo que 100% dos eventos no cenário reduzido atendem esse critério.

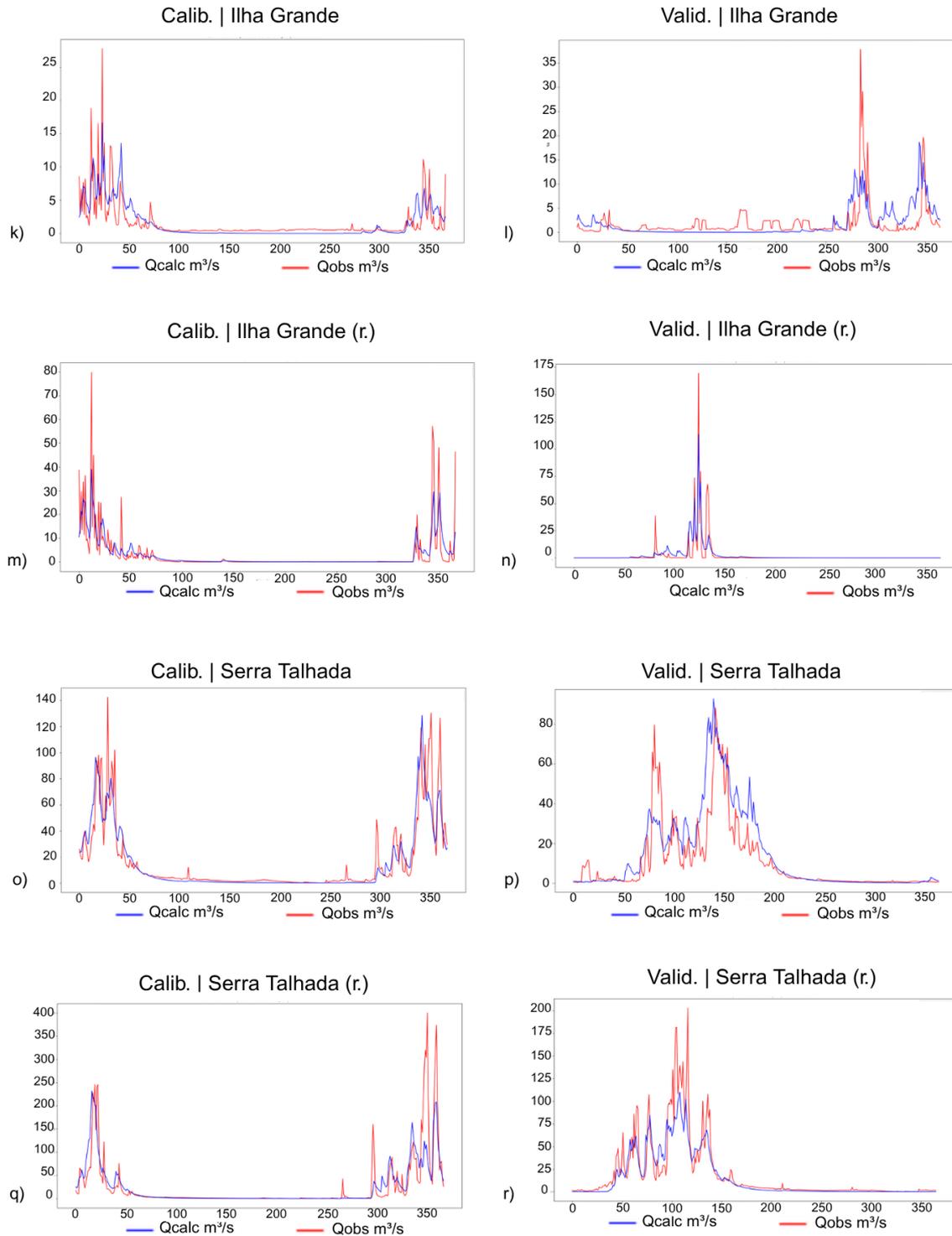
Visando analisar os resultados da calibração de forma gráfica, as Figuras 9 e 10 apresentam a variação da vazão média ao longo dos dias do ano, considerando todos os anos da série plotada. Como esperado, os melhores resultados gerados se deram nas sub-bacias em período reduzido, sem influência das barragens do Rosário, Barra de Juá e Serrinha II, nas estações de Flores, Ilha Grande e Floresta, todas em cenário reduzido. O resultado condiz com o exposto pelos índices estatísticos.

**Figura 9** – Variação da vazão média nas sub-bacias do Pajeú, parte 1



Fonte: Autora (2025)

**Figura 10** – Variação da vazão média nas sub-bacias do Pajeú, parte 2



Fonte: Autora (2025)

### 3.3 Aplicação do CAWM concentrado na bacia do rio Sirinhaém

A estação fluviométrica de Engenho do Mato Grosso foi calculada apenas no cenário de séries completas, dado que os reservatórios da região têm área insuficiente para influenciar

significativamente nos resultados.

Os períodos considerados foram de 30/01/1989 a 12/12/2001 para calibração e de 13/12/2001 a 31/03/2021 para validação.

Dado que o modelo aplicado foi o ajustado para regiões úmidas, os parâmetros de interesse passaram a contar com o parâmetro de transferência de água no solo ( $K_G$ ) e o parâmetro utilizado na percolação ( $\beta$ ). Tais parâmetros estão contidos na Tabela 10.

**Tabela 10** – Parâmetros de calibração do CAWM na bacia do rio Sirinhaém

Estação	$p$	$\alpha$	$K_s$	$K_L$	$K_g$	$\beta$
Engenho do Mato Grosso	0,9849	0	0	0,4087	0,0171	4,6094

Fonte: Autora (2025)

Analisando o desempenho da modelagem, apresentado na Tabela 11, tem-se que o desempenho é considerado, segundo critérios de Moriasi *et al.* (2007), pelo menos satisfatório em 100% dos índices estatísticos, sendo muito bom em 75% no período de calibração e pelo menos bom em 75% no período de validação.

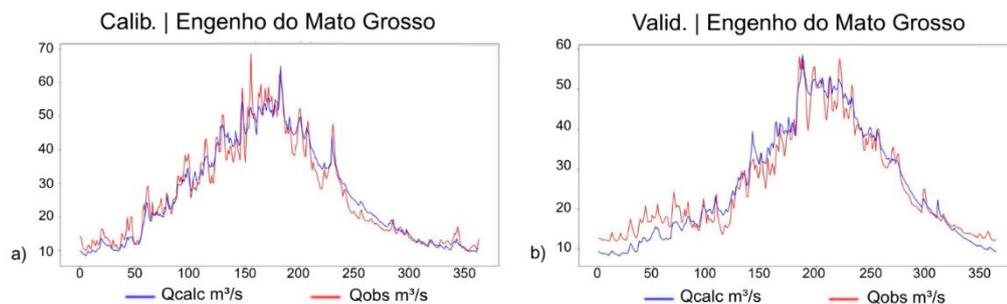
**Tabela 11** – Coeficientes estatísticos de eficiência do CAWM na bacia do rio Sirinhaém

Estação	$NSE$		$NSE_{sqrtQ}$		$NSE_{logQ}$		$Pbias$	
	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Engenho do Mato Grosso	0,75	0,70	0,72	0,68	0,87	0,64	-0,01	-0,44

Fonte: Autora (2025)

A variação de vazão média na sub-bacia é representada graficamente na Figura 11, e demonstra proximidade satisfatória entre os dados de vazão calculada e observada, o que reforça o resultado dos índices estatísticos.

**Figura 11** – Variação da vazão média na sub-bacia de Sirinhaém



Fonte: Autora (2025)

### 3.4 Análise de desempenho do CAWM

De um total de 22 eventos simulados, sendo 8 cenários sem a influência de barragens, os ajustes foram classificados de acordo com os critérios de Moriasi *et al.* (2007). Como apresentado nas Tabelas 12 e 13, as barragens têm grande influência nos ajustes de calibração, dado que a porcentagem dos resultados pelo menos satisfatórios passa a ser 100% nas simulações reduzidas. Nos cenários de validação, similarmente, o aumento ocorre, não sendo satisfatório apenas para a simulação de Salgadinho (r.).

**Tabela 12** – Desempenho do CAWM no total de eventos simulados

Desempenho	<i>NSE</i>		<i>NSE<sub>sqrtQ</sub></i>		<i>NSE<sub>logQ</sub></i>		<i>Pbias</i>	
	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Muito bom	18%	5%	50%	27%	18%	5%	86%	36%
Bom	18%	18%	5%	23%	32%	14%	9%	9%
Satisfatório	41%	27%	32%	18%	27%	41%	5%	18%
Pelo menos satisfatório	77%	50%	87%	68%	77%	60%	100%	63%

Fonte: Autora (2025)

É possível observar uma tendência do modelo hidrológico a representar melhor as vazões médias, representadas pelo *NSE<sub>sqrtQ</sub>*, seguidas das vazões baixas, representadas pelo *NSE<sub>logQ</sub>*, que obteve a maior parte dos seus resultados classificados em “Bom”. O índice *Pbias*, por sua vez, demonstra a capacidade do modelo em minimizar a diferença entre vazões simuladas e observadas por meio da função objetivo, obtendo resultados pelo menos satisfatórios em 100% dos cenários calibrados e 64% dos validados, ocorrendo uma melhoria de 14% em relação aos cenários validados quando observa-se isoladamente os cenários sem influência de barragens.

**Tabela 13** – Desempenho do CAWM nos eventos simulados sem influência de barragens

Desempenho	<i>NSE</i>		<i>NSE<sub>sqrtQ</sub></i>		<i>NSE<sub>logQ</sub></i>		<i>Pbias</i>	
	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Muito bom	25%	13%	75%	63%	25%	13%	88%	50%
Bom	25%	38%	-	25%	50%	38%	13%	13%
Satisfatório	50%	50%	25%	13%	25%	50%	-	25%
Pelo menos satisfatório	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	88%

Fonte: Autora (2025)

### 3.5 Comparação entre a otimização com GRG2 e PSO

Vasconcelos (2023), em seu estudo acerca da integração de modelagem hidrológica e de

operação de reservatório para determinação da vazão regularizável em barragens de Pernambuco, simulou os cenários gerados no presente estudo, com exceção da simulação da sub-bacia de Engenho do Mato Grosso, com a calibração sendo feita pelo método de otimização GRG2. Na Tabela 14, é apresentada a comparação entre os resultados alcançados com o PSO, gerados no presente estudo, e o GRG2, gerados durante o estudo da autora.

**Tabela 14** – Comparação de índices estatísticos de calibração do PSO e o GRG2

Bacia	Estação	NSE		NSEsqrtQ		NSElogQ		Pbias	
		PSO	GRG2	PSO	GRG2	PSO	GRG2	PSO	GRG2
Capibaribe	Engenho Sítio	0.11	0.22	0.38	0.50	0.16	0.72	-10.48	-9.17
	Limoeiro	0.77	0.79	0.79	0.81	0.78	0.69	1.56	-4.34
	Limoeiro (r.)	0.80	0.84	0.81	0.77	0.80	0.64	-7.09	-1.74
	Paudalho	0.35	0.63	0.43	0.54	0.37	0.50	0.04	5.39
	Paudalho (r.)	0.63	0.64	0.64	0.64	0.65	0.63	0.04	3.39
	Salgadinho	0.51	0.53	0.55	0.55	0.54	-2.43	-0.12	3.81
	Salgadinho (r.)	0.52	0.53	0.54	0.56	0.55	-2.28	1.18	4.23
	Santa Cruz do Capibaribe	0.45	0.45	0.55	0.52	0.47	-17.60	-18.81	-10.79
	São Lourenço da Mata II	0.32	0.39	0.54	0.60	0.38	0.16	-0.66	39.71
	Toritama	0.69	0.76	0.79	0.83	0.70	-1.02	-0.01	47.64
	Toritama (r.)	0.75	0.76	0.83	0.84	0.76	0.08	-4.08	-7.64
Vitória de Santo Antão	0.53	0.60	0.61	0.66	0.55	0.53	-0.23	12.39	
Pajeú	Afogados	0.51	0.55	0.57	0.47	0.52	0.10	2.55	31.09
	Flores	0.71	0.70	0.88	0.85	0.72	0.46	1.63	2.77
	Flores (r.)	0.69	0.69	0.88	0.86	0.71	-0.21	-2.21	-0.93
	Floresta	0.60	0.60	0.76	0.76	0.62	0.59	1.22	-5.31
	Floresta (r.)	0.60	0.6	0.76	0.75	0.62	0.60	1.26	-3.81
	Ilha Grande	0.44	0.39	0.36	0.14	0.44	-0.14	-1.97	24.11
	Ilha Grande (r.)	0.65	0.65	0.77	0.75	0.66	0.46	13.68	14.68
	Serra Talhada	0.63	0.59	0.84	0.73	0.65	0.50	0.16	-12.23
Serra Talhada (r.)	0.63	0.63	0.84	0.84	0.65	0.69	-4.29	-4.69	

Fonte: Autora (2025)

É possível observar que o método de otimização PSO representa melhor as vazões, dada a menor diferença entre as vazões simuladas e as observadas em 82% dos casos, devido à função objetivo. Apesar de destacar-se como modelo hidrológico na representação das vazões médias anteriormente, é possível constatar que, aliado ao PSO, há um aumento significativo na veracidade da representação de vazões baixas, que obtiveram melhor resultado em 86% dos casos, quando comparado ao GRG2.

No geral, ao analisar os índices estatísticos como todo, o PSO conseguiu resultados equivalentes ou superiores ao GRG2 em 68% dos casos, sendo 12% referente a empates e 56%

referente às superações. Além disso, o PSO converge nas primeiras tentativas, enquanto o GRG2 precisa de múltiplas para alcançar um resultado satisfatório, frequentemente inferior ao gerado com o PSO como método de otimização.

## 4 CONCLUSÕES

---

Em consonância com o exposto, destaca-se que a abordagem adotada se mostrou eficaz na simulação do comportamento hidrológico de sub-bacias localizadas tanto em regiões semiáridas quanto úmidas, com destaque para as regiões úmidas, o que reforça a dificuldade dos modelos em simular bacias no semiárido. Houve destaque também para os resultados satisfatórios obtidos nos cenários sem a influência de barragens.

A análise dos indicadores estatísticos evidenciou que o PSO foi eficaz na calibração de parâmetros, apresentando no geral, resultado igual ou superior ao GRG2 em 68% dos casos simulados, e resultados superiores na representação de vazões médias e baixas, além de uma maior acurácia nas vazões calculadas.

Além disso, a aplicação do modelo confirmou seu potencial como uma ferramenta eficaz para apoio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos em regiões semiáridas, caracterizadas por elevada variabilidade pluviométrica e escassez de dados. O estudo reforça a viabilidade do CAWM como alternativa acessível e robusta para a modelagem hidrológica em contextos complexos, apontando para a importância de ampliar sua aplicação em outras bacias e de fomentar melhorias na automatização e na calibração de modelos voltados à realidade do semiárido brasileiro.

Com a continuidade deste trabalho, espera-se ampliar a aplicação do modelo CAWM calibrado com PSO em diferentes contextos hidrológicos, especialmente em outras bacias do semiárido nordestino. A expectativa é que, ao incorporar mais dados e refinar os parâmetros do modelo, seja possível obter resultados cada vez mais precisos e representativos da realidade. Além disso, sugere-se o desenvolvimento de um *plugin* para o QGIS, a fim de tornar a ferramenta mais acessível a pesquisadores, profissionais e gestores públicos, contribuindo para decisões mais embasadas na gestão dos recursos hídricos. Espera-se também que esse sistema integrado possa futuramente ser adaptado para cenários de mudanças climáticas, oferecendo suporte à previsão de eventos extremos e ao planejamento de medidas de mitigação.

---

**REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Portal HidroWeb**, 2021. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Bacia do Rio Capibaribe**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe>. Acesso em 15 dez. 2024.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Bacia do Rio Pajeú**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/169-bacias-hidrograficas-rio-pajeu/202-bacia-do-rio-pajeu>. Acesso em 15 dez. 2024.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Bacia do Rio Sirinhaém**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-sirinhaem/171-bacias-hidrograficas-rio-sirinhaem/205-bacia-do-rio-sirinhaem>. Acesso em 15 dez. 2024.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Pernambuco Tridimensional – PE3D**. Disponível em: <https://pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em 17 dez. 2024.

CIRILO, J. A. **CAWM – Campus Agreste Watershed Model**. 2023. Disponível em: <https://www.ufpe.br/web/grh>. Acesso em 3 dez. 2024.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. **Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions**. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 25, n. 15, p. 1–19, 2020.

CORRÊA, S. S.; VASCONCELOS, H. X. T.; CIRILO, J. A.; FERREIRA, T. S. G.; OLIVEIRA, A. A. A.; BEZERRA, S. T. M. **Aplicação de um modelo conceitual de chuva-vazão na Bacia Hidrográfica do Pajeú**. Em: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 17. Aracaju: ABRHidro, 2023.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **SRTM – Shuttle Radar Topography Mission**. Brasil em Relevo – Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <https://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>. Acesso em: 28 dez. 2024.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação (Mestrado Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

JAHANDIDEH-TEHRANI, M.; BOZORG-HADDAD, O.; LOÁICIGA, H. A. **Application of particle swarm optimization to water management: an introduction and overview**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 281, 2020.

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.

MIGUEZ-MACHO, G.; FAN, Y. **A global humidity index with lateral hydrologic flows.** *Nature*, v. 644, p. 413-419, 2025.

TIDIMALO, C.; MAXIMILIANO, O.; KAREN, J.; LEBRE, P. H.; BERNARD, O.; MICHELLE, G.; OAGILE, D.; COWAN, D. A. **Microbial diversity in the arid and semi-arid soils of Botswana.** *Environmental Microbiology Reports*, v. 16, 2024.

TRABUCCO, A.; ZOMER, R. **Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) Climate Database v2.** *CGIAR Consortium for Spatial Information*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v4>. Acesso em 03 jan. 2025.

VASCONCELOS, H. X. T. **Integração de modelagem hidrológica e de operação de reservatórios para determinação da vazão regularizável em barragens de Pernambuco.** 2023. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023.

MARIA EDUARDA VALENTIM CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO CAWM EM  
BACIAS HIDROGRÁFICAS PERNAMBUCANAS**

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

Aprovado em 19 de agosto de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Moura Soares (Avaliador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Thaise Suanne Guimarães Ferreira (Avaliadora)  
Universidade Federal de Pernambuco