



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

YESUS PARVATI ANDRADE SOUSA

**MODELAGEM CHUVA-VAZÃO A NÍVEL MENSAL DAS SUB-BACIAS DOS  
RIOS TAPEROÁ E PIANCÓ – PB**

JOÃO PESSOA

2021

YESUS PARVATI ANDRADE SOUSA

**MODELAGEM CHUVA-VAZÃO A NÍVEL MENSAL DAS SUB-BACIAS DOS  
RIOS TAPEROÁ E PIANCÓ – PB**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à Coordenação do Curso de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal da Paraíba, como um dos  
requisitos obrigatórios para obtenção do  
título Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Jacomé  
Sarmiento

JOÃO PESSOA

2021

Catálogo na publicação  
Seção de Catalogação e Classificação

S725m Sousa, Yesus Parvati Andrade.

MODELAGEM CHUVA-VAZÃO A NÍVEL MENSAL DAS SUB-BACIAS  
DOS RIOS TAPEROÁ E PIANCÓ - PB / Yesus Parvati Andrade Sousa. - João Pessoa,  
2021.

73 f. : il.

Orientação: Francisco Jacomé Sarmento.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

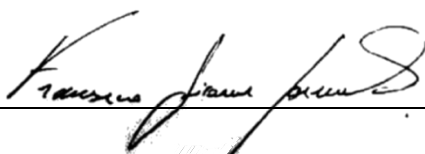
1. Modelos chuva-vazão. 2. SMAP. 3. Redes Neurais Artificiais. I. Sarmento,  
Francisco Jacomé. II. Título.

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**YESUS PARVATI ANDRADE SOUSA**

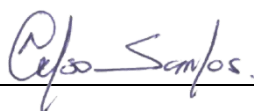
## **MODELAGEM CHUVA-VAZÃO A NÍVEL MENSAL DAS SUB-BACIAS DOS RIOS TAPEROÁ E PIANCÓ – PB**

Trabalho de Conclusão de Curso em 14/07/2021 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

*Aprovado*



Celso Augusto Guimarães Santos  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Profª. Andrea Brasiliano

Matrícula Siape: 1549557

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho à Deus e minha mãe,  
pois foram meu alicerce para eu chegar  
até onde cheguei.

Há homens que lutam um dia e são bons,  
há outros que lutam um ano e são  
melhores, há os que lutam muitos anos e  
são muito bons. Porém, há os que lutam  
por toda sua vida e estes são os  
imprescindíveis.

Bertolt Brecht

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, pois Ele está no comando de tudo.

Agradeço imensamente à minha mãe Tânia Maria de Andrade por todo apoio, compreensão e ajuda durante esta jornada.

Agradeço ao professor e orientador Francisco Sarmiento, pois foi, sem dúvida, um divisor de águas durante meu aprendizado acadêmico e minha formação profissional.

Agradeço aos professores Ana Cláudia e Celso Santos por aceitarem compor minha banca examinadora.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram comigo, em especial Marcelo, Rafael, Thiago, Rafaela e Raul por me proporcionarem momentos únicos que ficarão guardados eternamente em minha memória.

Agradeço as Instituições ANA, AESA, INMET por terem disponibilizado os dados que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

A água é o bem mais importante na manutenção da vida e está presente em praticamente tudo à nossa volta, como por exemplo, no abastecimento humano, na irrigação, na geração de energia elétrica, entre outras atividades. Sendo assim, dentre outras necessidades, deve-se realizar, seja em nível local ou regional, o monitoramento das variáveis hidrológicas para a adequada gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, por meio da medição destas variáveis, podem-se elaborar os modelos hidrológicos, que buscam representar de forma simplificada os fenômenos físicos que ocorrem na natureza. Dentro dos modelos hidrológicos matemáticos, temos os modelos chuva-vazão, que tem como objetivo realizar o cálculo de vazão com base nos valores de chuva de uma determinada região. Além dos modelos hidrológicos matemáticos, existem os modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA). Neste sentido, no presente trabalho será utilizado o modelo matemático *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) e um modelo baseado em RNA para o cálculo da vazão afluente na sub-bacia do rio Taperoá e na sub-bacia do rio Piancó, no Estado da Paraíba. A modelagem da sub-bacia do rio Taperoá seguiu o escopo temporal compreendendo o período de dados disponíveis entre 01/01/1970 à 01/12/2014, enquanto que a modelagem da sub-bacia do rio Piancó compreendeu o período de dados disponíveis de 01/05/1969 à 01/12/2014. Trabalhou-se com dados em escala de tempo mensal. Para o preenchimento de falhas nas séries pluviométricas, foi utilizado o método do vetor regional. O modelo SMAP gerou como resultado coeficientes de Nash de 0.67 e 0.40, no período total, para as sub-bacias do rio Taperoá e Piancó, respectivamente. As RNAs geraram coeficientes de Nash de 0.84 e 0.64, no período total, para as sub-bacias do rio Taperoá e Piancó, respectivamente. Comparado ao modelo SMAP, as RNAs se mostraram mais precisas na modelagem chuva-vazão para as sub-bacias estudadas.

**Palavras Chave:** Modelos chuva-vazão, SMAP, Redes Neurais Artificiais.



## ABSTRACT

Water is the most important asset in sustaining life and is present in practically everything around us, such as human supply, irrigation, electricity generation, among other activities. Therefore, among other needs, the monitoring of hydrological variables for the proper management of water resources must be carried out, whether at a local or regional level. In this sense, by measuring these variables, hydrological models can be developed, which seek to represent in a simplified way the physical phenomena that occur in nature. Within the mathematical hydrological models, we have the rainfall-runoff models, which aim to perform the flow calculation based on rainfall values in a given region. In addition to the mathematical hydrological models, there are models based on Artificial Neural Networks (ANN). In this sense, in the present work, the mathematical model Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) and an ANN-based model will be used to calculate the influent flow in the Taperoá river sub-basin and in the Piancó river sub-basin, in the State of Paraíba. The modeling of the Taperoá river sub-basin followed the temporal scope comprising the period of available data from 01/01/1970 to 12/01/2014, while the modeling of the Piancó river sub-basin comprised the period of available data from 05/01/1969 to 12/01/2014. The data were used on a monthly time scale. To fill gaps in rainfall series, the regional vector method was used. The SMAP model generated as a result Nash coefficients of 0.67 and 0.40, in the total period, for the Taperoá and Piancó river sub-basins, respectively. The ANNs generated Nash coefficients of 0.84 and 0.64, in the total period, for the Taperoá and Piancó river sub-basins, respectively. Compared to the SMAP model, the ANNs were more accurate in the rainfall-runoff modeling for the sub-basins studied.

**Keywords:** Rainfall-inflow model, SMAP, Artificial Neural Networks.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Etapas que compõem o ciclo hidrológico. ....	18
<b>Figura 2</b> – Características de um pluviômetro de leitura manual. ....	20
<b>Figura 3</b> – Superfícies vertentes e rede de drenagem que compõem uma bacia hidrográfica. ....	23
<b>Figura 4</b> – Esquemática do Método da Malha. ....	28
<b>Figura 5</b> – Representação da estrutura da versão mensal do modelo SMAP. ....	32
<b>Figura 6</b> – Neurônios biológicos. ....	35
<b>Figura 7</b> – Neurônio artificial. ....	36
<b>Figura 8</b> – Exemplo de estrutura da rede. ....	37
<b>Figura 9</b> – Bacia do rio Paraíba e sub-bacia estudada. ....	40
<b>Figura 10</b> – Mapa hipsométrico da sub-bacia estudada. ....	40
<b>Figura 11</b> – Bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. ....	42
<b>Figura 12</b> – Sub-bacia do rio Piancó. ....	43
<b>Figura 13</b> – Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Piancó. ....	44
<b>Figura 14</b> – Aplicativo utilizado no cálculo dos coeficientes de Thiessen. ....	47
<b>Figura 15</b> – Poligonal da bacia traçada. ....	48
<b>Figura 16</b> – Postos pluviométricos e o cálculo do coeficiente de Thiessen. ....	49
<b>Figura 17</b> - Séries de precipitação, de vazão calculada e observada a nível mensal para a sub-bacia do rio Taperoá utilizando o SMAP. ....	55
<b>Figura 18</b> – Valores de vazão calculada e observada e os coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação e período total, para a sub-bacia do rio Taperoá utilizando o SMAP. ....	56
<b>Figura 19</b> - Séries de precipitação, de vazão observada e calculada a nível mensal para a sub-bacia do rio Piancó utilizando o SMAP. ....	58
<b>Figura 20</b> - Valores de vazão calculada e observada e os coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação e período total, para a sub-bacia do rio Piancó utilizando o SMAP. ....	59
<b>Figura 21</b> – Séries de vazões calculadas e observadas e de precipitação para os períodos de calibração, teste e para o período total referentes à RNA #1. ....	61
<b>Figura 22</b> – Valores das vazões observadas e calculadas e regressão linear para os períodos de treinamento, validação, teste e todo o período para a RNA #1. ....	62
<b>Figura 23</b> - Séries de vazões calculadas e observadas e de precipitação para os períodos de calibração, teste e para o período total referentes à RNA #2. ....	64
<b>Figura 24</b> – Valores das vazões observadas e calculadas e regressão linear para os períodos de treinamento, validação, teste e todo o período para a RNA #2. ....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Valores para a constante de recessão (Kkt). .....	34
<b>Tabela 2</b> - Postos utilizados para o estudo da sub-bacia do rio Taperoá. ....	45
<b>Tabela 3</b> – Postos utilizados para o estudo da sub-bacia do rio Piencó.....	46
<b>Tabela 4</b> – Parâmetros utilizados para a sub-bacia do rio Taperoá. ....	50
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros utilizados para a sub-bacia do rio Piencó.....	50
<b>Tabela 6</b> – Índices de desempenho do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá. .....	54
<b>Tabela 7</b> – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá.	54
<b>Tabela 8</b> - Índices de desempenho do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Piencó..	56
<b>Tabela 9</b> - Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Piencó...	57
<b>Tabela 10</b> – Índices de desempenho referentes à modelagem da sub-bacia do rio Taperoá por meio da RNA #1.....	60
<b>Tabela 11</b> - Índices de desempenho referentes à modelagem da sub-bacia do rio Piencó por meio da RNA #2.....	63
<b>Tabela 12</b> – Principais índices estatísticos obtidos na modelagem hidrológica para as sub-bacias do rio Taperoá e do rio Piencó.....	68

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas

ANA – Agência Nacional da Água

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

GRG – Gradiente Reduzido Generalizado

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MLP – Multi-Layer Perceptron

MSE – Mean Square Error

RMS - Root Mean Square Error

RNA – Redes Neurais Artificiais

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

VBA – Visual Basic for Application

## SUMÁRIO

<b>1 Introdução .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral .....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2 Referencial Teórico.....</b>	<b>18</b>
2.1 CICLO HIDROLÓGICO .....	18
2.1.1 Precipitação .....	19
2.1.2 Vazão.....	21
2.2 Bacia Hidrográfica.....	22
2.3 Vazão.....	23
2.4 Análise dos dados de precipitação.....	23
2.4.1 Método do vetor regional .....	24
2.4.2 Precipitação média numa área .....	26
2.5 Modelos hidrológicos .....	29
2.5.1 Modelos chuva-vazão.....	30
2.5.2 Modelo SMAP .....	31
2.6 Redes Neurais artificiais .....	34
2.6.1 Neurônio Biológico .....	35
2.6.2 Neurônio artificial.....	36
2.6.3 Estruturas das RNAs.....	37
2.6.4 Aplicações das RNAs .....	38
<b>3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>39</b>
3.1 Área de Estudo.....	39
3.1.1 Sub-bacia do rio Taperoá.....	39
3.1.2 Sub-bacia do rio Piancó.....	41
3.2 Séries históricas e postos .....	44
3.2.1 Sub-bacia do rio Taperoá.....	44
3.2.2 Sub-bacia do rio Piancó.....	45
3.3 Metodologia.....	46
3.3.1 Tratamento dos dados.....	46
3.3.2 Cálculo dos coeficientes de Thiessen .....	46
3.3.3 Modelo SMAP .....	49
3.3.4 Modelagem das Redes Neurais Artificiais .....	50

3.4 Índices de desempenho .....	52
3.4.1 Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) .....	52
3.4.2 Coeficiente de Nash-Stucliffe .....	52
3.4.3 Erro médio padrão .....	53
<b>4 Resultados.....</b>	<b>54</b>
4.1 SMAP .....	54
4.1.1 Sub-bacia do rio Taperoá.....	54
4.1.2 Sub-bacia do rio Piancó.....	56
4.2 Redes Neurais Artificiais.....	59
4.2.1 Sub-bacia do rio Taperoá.....	59
4.2.2 Sub-bacia do rio Piancó.....	62
4.5 Discussão dos resultados .....	65
4.6 Conclusões dos resultados .....	68
<b>5 Considerações finais .....</b>	<b>69</b>
<b>6 Referências .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é o bem mais importante para o surgimento e manutenção da vida. Segundo Rebouças (2001), a água não é somente uma matéria-prima, como também um bem ambiental que, em muitos casos, pode ser tornar um bem econômico, além de possuir como característica o fato de ser a única matéria-prima ambiental cuja utilização tem um efeito de retorno sobre o manancial utilizado. A gestão de recursos hídricos deve considerar o cada vez mais o uso eficiente da água disponível.

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), os principais usos humanos da água são: o abastecimento humano; irrigação; dessedentação animal; geração de energia elétrica; navegação; diluição de efluentes; pesca; recreação e paisagismo. Os usos da água podem ser classificados em consuntivos e não consuntivos, onde os usos consuntivos alteram significativamente a quantidade de água disponível para demais usuários, enquanto que os usos não consuntivos alteram pouco a quantidade de água, no entanto podem alterar sua qualidade.

Neste sentido, faz-se necessário o aprofundamento acerca da temática que envolve a água em seus mais diversos aspectos. Para tanto, recorre-se à Hidrologia, que é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, distribuição espacial, circulação, suas propriedades físicas e químicas, bem como sua relação com o ambiente, incluindo também os seres vivos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). De acordo com Tucci (2001), a Hidrologia é uma disciplina ampla, que abrange grande parte do conhecimento humano, podendo se subdividir em: Hidrometeorologia; Limnologia; Potamologia; Glaciologia e Hidrogeologia.

A Hidrologia é uma ciência interdisciplinar que tem sofrido grande evolução ultimamente diante dos problemas crescentes, resultados da ocupação das bacias, do incremento significativo da utilização da água e do resultante impacto sobre o meio ambiente (TUCCI, 2001). Sendo assim, faz-se necessário adotar a bacia como unidade hidrológica, uma vez que suas características estão intimamente relacionadas com a produção de água (RENNÓ e SOARES, 2000). Sabe-se que, historicamente, a ocupação do ser humano nas bacias hidrográficas foi realizada sem muito planejamento, buscando o máximo dos benefícios, com o mínimo de custos possível, mas sem levar em consideração a preservação do meio ambiente (TUCCI, 2001).

Vale destacar que a água é movida com base em um ciclo, denominado ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico é, de forma resumida, um fenômeno natural no qual a água circula entre as massas oceânicas e continentais, movida pela energia solar, gravidade e rotação terrestre. Rebouças (2001) define este ciclo da seguinte forma:

“A energia solar que incide sobre a superfície da Terra e a transpiração da biomassa vegetal e animal, inclusive o homem, transformam em vapor uma parcela importante da água que forma os oceanos, as calotas polares, a umidade do solo e até as águas subterrâneas que são acumuladas a profundidades inferiores a um metro. Este vapor de água sobe à atmosfera, onde esfria progressivamente e se condensa para dar origem às nuvens. As massas de água atmosférica assim formadas são atraídas pela gravidade e voltam a cair na Terra, principalmente na forma de chuva, neblina e neve.”

Sendo assim, percebe-se a importância de compreender a interação da água com o meio ambiente. A de precipitação e escoamento, em especial, são variáveis de grande importância para o planejamento. Dessa forma, essas variáveis são fundamentais para o planejamento, elaboração e construção de obras como barragens, hidroelétricas, etc. Para se conhecer essas variáveis, deve-se realizar suas medições, utilizando meios tradicionais como pluviômetros e pluviógrafos ou meios mais modernos como radares meteorológicos.

Porém, a ciclo hidrológico é impactado por inúmeras variáveis, conferindo assim alta variabilidade aos fenômenos de precipitação. Para contornar este problema, diversos pesquisadores propuseram modelos hidrológicos matemáticos que buscavam explicar, de forma simplificada, os fenômenos físicos presentes numa bacia hidrográfica. Segundo Rennó e Soares (2000), um modelo pode ser considerado como representação simplificada da realidade, sendo assim utilizado como auxílio no entendimento dos processos que a envolvem.

De forma geral, um dos objetivos de um modelo hidrológico é a determinação da vazão de uma bacia. Para isto, é comum utilizar dados conhecidos de precipitação, também chamados de séries históricas de precipitação. Devido a isto é de grande importância a correta medição destes dados pluviométricos, pois eles serão a principal variável na modelagem hidrológica.

Tem-se como exemplos de modelos chuva-vazão: *Tank Model* (Sugawara, 1979), SMAP (LOPES et al, 1981), MODHAC (SCHWARZBACH e LANNA, 1989), entre outros. Como mencionado anteriormente, a principal variável de entrada é a precipitação, porém, em



alguns modelos, pode-se utilizar outras variáveis climatológicas como a evapotranspiração e uso e ocupação do solo.

Por outro lado, além dos modelos hidrológicos matemáticos, como os já citados, vem-se utilizando nos últimos anos, no campo da hidrologia, modelos baseados em redes neurais artificiais (Sarmiento, 1996; Barp, 1999; Teixeira, 2003; Machado, 2005; Farias *et al.*, 2012; Freire, 2012). Ressalta-se que uma das principais aplicações das redes neurais artificiais no campo da engenharia de recursos hídricos é a previsão de vazão, a partir de dados de precipitação, por exemplo.

Neste sentido, o presente trabalho busca realizar a modelagem chuva-vazão através de um modelo matemático hidrológico (SMAP) e por meio de um modelo baseado em redes neurais artificiais, para as sub-bacias do rio Taperoá e do rio Piancó, ambas localizadas no semiárido paraibano. Com isso, pretende-se comparar ambos os modelos, identificando qual apresentou melhores resultados.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Realizar a modelagem chuva-vazão à nível mensal para as sub-bacias do rio Taperoá e do rio Piancó.

### 1.1.2 Objetivos específicos

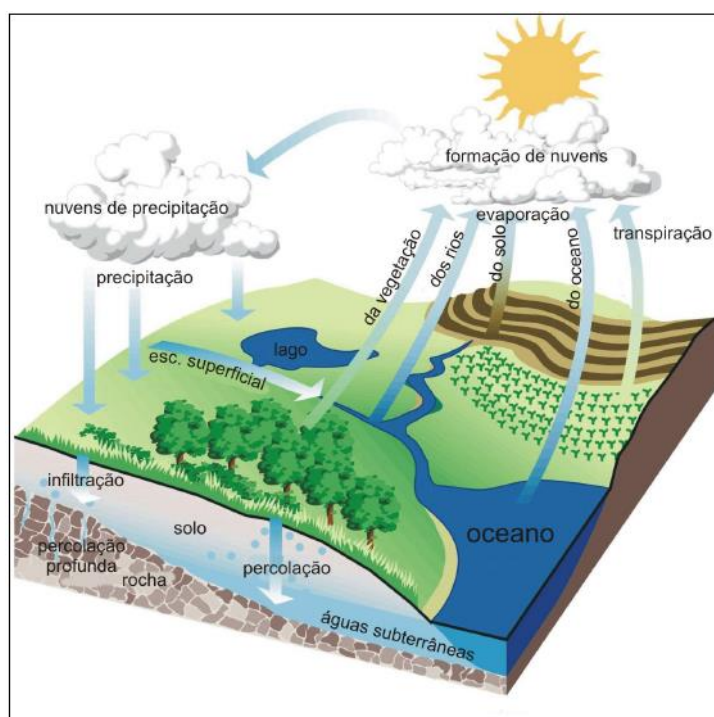
- a) Calcular os dados de vazão à nível mensal a partir dos dados de precipitação e evapotranspiração mensais através dos modelos e sub-bacias adotadas nesta pesquisa;
- b) Comparar os resultados obtidos entre o modelo hidrológico SMAP e o modelo baseado em redes neurais artificiais;
- c) Identificar o modelo que apresentou melhor precisão para os valores de vazões previstas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

Segundo Tucci (2001), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. A Figura 1 representa as principais etapas que compõem o ciclo hidrológico.

**Figura 1** – Etapas que compõem o ciclo hidrológico.



Fonte: Paz (2004).

De acordo com Paz (2004), o ciclo hidrológico pode ser descrito, de maneira simplificada, da seguinte forma:

- a) Ocorre evaporação da água dos oceanos e se forma o vapor d'água;
- b) O vapor precipita na forma de chuva, granizo, neve, etc.;
- c) Parte da precipitação evapora antes de alcançar a superfície terrestre;
- d) Boa parcela da precipitação atinge diretamente a superfície de oceanos e lagos, ocorrendo a evaporação de uma parte desta precipitação;

- e) Da precipitação que alcança a superfície terrestre, uma parte é interceptada pela cobertura vegetal, de onde parte evapora e parte atinge o solo;
- f) Da precipitação que atinge o solo, parte infiltra sub-superficialmente, e desta uma parte escoam até corpos hídricos próximos, como rios e lagos;
- g) Parte infiltrada percola atingindo os aquíferos, que escoam de forma lenta até rios e lagos;
- h) Outra parte da precipitação que alcança o solo escoam superficialmente, podendo ser retida em áreas de depressões do solo, sofrendo infiltração, evaporação ou sendo absorvida pela vegetação. A última parcela do escoamento superficial segue para rios, oceanos e lagos;
- i) A vegetação, que retém parte da água, libera vapor d'água para a atmosfera;
- j) A água que chega aos rios, seja por escoamento superficial, sub-superficial, subterrâneo ou mesmo precipitação direta, segue para os lagos e oceanos.

É importante mencionar que, ainda segundo Paz (2004), o ciclo hidrológico, como todo ciclo, não possui um começo ou fim, uma vez que a água está em contínuo movimento. A descrição do ciclo a partir da evaporação dos oceanos, faz-se apenas por questões didáticas. Além disso, a evaporação está presente em praticamente todas as etapas do ciclo, sendo o termo “evapotranspiração” usado para se referir à evaporação associada à transpiração da vegetação (PAZ, 2004).

### **2.1.1 Precipitação**

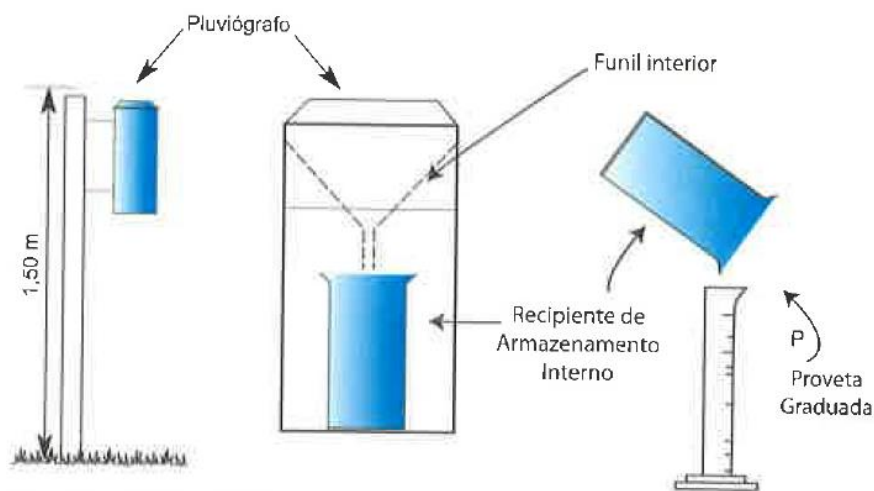
Segundo Tucci (2001), a precipitação é entendida em hidrologia como toda água proveniente da atmosfera e que alcança a superfície terrestre em formas distintas, tais como: neblina; chuva; granizo; saraiva; orvalho; geada e neve. O que pode diferenciar essas formas de precipitação é o estado em que a água se encontra. Segundo Machado (2005), para as condições climáticas em que vivemos, a mais importante destas formas de precipitação é a chuva, sendo essencial para a gestão de uma bacia conhecer como esta ocorre.

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), a precipitação é a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica, pois oferece subsídios para a quantificação

do abastecimento de água, irrigação, controle de inundações, etc., e seu conhecimento é fundamental para o adequado dimensionamento de obras hidráulicas, entre outros. Para estes mesmos autores, a chuva é a principal causa dos processos hidrológicos de interesse da engenharia e pode ser caracterizada por uma considerável aleatoriedade no tempo e no espaço. Segundo Tucci (2001), as precipitações podem ser classificadas em convectivas, orográficas e frontais ou ciclônicas.

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), a chuva pode ser medida utilizando instrumentos chamados pluviômetros que nada mais são do que recipientes para coletar a água precipitada com algumas dimensões padronizadas. No Brasil, o pluviômetro mais comum possui uma forma cilíndrica com uma área de captação da chuva de 400 cm<sup>2</sup>, de modo que um volume de 40 ml de água acumulado no pluviômetro seja equivalente a 1 mm de chuva. Sua instalação é feita a uma altura padrão de 1,50 m do solo, mantendo uma distância de objetos que possam interferir na quantidade de chuva coletada (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). A Figura 2 ilustra as características de um pluviômetro de leitura manual.

**Figura 2** – Características de um pluviômetro de leitura manual.



Fonte: Collishonn e Dornelles (2013).

Segundo Tucci (2001), os pluviômetros e pluviógrafos são instrumentos que medem a chuva de maneira pontual. A diferença entre ambos é que o pluviógrafo registra os dados de forma automática, ao contrário do pluviômetro que necessita de leituras manuais a intervalos de tempo fixos. Ademais, o pluviógrafo permite medir as

intensidades das chuvas em menores intervalos de tempo em relação àqueles obtidos com as observações manuais realizadas nos pluviômetros.

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), nos pluviômetros da rede de observação mantida pela Agência Nacional da Água (ANA) no Brasil, a medição da chuva é realizada uma vez por dia, às 7h, de forma manual.

A chuva também pode ser estimada utilizando radares meteorológicos. Esta tecnologia é baseada na emissão de pulsos de radiação eletromagnética que são refletidos pelas partículas de chuva na atmosfera, e na medição da intensidade do sinal refletido (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). A relação entre a intensidade do sinal enviado e recebido é denominada de refletividade, e esta é correlacionada à intensidade de chuva que precipita em determinada região. Ainda segundo estes autores, sua principal vantagem é a possibilidade de fazer estimativas de taxas de precipitação em grandes regiões em volta da antena emissora e receptora, embora possam existir erros consideráveis quando as estimativas são comparadas com dados de pluviógrafos. Também reforçam que uma outra forma de se obter estes dados de precipitação é através de imagens obtidas por sensores instalados em satélites. A temperatura do topo das nuvens, estimada a partir de satélites, tem uma boa correlação com a precipitação.

### **2.1.2 Vazão**

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), vazão, ou também chamada de caudal, pode ser definida como o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio ao longo de uma unidade de tempo. Assim sendo, caso o volume seja dado em litros, e o tempo seja medido em segundos, pode-se expressar a vazão em litros por segundo ( $l.s^{-1}$ ). No entanto, os autores ressaltam que para vazões de rios, a vazão é comumente medida em metros cúbicos por segundo ( $m^3.s^{-1}$ ) e que se faz necessário conhecer a vazão de um rio para determinação da disponibilidade de água. Deve-se também obter medições de vazões em situações extremas, a exemplo das cheias, que possibilitam o dimensionamento de estruturas ou medidas que permitam reduzir os danos que possam ser causados.

Por outro lado, os rios podem ser classificados, de acordo com seu fluxo de água, em três tipos: perenes, intermitentes e efêmeros. Os rios perenes são aqueles que possuem escoamento de água durante todo ou quase todo o ano, tendo bem definido seu canal

natural por onde ocorre o fluxo d'água. Os rios intermitentes são aqueles que possuem fluxo d'água apenas em determinadas épocas do ano. Por outro lado, os rios efêmeros são aqueles cujo fluxo d'água se dá apenas durante o período de chuvas.

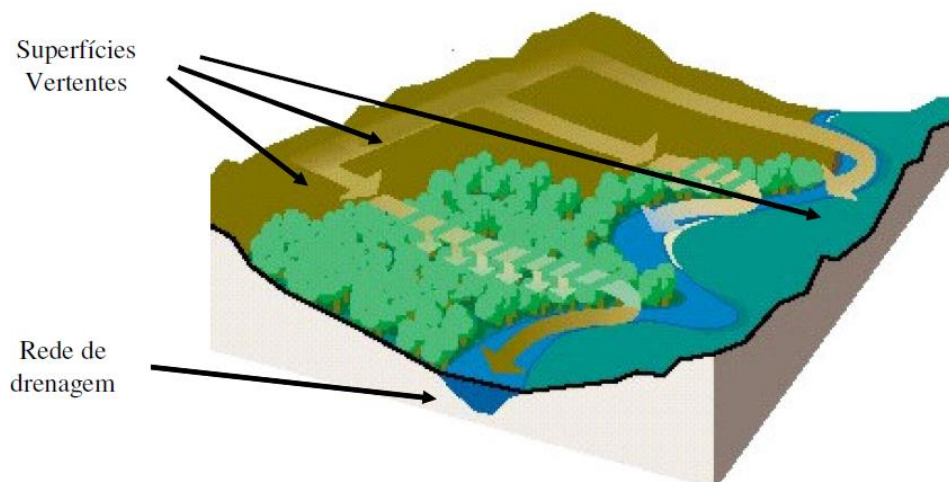
Vale salientar que no canal, de uma margem a outra e da superfície para o leito, o fluxo não se dá de forma homogênea, implicando na variação da vazão, a qual varia na seção vertical e transversal ao rio. Segundo Carvalho (2008), os métodos utilizados para determinar a vazão podem ser indiretos ou automáticos, desde um objeto lançado na água para estimar a velocidade que percorre em uma determinada distância, até métodos mais sofisticados, à exemplo dos molinetes, doppler acústicos e em alguns casos até por satélites. Dentre estes, o uso do molinete hidrométrico é o mais comumente utilizado.

Segundo a ANA (2009), a medição convencional usando o molinete hidrométrico é universalmente adotada para a determinação da vazão em cursos de água naturais e artificiais (canais), e que consiste em determinar a área da seção transversal ao fluxo, bem como a velocidade média do fluxo que passa na seção. A determinação da área da seção pode ser feita a partir da medição da abscissa e da profundidade do rio em um número significativo de pontos ao longo da seção. Estes pontos definidos ao longo da seção determinam as quais serão as verticais que ligam a superfície ao fundo do rio, pois são nessas mesmas verticais que são realizadas as medições de velocidade com o molinete hidrométrico em diferentes profundidades. A velocidade média na vertical é determinada normalmente por meio de métodos analíticos.

## 2.2 BACIA HIDROGRÁFICA

De acordo com Tucci (2001), a bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural da água da precipitação que converge os escoamentos para um único ponto de saída, denominado como exutório da bacia. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por canais d'água que confluem até resultar um leito único no exutório (TUCCI, 2001). A Figura 2 ilustra as superfícies vertentes e a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica.

**Figura 3** – Superfícies vertentes e rede de drenagem que compõem uma bacia hidrográfica.



Fonte: Paz (2004).

Ressalta-se que a precipitação que cai sobre as vertentes infiltra-se nos solos até ocorrer saturação superficial destes, momento em que começam a decrescer as taxas de infiltração e a surgir crescentes escoamentos superficiais, caso a precipitação se mantenha. Neste sentido, a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente (TUCCI, 2001).

### 2.3 VAZÃO

### 2.4 ANÁLISE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Um dos objetivos de um posto pluviométrico é o de obter uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos. No entanto, podem ocorrer a existência de períodos sem informações ou com falhas nas observações. Segundo Tucci (2001), as causas mais comuns de erros grosseiros nas observações podem ser: preenchimento errado do valor na caderneta de campo; soma errada do número de provetas quando a precipitação é alta; valor estimado pelo observador por não se encontrar no local no dia da amostragem; surgimento de vegetação ou outra obstrução próxima ao posto de observação; danificação do aparelho e problemas mecânicos no registrador gráfico. Sendo assim, deve-se inicialmente identificar e realizar a correção destes erros e, em seguida, preencher as

lacunas por meio de determinados métodos. Dentre os principais métodos para preenchimento de falha, destacam-se os seguintes métodos: ponderação regional, regressão linear e vetor regional.

#### 2.4.1 Método do vetor regional

De acordo com Tucci (2001), o método do vetor regional é definido como: “[...] uma série cronológica, sintética, de índices pluviométricos anuais (ou mensais), oriundos da extração por um método de máxima verossimilhança da informação mais provável contida nos dados de um conjunto de estações de observação, agrupadas regionalmente.” Segundo Oliveira et al. (2010), esses índices são únicos para toda a região e estão relacionados às precipitações em cada estação por meio de coeficientes locais, de modo que as estimativas da precipitação anual ou mensal, na estação “j” e no ano “i”, resultam do produto:

$$\hat{P}_{i,j} = L_i C_j \quad (\text{Eq. 01})$$

onde

$L_i$  = vetor coluna, com “n” linhas, também chamado vetor regional;

$C_j$  = vetor linha, com “m” colunas, também chamado vetor de coeficientes;

n = número de anos das séries de totais anuais;

m = número de estações pluviométricas.

De acordo com Tucci (2001), para cada mês ou ano, correspondente a uma estação, haverá uma diferença entre os valores observados e estimados, de tal forma que seja possível estabelecer uma matriz D de diferenças, cujos elementos são calculados segundo:

$$d_{i,j} = p_{ij} - l_i * c_j \quad (\text{Eq. 02})$$

Os elementos da matriz L e C são determinados pela minimização quadrática da matriz D. A soma dos quadrados das diferenças é:



$$FO = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij}^2 \quad (\text{Eq. 03})$$

Diferenciando a Equação 03 com relação as incógnitas  $l_i$  e  $c_j$  e igualando cada expressão a zero, o resultado é um sistema não-linear de  $n+m$  equações e  $n+m$  incógnitas cuja solução é:

$$c_j = \sum_i^n l_j * p_{ij} / \sum_i^n l_j^2 \quad \{\text{onde } j = 1, 2, \dots, m\} \quad (\text{Eq. 04})$$

$$l_j = \sum_j^m c_j * p_{ij} / \sum_j^m c_j^2 \quad \{\text{onde } i = 1, 2, \dots, n\} \quad (\text{Eq. 05})$$

A solução do sistema pode ser alcançada por meio de um processo iterativo. Parte-se de uma estimativa inicial do vetor regional (por exemplo, a cada mês a média aritmética precipitada nas  $m$  estações):

$$l_i = 1/m \sum_j^m p_{ij} \quad (\text{Eq. 06})$$

Com essa estimativa inicial, resolve-se a Equação 06. Obtido os valores do vetor  $C$ , aplica-se o mesmo processo iterativo para recalculer os elementos do vetor  $L$ , que converge rapidamente. Uma vez determinados o vetor regional e os coeficientes das locais de cada estação, deve-se calcular os erros absolutos e os relativos. Pode-se utilizar, por exemplo, gráficos que possibilitem uma análise visual, no qual estes devem conter os erros simples ou acumulados em função do tempo, permitindo detectar erros sistemáticos, erros grosseiros ou anomalias climáticas e estimar os valores para o preenchimento de falhas nas observações.

Após a identificação das falhas e anomalias, faz-se a substituição das mesmas pelo correspondente valor sintético obtido com o vetor regional adicionado de uma parcela randômica ( $t$ ) que segue a distribuição normal de probabilidades, com média e desvio padrão iguais aos dos respectivos vetores de desvios.

A parcela  $t$  é obtida a partir de uma variável aleatória  $N(0,1)$  com distribuição normal gerada a partir de números pseudoaleatórios com distribuição uniforme. É possível gerar estes números através de uma função nativa do software *Microsoft Excel* (2016). Este método é baseado no princípio de que as séries de totais mensais e anuais de

chuva se distribuem segundo uma normal. Assim, a parcela aleatória a ser adicionada ao valor mensal calculado com base no vetor regional será:

$$t_i = d_i + s_i k_i \quad (\text{Eq. 07})$$

onde  $d_i$  é a média dos desvios para a série correspondente ao posto  $j$ ,  $s_i$  é o desvio padrão dos desvios para a série correspondente ao posto  $j$  e  $k_i$  é o número aleatório com distribuição normal.

A variável aleatória  $N(0,1)$  pode ser obtida através do método de Box-Muller, utilizando-se os números pseudoaleatórios com distribuição uniforme (U):

$$K_i = \sqrt{-2 * \ln (U_1)} \sin (2\pi U_2) \quad (\text{Eq. 08})$$

## 2.4.2 Precipitação média numa área

A precipitação média numa determinada área pode ser descrita, de acordo com Tucci (2001) como sendo uma lâmina d'água de altura uniforme que cobre toda a região a ser estudada, associada a um período de tempo dado (como hora, dia, mês, ano). No entanto, Shachez (1986, *apud* TUCCI, 2001) afirma que a precipitação média é uma abstração, uma vez que a precipitação real obedece a distribuição espacial e temporal variáveis. Existem vários métodos para calcular a precipitação média numa bacia, tendo-se como principais exemplos os seguintes: método da média aritmética (o mais simples dentre os métodos aqui citados); método das isoietas; método dos polígonos de Thiessen.

### 2.4.2.1 Método dos polígonos de Thiessen

De acordo com Tucci (2001), este método considera a não-uniformidade da distribuição espacial dos postos, no entanto desconsidera certos aspectos, como o relevo da bacia. O fato de que a precipitação varia consideravelmente não somente em grandes, mas também em áreas pequenas é uma questão de comum observação (THIESEN, 1911). De acordo com Thiessen (1911), muitos fatores podem interferir no fato de que há diferentes registros de quantidades de precipitação em estações próximas à outra.

Segundo Tucci (2001), a metodologia do método consiste no seguinte: a) ligar os postos por meio de retas; b) traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos passando pelo meio da linha que liga os dois postos; c) prolongar as linhas perpendiculares até encontrar outra; d) o polígono é, portanto, formado pela intersecção das linhas, correspondendo à área de influência de cada posto.

A precipitação média é calculada como sendo:

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (\text{Eq. 09})$$

onde  $A_i$  é a área de influência do posto  $i$ ;  $P_i$  é a precipitação registrada no posto  $i$  e  $A$  é a área total da bacia.

Segundo o referido autor, em situações onde a localização e exposição dos postos são semelhantes e as distâncias entre eles não é muito elevada, o método fornece bons resultados. Também facilita o cálculo automatizado, já que ao se estabelecer a rede, os valores de  $A_i$  permanecem constantes, tendo como variável apenas as precipitações  $P_i$ .

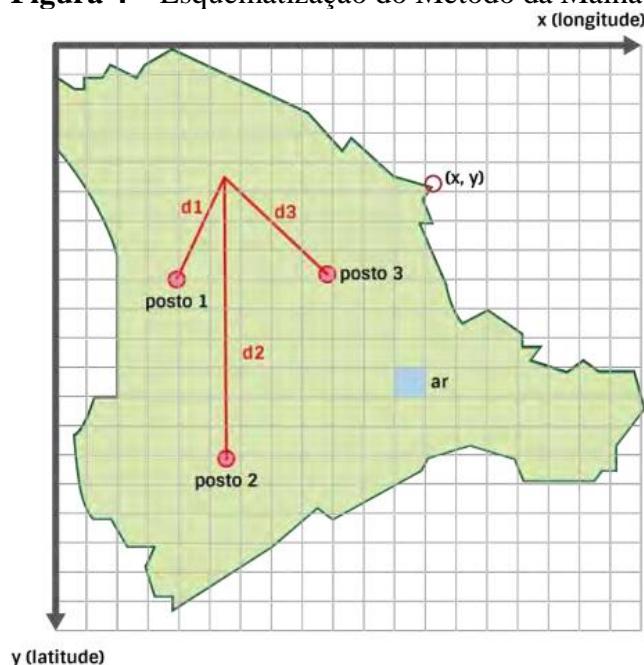
#### 2.4.2.1.1 Método da Malha

Segundo Sarmento (2020), a precipitação média de uma bacia pode ser obtida a partir da atribuição de coeficientes de ponderação aos postos da rede pluviométrica representativa da bacia hidrográfica estudada. Ainda segundo o autor, a solução computacional para essa tarefa pode ser obtida por meio de técnicas de simulação. Sarmento e Martins (1992) propuseram um método determinístico alternativo para a obtenção desses coeficientes de ponderação. Esse é um método eficiente e rápido de aproveitar a informação sobre chuva disponível na região, visto que possibilita a obtenção instantânea dos coeficientes de Thiessen para a disposição espacial de postos que se desejar (SARMENTO, 2020).

Sendo assim, o Método da Malha insere a bacia a ser estudada em uma área retangular que abrange, além da bacia, todos os postos pluviométricos que serão utilizados nos cálculos. Além disso, de acordo com Sarmento (2020), uma malha é sobreposta ao retângulo no qual se inseriu a bacia a ser estudada (daí a denominação de Método das Malhas), cujo reticulado pode assumir dimensões tão pequenas as dimensões

de um *pixel*. Dessa forma, a quantidade de pontos que se encontra dentro do contorno da bacia é distribuída entre os postos pluviométricos da rede, sempre seguindo o critério de maior proximidade entre o ponto e os postos. O coeficiente de ponderação do posto será a relação entre o número de pontos a ele associado (os pontos mais próximos a este posto) e o número total de pontos da sua superfície formada pelo contorno da bacia. A Figura 4 ilustra esquematicamente o Método da Malha, onde “ar” é a área de cada retícula.

**Figura 4** – Esquematização do Método da Malha.



Fonte: Sarmiento (2020).

Dessa forma, para um “ar” suficientemente pequeno, pode-se dizer que a área da bacia é igual ao somatório dos “ar’s” contidos no interior da bacia, conforme a seguinte equação:

$$\sum A_r \cong A_{bacia} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde  $A_r$  = área da retícula e  $A_{bacia}$  = área da bacia.

Por fim, o coeficiente de Thiessen associado a um posto k qualquer é dado por:

$$C_k = 100 * \frac{n_k}{N} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde

$C_k$  = Coeficiente de Thiessen do posto  $k$ , em %;

$n_k$  = número de retículas pertencentes à bacia e às associadas ao posto  $k$ ;

$N$  = número total de retículas (ou *pixels*) formadores da bacia.

## 2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos baseados em características físicas são de grande valia para o entendimento e análise de problemas localizados ou em domínios com dados topográficos e de parâmetros hidráulicos confiáveis (SANTOS, 2009). Segundo Tucci (1998, *apud* SANTOS, 2009), modelo hidrológico pode ser definido como uma ferramenta usada para representar os processos que acontecem numa bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

Segundo Rennó e Soares (2000), um modelo pode ser considerado uma simplificação da realidade, que pode auxiliar no entendimento dos processos físicos. A modelagem hidrológica requer conhecimento acerca do ciclo hidrológico, e conseqüentemente, acerca de todos os processos físicos que ocorrem durante uma chuva, ou seja, a precipitação, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial (SANTOS, 2007). Estes processos podem ser representados através de modelos matemáticos. Ainda segundo Santos (2007), a modelagem hidrológica permite verificar a consistência dos dados disponíveis, que em geral não são muitos, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem então ser calibrados. Isto permite, por exemplo, a geração de séries com valores sintéticos.

De acordo com Rennó e Soares (2000), os processos ambientais no mundo real são geralmente complexos e são tipicamente tridimensionais, dependendo fortemente do tempo. Tal complexidade pode incluir normalmente comportamentos de características não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Ainda segundo os autores, limitações computacionais leva à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser representadas no modelo. Ressalta-se que, em alguns casos, esses conjuntos de equações podem ser um conjunto de hipóteses, referentes a processos físicos, do qual entradas e saídas estão conectadas. Sendo assim, esse conjunto de equações parametrizadas representam a melhor

aproximação do modelador para explicar esses processos, dados essas restrições coletivas (RENNÓ e SOARES, 2000).

Dessa forma, de maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por diversas variáveis e parâmetros. Um mesmo processo pode ser representado de formas distintas, sendo que, em dadas situações, algumas destas formas podem ser mais apropriadas, não havendo assim um modelo que seja universalmente melhor e sim pode existir aquele que melhor descreve determinado fenômeno (RENNÓ e SOARES, 2000).

Segundo Santos (2009), para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário à compreensão da estrutura do modelo, bem como suas limitações. Além desses fatos, ressalta-se que muitos modelos necessitam ser calibrados para que reproduza o mais próximo possível os fenômenos a serem modelados, uma vez que, em decorrência dos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos da bacia (SANTOS, 2009).

### **2.5.1 Modelos chuva-vazão**

Os modelos chuva-vazão são modelos hidrológicos que tem como objetivo principal a determinação da vazão próximo ou no exutório de uma bacia hidrográfica, a partir de dados de precipitação (chuva) desta mesma bacia. Tem-se como exemplos de modelos chuva-vazão: *Tank Model* (Sugawara, 1979), MODHAC (SCHWARZBACH e LANNA, 1989), SMAP (LOPES et al, 1981), entre outros.

Nos últimos anos, vem-se utilizando redes neurais artificiais para a modelagem de séries hidrológicas, como a exemplo de: Sarmiento (1996), Farias et al. (2012), Machado (2005), Barp (1999), Macedo (2013) e vários outros.

Para que um modelo tenha uma boa representação, é comum se trabalhar com séries históricas de precipitação de pelo menos 30 anos ininterruptos. No entanto, as séries históricas ininterruptas de dados de precipitação são normalmente escassas, necessitando muitas vezes de algum método auxiliar para o preenchimento de falhas e anomalias desses dados, conforme elucidado no tópico 2.4.

## 2.5.2 Modelo SMAP

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) foi desenvolvido por Lopes et al. em 1981. É um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão (LOPES, 1999). Ainda segundo o autor, o desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo). Inicialmente foi desenvolvido apenas em sua versão diária, e posteriormente apresentado nas versões horária e mensal, sofrendo algumas adaptações (LOPES, 1999).

### 2.5.2.1 Versão mensal

Segundo Lopes (1999), em intervalo de tempo mensal temos uma soma de eventos de chuva. O modelo SMAP, em sua versão mensal, é constituído de dois reservatórios matemáticos (Figura 5), cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês da seguinte forma:

$$R_{\text{solo}}(i + 1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$R_{\text{sub}}(i + 1) = R_{\text{sub}}(i) + \text{Rec} - E_b \quad (\text{Eq. 13})$$

onde

$R_{\text{solo}}$  = reservatório do solo;

$R_{\text{sub}}$  = reservatório subterrâneo;

$P$  = chuva;

$E_s$  = escoamento superficial;

$E_r$  = evapotranspiração real;

$\text{Rec}$  = recarga subterrânea;

$E_b$  = escoamento básico.

Sua inicialização é feita da seguinte forma:

$$R_{\text{solo}}(1) = T_{\text{uin}} * \text{Sat} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$R_{\text{sub}}(1) = E_{\text{bin}} / (1 - K_k) / A_d * 2630 \quad (\text{Eq. 15})$$

onde

$T_{\text{uin}}$  = teor de umidade inicial (adimensional);

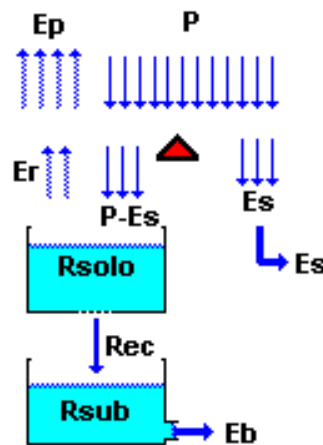
$\text{Sat}$  = capacidade de saturação do solo;

$E_{\text{bin}}$  = vazão básica inicial ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$K_k$  = constante de recessão ( $\text{mês}^{-1}$ ).

$A_d$  = área de drenagem ( $\text{km}^2$ ).

**Figura 5** – Representação da estrutura da versão mensal do modelo SMAP.



Fonte: Lopes (1999).

Possui quatro funções de transferência, que são:

$$E_s = f_1 * P \quad \{\text{onde } f_1 = T_u^{P_{es}}\} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$E_r = f_2 * E_p \quad \{\text{onde } f_2 = T_u\} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$R_{ec} = f_3 * R_{\text{solo}} \quad \{\text{onde } f_3 = C_{rec} * T_u^4\} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$E_b = f_4 * R_{\text{sub}} \quad \{\text{onde } f_4 = 1 - K_k\} \quad (\text{Eq. 19})$$



onde

Pes = parâmetro de escoamento superficial (adimensional);

Tu = teor de umidade;

Crec = coeficiente de recarga (adimensional).

O valor de Tu é dado por:

$$Tu = R_{solo}/Sat \quad (Eq. 20)$$

onde Sat é a capacidade de saturação do solo, em mm.

O valor da constante de recessão (Kk) é calculado como sendo:

$$Kk = (0.5)^{(1/Kkt)} \quad (Eq. 21)$$

onde Kkt é expresso em meses em que a vazão básica cai a metade de seu valor.

Dessa forma, os quatro parâmetros do modelo são: Sat, Pes, Crec e Kk. Os valores de Crec e Tu são multiplicados por 100.

De acordo com Lopes (1999), o transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. O modelo contém uma rotina de atualização prévia do teor de umidade, onde a cada intervalo de tempo é acrescentado uma parcela de chuva do mês, de forma a utilizar o valor médio do teor de umidade para o mês em questão. De acordo com Lopes (1999), essa rotina melhora sensivelmente os resultados, especialmente em regiões onde há grande variabilidade pluviométrica.

Por fim, a vazão é calculada pela equação:

$$Q = (Es + Eb) * Ad / 2630 \quad (Eq. 22)$$

onde Q é a vazão dada em m<sup>3</sup>/s.

Os dados de entrada são a série mensal de chuva e as médias mensais multianuais de evaporação potencial (LOPES, 1999).

Os parâmetros de calibração (Sat, Pes e Crec) devem respeitar as seguintes faixas de variação:

- a)  $400 < \text{Sat} < 5000$ ;
- b)  $0.1 < \text{Pes} < 10$ ;
- c)  $0 < \text{Crec} < 70$ .

De acordo com Lopes (1999), a constante de recessão (Kkt) deve ser ajustada manualmente após ter atingido um ajuste razoável dos 3 parâmetros, com base na Tabela 01.

**Tabela 1** – Valores para a constante de recessão (Kkt).

Meses	Status	Valor
1 mês	muito rápido	0.5
2 meses	rápido	0.7071
3 meses	médio	0.7937
4 meses	lento	0.8409
6 meses	muito lento	0.8909

Fonte: Lopes (1999).

## 2.6 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Segundo Sarmiento (1996), as Redes Neurais Artificiais (RNA) foram desenvolvidas analogamente às redes neurais biológicas, cujo desenvolvimento foi motivado pela vontade de entender e representar sob uma abordagem matemática algumas características do cérebro humano. Segundo Teixeira (2003), as RNAs são modelos computacionais inspirados no mecanismo de funcionamento do cérebro humano. Buscam simular, através de algoritmos, as propriedades biológicas do cérebro humano. De acordo com Freire (2012), as RNAs são ferramentas matemáticas baseadas no comportamento do cérebro humano, levando em consideração que as funções neurais biológicas, incluindo a memória, são armazenadas nos neurônios e nas conexões entre eles, e que o aprendizado se baseia em estabelecer novas conexões entre neurônios ou modificar as conexões existentes.

Ainda segundo Freire (2012), um dos aspectos que tem motivado o uso frequente de RNAs em vários campos da ciência, especialmente em estudos de previsão de séries temporais de dados, é a sua capacidade de representar de forma satisfatórias as relações não-lineares entre variáveis. De acordo com Sarmiento (1996), as RNAs são uma poderosa

alternativa na modelagem matemática de sistemas que envolvem transformações tipicamente não-lineares.

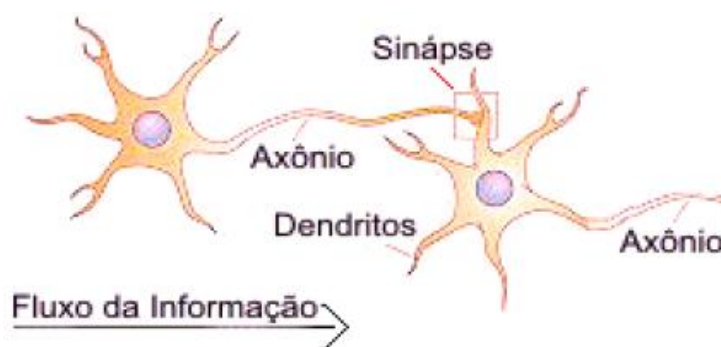
Segundo Teixeira (2003), as RNAs podem ser treinadas com base em exemplos previamente apresentados, fornecendo assim características essenciais das entradas e buscar respostas a padrões distintos daqueles dados incluídos no conjunto de treinamento. De acordo com Freire (2012), por meio das RNAs, a dependência entre ocorrências passadas e futuras de uma série temporal pode ser modelada através de combinações de diversas funções matemáticas não-lineares, o que pode resultar na satisfatória representação de sistemas complexos.

### 2.6.1 Neurônio Biológico

O cérebro humano é formado por algo em torno de  $10^{11}$  neurônios interligados por, aproximadamente,  $10^{15}$  interconexões, no qual cada neurônio recebe, processa e transmite sinais eletroquímicos através das sinapses neurais que compõem o sistema de comunicação cerebral (TEIXEIRA, 2003).

De acordo com Sarmiento (1996), alguns componentes básicos de um neurônio biológico são importantes para o bom entendimento do funcionamento das RNAs. Tem-se, portanto, os seguintes componentes: a) os dendritos, que recebem os impulsos elétricos transmitidos pelos outros neurônios; b) a sinapse, que transmite esses impulsos através de processos químicos; c) o corpo da célula, que recolhe os sinais recebidos e transmite-os para as outras células por meio do axônio. A Figura 6 ilustra de forma simplificada as principais estruturas de um neurônio.

**Figura 6** – Neurônios biológicos.



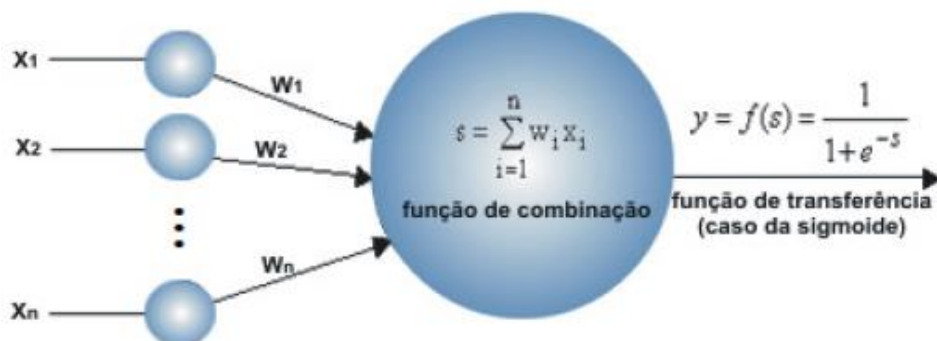
Fonte: Freire (2012).

## 2.6.2 Neurônio artificial

Segundo Teixeira (2003), as RNAs buscam simular as características do neurônio biológico, onde se fornece um conjunto de dados de entrada, e cada entrada é então multiplicada por um peso, fazendo analogia a força sináptica, gerando, portanto, valores que são somados para determinar o nível de ativação do neurônio. De acordo com Freire (2012), o neurônio artificial (Figura 7) é uma estrutura que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico, em que:

- Os dendritos são os dados de entrada;
- As sinapses são os pesos atribuídos;
- Os estímulos captados pelas entradas são a função de soma;
- O limiar de disparo do neurônio é a função de transferência.

**Figura 7** – Neurônio artificial.

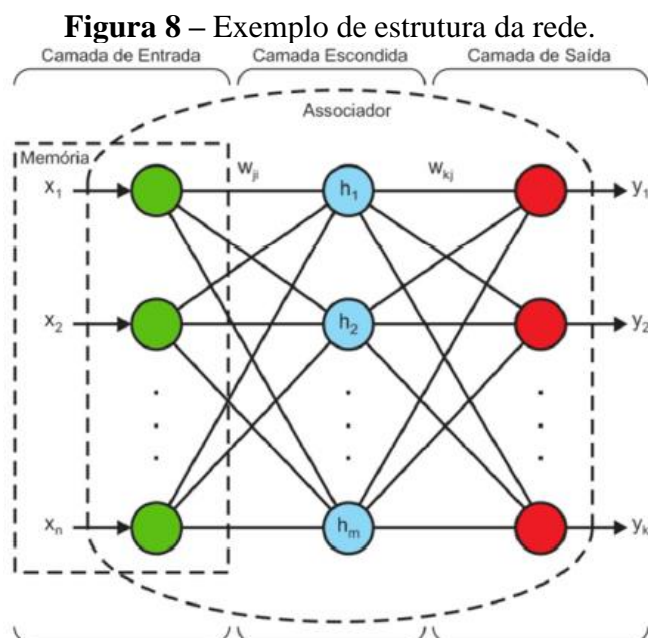


Fonte: Freire (2012).

Segundo Teixeira (2003), o neurônio artificial é constituído, de forma simplificada, de uma função de combinação e uma função de ativação. A função de combinação é responsável por compor os dados de entrada do neurônio. A função de ativação é responsável pela intensidade dos sinais a serem transmitidos das conexões para os neurônios das camadas circunvizinhas. Usualmente, o intervalo de amplitude normalizada de resposta de um neurônio está no intervalo fechado  $[1,0]$  ou  $[-1,1]$  (TEIXEIRA, 2003). Para este fim, pode-se utilizar várias funções de ativação, como por exemplo a função *sigmóide*, a gaussiana e a rampa.

### 2.6.3 Estruturas das RNAs

Segundo Barp (1999), as redes neurais artificiais são constituídas de elementos simples operando em paralelo, que são capazes de armazenar conhecimentos através de experiências. De acordo com Freire (2012), as RNAs podem ser entendidas como conjuntos bem estruturados (Figura 8) de unidades de processamentos, denominadas neurônios artificiais, as quais são interligadas por canais, onde cada canal possui um peso correspondente a um valor numérico, onde essas unidades são dispostas em camadas que são interconectadas entre si. Ainda segundo Freire (2012), RNA pode ser constituída por três camadas distintas: uma camada de entrada, uma camada intermediária e uma camada de saída. Estas camadas são ligadas através dos pesos. Para séries temporais, por exemplo, os dados das camadas de entrada e saída são distribuídos a partir da relação dinâmica que se deseja representar, isto é, a dependência entre valores passados e futuros da série (FREIRE, 2012).



Fonte: Freire (2012).

A Figura 8 é uma representação de uma RNA do tipo *perceptron*. Segundo Freire (2012), existem  $N_e$  neurônios de entrada,  $N_i$  neurônios na camada intermediária e  $N_s$  neurônios na camada de saída. Definir adequadamente o número de camadas intermediárias e o número de neurônios em cada uma destas camadas irá garantir a

convergência (capacidade de uma rede neural aprender todos os padrões do conjunto de treinamento) e a generalização (capacidade de um modelo de aprendizado responder corretamente aos exemplos que lhe são apresentados) (FREIRE, 2012).

#### **2.6.4 Aplicações das RNAs**

As RNAs podem ser utilizadas em diversas áreas do conhecimento, não somente se limitando à engenharia. No entanto, no que se diz respeito à engenharia civil, mais especificamente na área de recursos hídricos, seu uso ganhou espaço principalmente na previsão de vazão através de dados de precipitação.

Tem-se, como exemplo de autores na bibliografia: Teixeira (2003) utilizou as RNAs na modelagem de séries fluviométricas para o semi-árido brasileiro; Sarmento (1996) utilizou a RNA na modelagem de séries hidrológicas na região semi-árida do Nordeste do Brasil e na previsão de vazões médias diárias na bacia do rio Leine (região central da Alemanha), enfatizando a propriedade das redes do tipo *perceptron* como aproximadores universais; Barp (1999) utilizou uma RNA como método de otimização de segunda ordem na modelagem de chuva-vazão nas bacias dos rios Itapetininga, das Almas e Guarapiranga no Estado de São Paulo e na bacia do rio Guaporé no Estado de Mato Grosso; Farias et al. (2012) utilizou a RNA para a detecção de regularidades entre dados mensais de chuva e vazão a partir da aplicação de mapas auto-organizáveis, sugerindo que os mapas gerados são poderosos instrumentos de análise, pois permitem a identificação visual das semelhanças entre as variáveis do modelo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

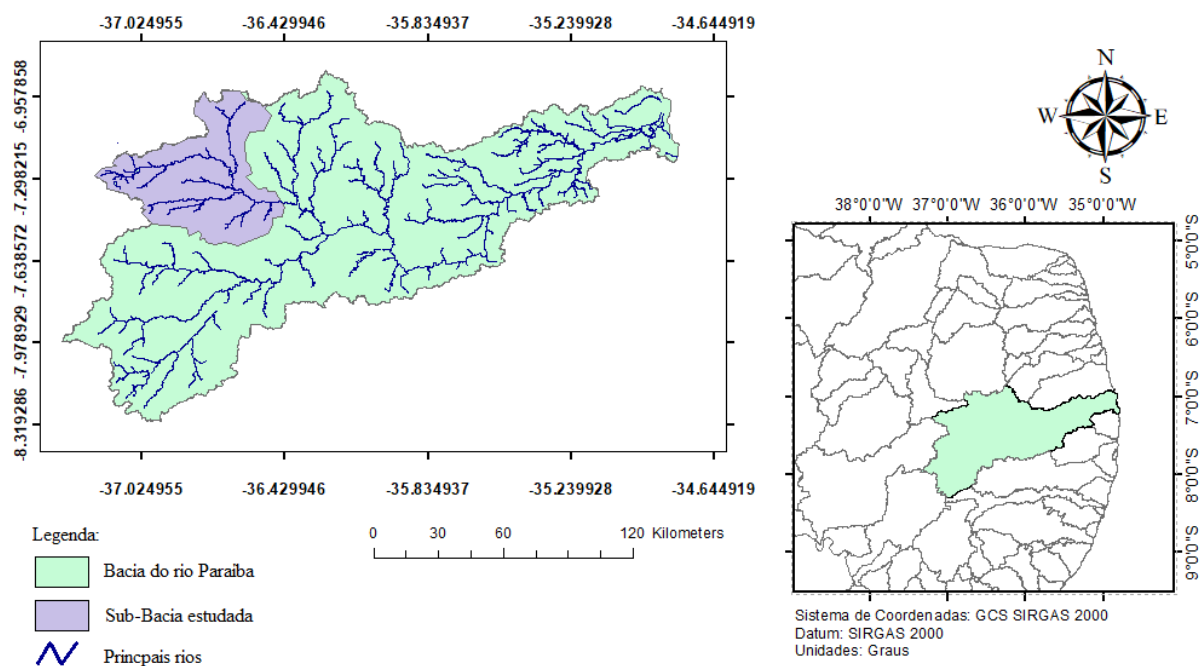
#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

##### 3.1.1 Sub-bacia do rio Taperoá

A sub-bacia do rio Taperoá está localizada dentro da bacia do rio Paraíba, que, segundo a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), a bacia hidrográfica do rio Paraíba é a segunda maior do Estado da Paraíba, que abrange 38% do seu território, abrigando 1.828.178 habitantes, o equivalente à 52% da população total do Estado. Sua área é de 20.071 km<sup>2</sup>, compreendida entre as latitudes 6°51'31" e 8°26'21" Sul e as longitudes 34°48'35" e 37°2'15" Oeste de Greenwich. É composta pela sub-bacia do Rio Taperoá e regiões do Alto Curso do rio Paraíba, Médio Curso do rio Paraíba e Baixo Curso do rio Paraíba. Estão incluídas nesta bacia as cidades de João Pessoa, capital do Estado e Campina Grande, sua segunda maior cidade. O clima da bacia do rio Paraíba, segundo a classificação de Köppen, é o tropical (Aw), com estação seca no inverno.

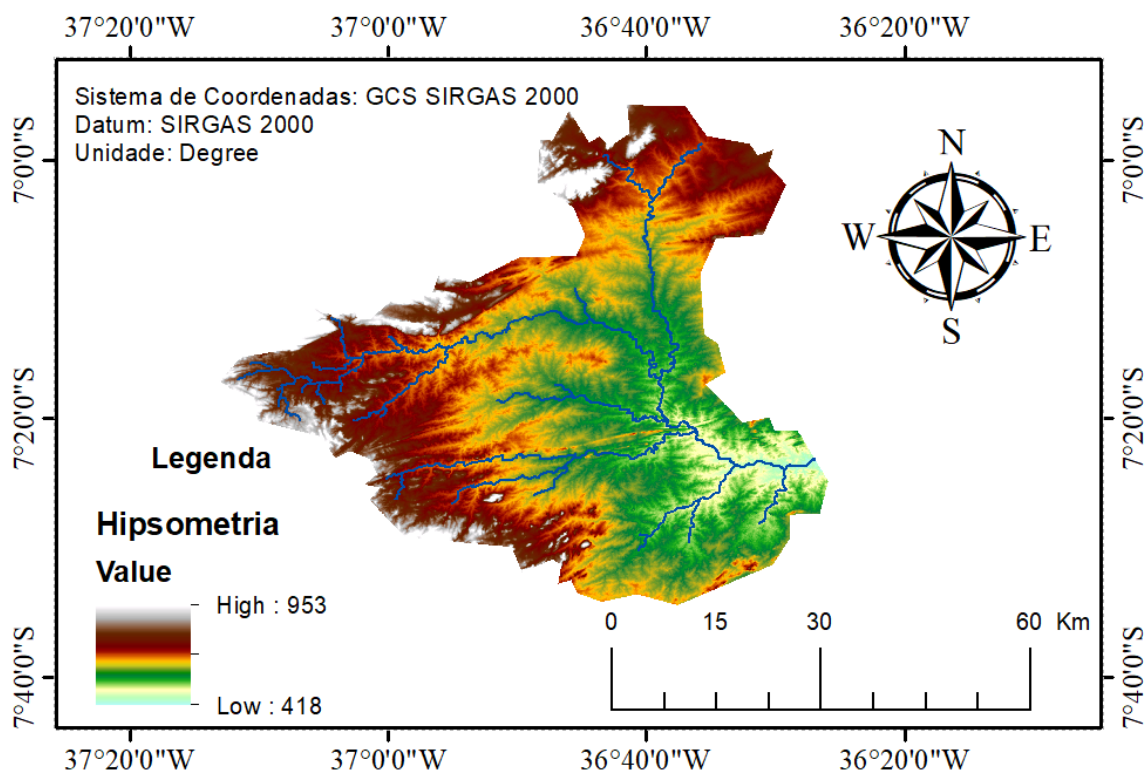
Sendo assim, a primeira área de estudo é uma sub-bacia localizada na sub-bacia do rio Taperoá (Figura 9). A sub-bacia do rio Taperoá é classificada, do ponto de vista climático e de acordo com a classificação de Köppen, em um clima do tipo BSw<sup>h</sup>, com semi-árido quente, tendo uma precipitação pluvial média anual variando de 400 a 600 mm e com estação seca de 8 a 10 meses. Escolheu-se esta sub-bacia como uma das áreas de estudo principalmente pela sua importância, bem como da disponibilidade de dados fluviométricos e pluviométricos. A sub-bacia a ser estudada possui uma área de drenagem de 3.168 km<sup>2</sup> e um perímetro de 337 km. A Figura 10 ilustra a hipsometria da região.

**Figura 9** – Bacia do rio Paraíba e sub-bacia estudada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 10** – Mapa hipsométrico da sub-bacia estudada.



Fonte: Elaborado pelo autor.



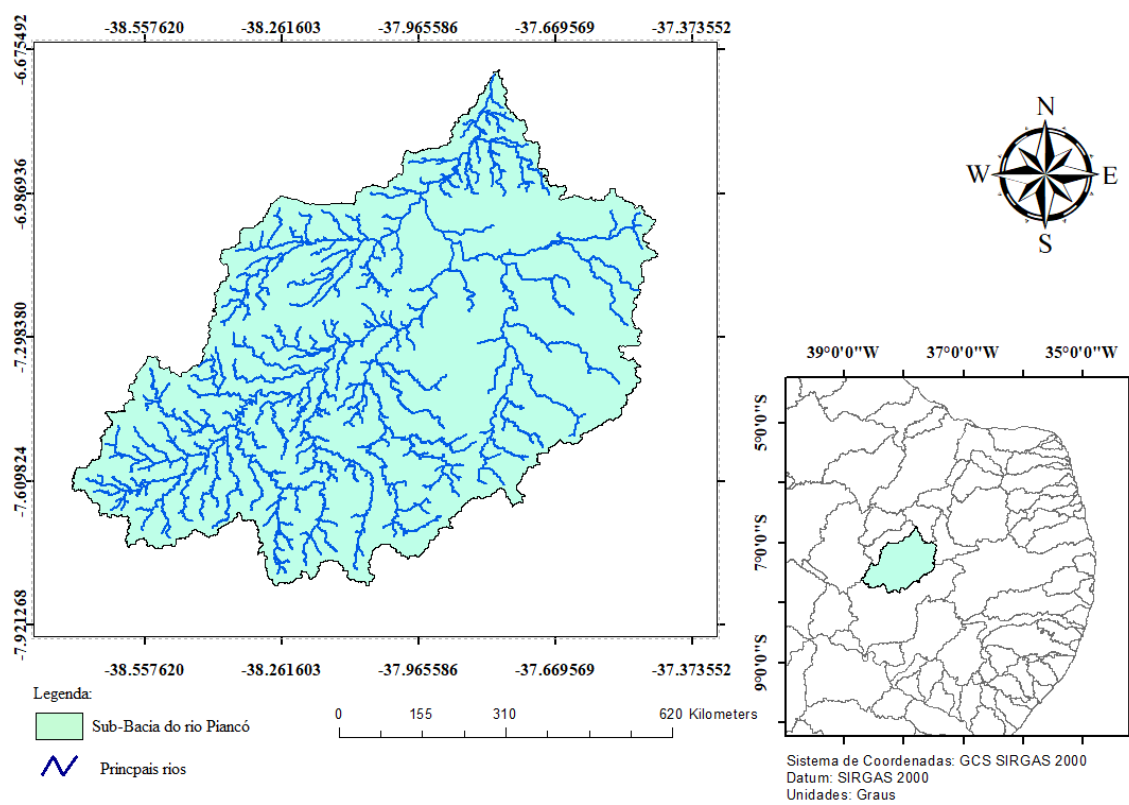
### 3.1.2 Sub-bacia do rio Piancó

A sub-bacia do rio Piancó está localizada na bacia Piranhas-Açu, que de acordo com a AESA, a bacia hidrográfica Piranhas-Açu (Figura 11) é integralmente inserida no clima semiárido nordestino. Possui uma área total de drenagem de 43.681,50 km<sup>2</sup>, onde 60% de sua área se localiza no Estado da Paraíba (aproximadamente 26.183,00 km<sup>2</sup>) e os outros 40% de sua área localizada no Estado do Rio Grande do Norte (aproximadamente 17.498,50 km<sup>2</sup>). Localiza-se entre as latitudes -5°25'17'' e -7°52'14'' e entre as longitudes -36°8'4,6'' e -38°47'32,6''. Contempla 147 municípios, sendo 45 municípios no Estado do Rio Grande do Norte e 102 municípios no Estado da Paraíba. Abrange uma população total de 1.363.802 habitantes, sendo 914.343 habitantes (por volta de 67%) do Estado da Paraíba e 449.459 habitantes (em torno de 33%) do Estado do Rio Grande do Norte. No Estado da Paraíba, a bacia hidrográfica Piranhas-Açu compõe um sistema hidrográfico constituído pelas sub-bacias dos rios do Peixe, Espinharas, Seridó e Piancó.

Segundo a ANA (2018), a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu apresenta chuvas concentradas em alguns meses do ano, apresentando uma alta variabilidade pluviométrica interanual. Seu principal rio é o rio Piranhas-Açu, de domínio federal, uma vez que é interestadual (se localiza no Estado da Paraíba e no Estado do Rio Grande do Norte). Nasce no município de Bonito de Santa Fé (PB) e segue seu curso pelo Estado do Rio Grande do Norte até desaguar no Oceano Atlântico. É uma bacia de grande importância para a região, pois é nela que estão localizados a barragem Armando Ribeiro Gonçalves e o famoso sistema de reservatórios Coremas Mãe D'água.

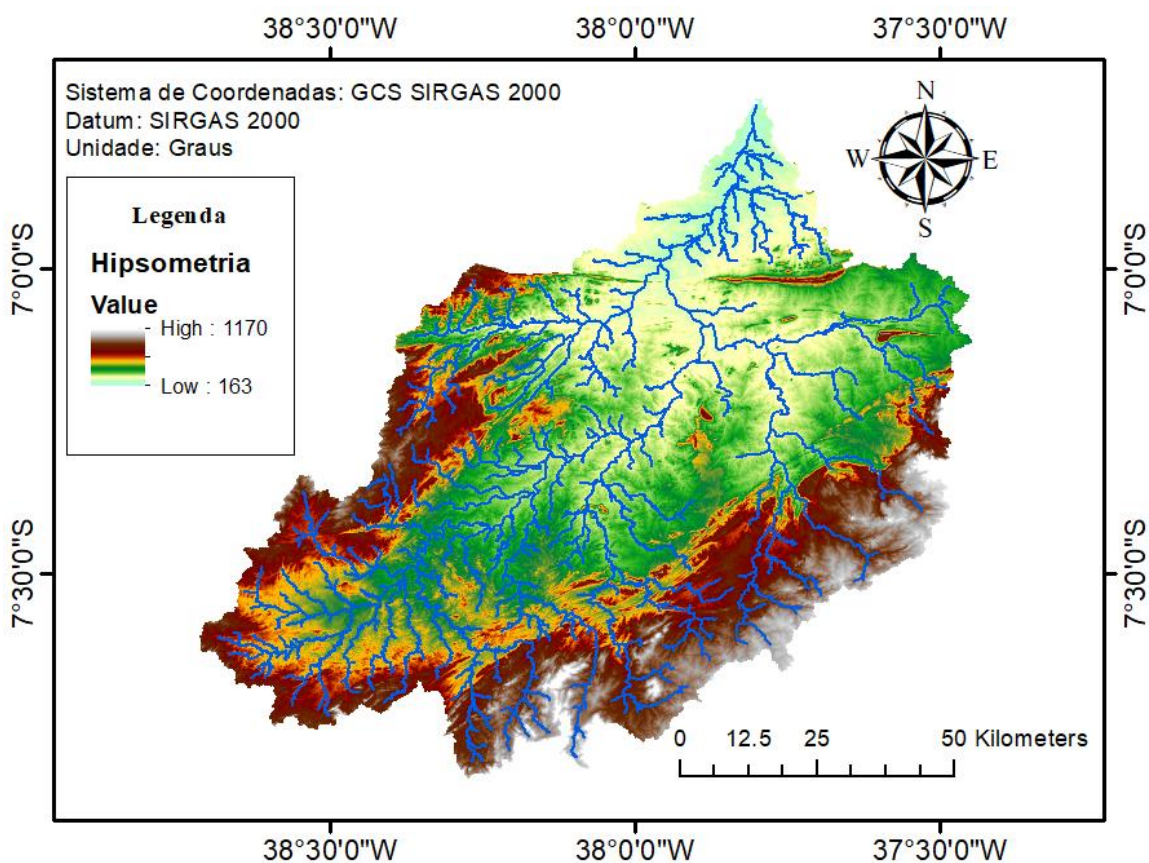
De acordo com Moura (2007), a bacia do rio Piranhas-Açu está localizada numa região sobre influência marcante da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O deslocamento da ZCIT para o hemisfério sul é o um dos principais fatores da ocorrência de chuvas nos meses de fevereiro, março e abril, no Nordeste, tendo como influência os fenômenos climáticos El Niño e La Niña. De acordo com Strang (1972, *apud* MOURA, 2007), a bacia do rio Piranhas-Açu tem como característica o seu máximo anual de precipitação ocorrendo no mês de março ou abril, uma vez que mais de 60% do total precipitado anual ocorre entre os meses de fevereiro e abril.



**Figura 12 – Sub-bacia do rio Piancó.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 13** – Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Piancó.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 SÉRIES HISTÓRICAS E POSTOS

### 3.2.1 Sub-bacia do rio Taperoá

Para o estudo desta sub-bacia, foram utilizados 12 postos pluviométricos localizados dentro ou próximos à bacia, conforme representado na Tabela 2. Para este estudo, se trabalhou com dados de precipitações mensais. A série histórica de dados de precipitação referentes ao estudo da sub-bacia do rio Taperoá foram adquiridos pelo portal da ANA, através da plataforma digital *Hidroweb* e parte destes dados (a partir de 01/01/1994) foram disponibilizados pela AESA. A série histórica de dados de vazão mensal referente ao estudo da sub-bacia do rio Taperoá, utilizada para a calibração e validação dos modelos foram adquiridos pelo portal da ANA, através da plataforma digital *Hidroweb*. Buscou-se, para este estudo, trabalhar com séries históricas de pelo menos 30 anos de dados. Sendo assim, o período da série histórica pluviométrica e

fluviométrica está compreendido entre 01/05/1970 à 01/12/2014, não sendo um intervalo de tempo ininterrupto, totalizando 437 meses ou 36 anos e 5 meses de dados.

**Tabela 2** - Postos utilizados para o estudo da sub-bacia do rio Taperoá.

Posto	Código	Nome	Latitude	Longitude	Tipo
1	636042	Santa Luzia	-6.8667	-36.933	Pluviométrico
2	736002	Taperoá	-7.2	-36.833	Pluviométrico
3	736005	Santo André	-7.2167	-36.633	Pluviométrico
4	736009	Serra Branca	-7.4833	-36.667	Pluviométrico
5	736010	Salgadinho	-7.1	-36.85	Pluviométrico
6	736011	São José dos Cordeiros	-7.3833	-36.817	Pluviométrico
7	736012	São João do Cariri	-7.4	-36.533	Pluviométrico
8	736015	Juazeirinho	-7.0667	-36.583	Pluviométrico
9	736016	Gurjão	-7.2667	-36.483	Pluviométrico
10	736026	Sumé	-7.5167	-36.967	Pluviométrico
11	737010	Passagem	-7.1333	-37.067	Pluviométrico
12	737018	Desterro	-7.2833	-37.1	Pluviométrico
13	38850000	Poço de Pedras	-7.3981	-36.434	Fluviométrico

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado da ANA (2021).

Para a série histórica pluviométrica, utilizou-se apenas os valores de precipitação dos meses onde pelo menos estavam presentes os dados de 9 dos 12 postos pluviométricos utilizados.

### 3.2.2 Sub-bacia do rio Piancó

Já para o estudo desta sub-bacia, utilizou-se 8 postos pluviométricos localizados dentro da sub-bacia do rio Piancó, conforme representado na Tabela 3. Assim como no estudo da sub-bacia do rio Taperoá, também foram utilizados dados mensais de precipitação obtidos no portal da ANA, através da plataforma digital *Hidroweb* e os dados de precipitação a partir de 01/01/1994 foram disponibilizados pela AESA. A série histórica de dados de vazão referente ao estudo da sub-bacia do rio Piancó também foi adquirida através do portal da ANA, por meio da plataforma digital *Hidroweb*.

**Tabela 3** – Postos utilizados para o estudo da sub-bacia do rio Piancó.

Posto	Código	Nome	Latitude	Longitude	Tipo
1	737006	Piancó	-7.2142	-37.9258	Pluviométrico
2	738012	Boa Ventura	-7.4206	-38.2178	Pluviométrico
3	738013	Princesa Isabel	-7.7333	-38.0167	Pluviométrico
4	738014	Nova Olinda	-7.4667	-38.05	Pluviométrico
5	738015	Manaíra	-7.7069	-38.1525	Pluviométrico
6	738017	Itaporanga	-7.3017	-38.135	Pluviométrico
7	738018	Ibiara	-7.4833	-38.4167	Pluviométrico
8	738020	Conceição	-7.56	-38.5019	Pluviométrico
9	37340000	Piancó	-7.2044	-37.9281	Fluviométrico

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado da ANA (2021).

Assim como no caso anterior, buscou-se trabalhar com séries históricas de pelo menos 30 anos de duração. Portanto, o período da série histórica pluviométrica e fluviométrica está compreendido entre 01/05/1969 à 01/12/2014, também não possuindo um intervalo de tempo ininterrupto, totalizando 454 meses ou 37 anos e 10 meses de dados. Para a série histórica pluviométrica, utilizou-se apenas os dados de precipitação dos meses onde pelo menos estavam presentes os valores de 6 dos 8 postos pluviométricos utilizados.

### 3.3 METODOLOGIA

#### 3.3.1 Tratamento dos dados

Para trabalhar com os dados de precipitação e vazão, utilizou-se o software *Microsoft Excel*, em sua versão de 2016. Para correção de falhas e anomalias, utilizou-se o método do vetor regional, apresentado no tópico 2.4.1. Em posse dos dados devidamente tratados, calculou-se os coeficientes de Thiessen para posterior cálculo da precipitação média, apresentado no tópico a seguir.

#### 3.3.2 Cálculo dos coeficientes de Thiessen

A metodologia utilizada para o presente estudo foi proposta por Sarmento e Martins (1992) e apresentada por Sarmento (2020). Para o cálculo dos coeficientes de Thiessen, utilizou-se um aplicativo desenvolvido através do software *Microsoft Visual*

*Studio*, escrito na linguagem de código *Visual Basic for Application* (VBA), baseado nos algoritmos e códigos apresentados por Sarmento (2020). A Figura 14 ilustra o *layout* do aplicativo.

**Figura 14** – Aplicativo utilizado no cálculo dos coeficientes de Thiessen.

The screenshot shows a VBA application window titled "Form1". It contains two main sections. The first section, "Dados sobre a bacia:", has three input fields: "Área de estudo:", "Diretório:", and "Número de vértices:". To the right of the "Número de vértices:" field is a button labeled "Lê Poligonal". The second section, "Cálculo de coeficientes:", has a "Selecionados:" input field followed by the text "Postos". Below this is a large empty rectangular area. To the right of this area are two buttons: "Seleciona Todos" and "Exclui Todos". Below these buttons are two rows of input fields. The first row has "Latitude:" followed by two input fields labeled "Graus:" and "Minutos". The second row has "Longitude:" followed by two input fields labeled "Graus:" and "Minutos". At the bottom left is a "Coeficiente(%):" input field, and at the bottom right is a "Calcula Coeficientes" button.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de entrada são o nome da bacia, a quantidade de vértices da bacia, as coordenadas dos vértices da bacia em graus decimais, a quantidade de postos pluviométricos e as coordenadas dos postos pluviométricos em graus decimais. Com isso, ativa-se o botão “Lê Poligonal”, que traça a poligonal da bacia no retângulo ao lado, conforme ilustra a Figura 15.

**Figura 15** – Poligonal da bacia traçada.

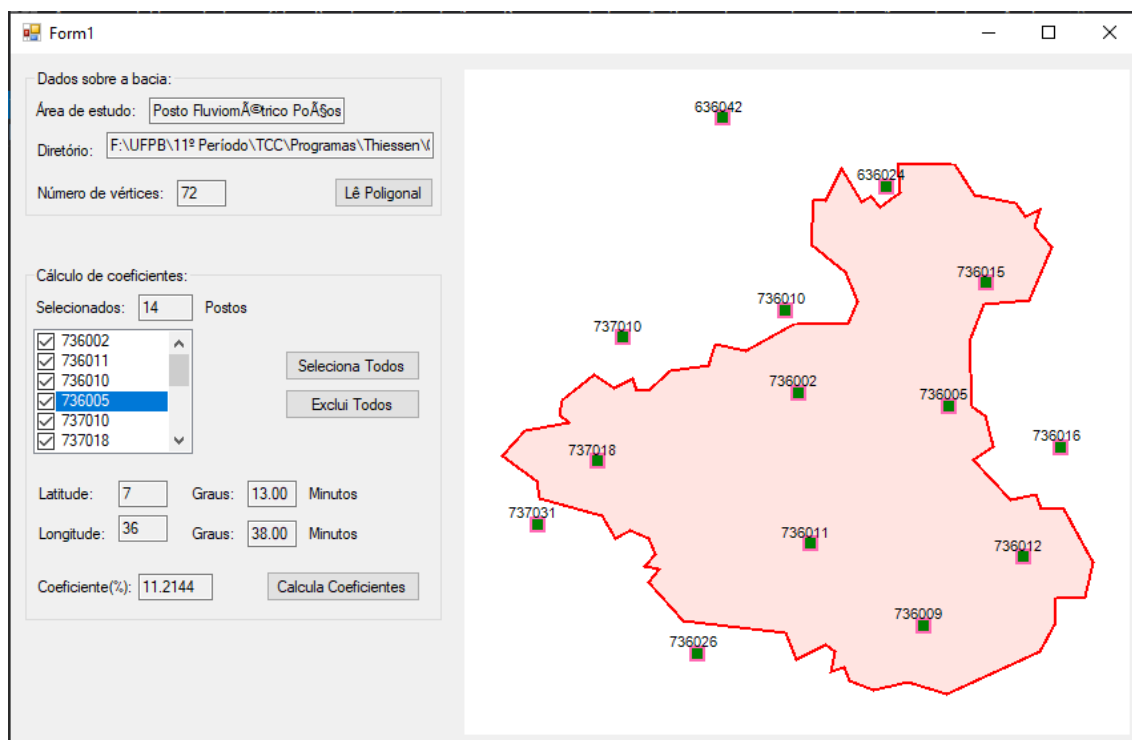
The image shows a software window titled "Form1" with a light gray background. On the left side, there are several input fields and buttons. The top section, "Dados sobre a bacia:", includes a text box for "Área de estudo:" containing "Posto Fluviométrico Poções", a text box for "Diretório:" containing "F:\UFPB\11º Período\TCC\Programas\Thiessen\...", and a text box for "Número de vértices:" containing "72". A blue button labeled "Lê Poligonal" is positioned to the right of the "Número de vértices:" field. Below this is the "Cálculo de coeficientes:" section, which features a "Selecionados:" field with the value "0" and the label "Postos". A list of six checkboxes with corresponding IDs (736002, 736011, 736010, 736005, 737010, 737018) is shown, with a vertical scrollbar to its right. To the right of the list are two buttons: "Seleciona Todos" and "Exclui Todos". Below the list are input fields for "Latitude:" and "Longitude:", each followed by "Graus:" and "Minutos" fields. At the bottom of this section is a "Coeficiente(%):" field and a "Calcula Coeficientes" button. The right side of the window is a large white area displaying a red-outlined polygon representing a watershed basin.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o botão “Lê Poligonal” também lê e armazena os dados referentes aos postos pluviométricos. Sendo assim, pode-se selecionar o posto que for de interesse e calcular seu respectivo coeficiente de Thiessen, conforme é apresentado na Figura 16.



**Figura 16** – Postos pluviométricos e o cálculo do coeficiente de Thiessen.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.3 Modelo SMAP

O modelo do SMAP utilizado para o presente trabalho foi em sua versão mensal, apresentada no tópico 2.5.2.1. O modelo SMAP, nesta versão, tem como dados de entrada a precipitação mensal e evapotranspiração real mensal. Buscou-se utilizar aproximadamente 70% dos dados para calibração e 30% para validação. Desta forma, para calibração da sub-bacia do rio Taperoá, utilizou-se os dados de precipitação média mensal e vazão mensal referentes ao período de 01/05/1970 à 01/12/2004 (330 meses). Para validação da sub-bacia do rio Taperoá, utilizou-se os dados de precipitação média mensal e vazão mensal referentes ao período de 01/01/2005 a 01/12/2014 (107 meses). Já para a calibração da sub-bacia do rio Piancó, utilizou-se os dados de precipitação média mensal e vazão mensal referentes ao período de 01/05/1969 à 01/12/2004 (345 meses), enquanto que para a validação os dados de precipitação média mensal e vazão mensal são referentes ao período de 01/01/2005 a 01/01/2014 (109 meses). Os valores de evapotranspiração mensal foram concedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia

(INMET). Para fins de cálculo, o modelo foi reproduzido com auxílio do *software Microsoft Excel*.

Os valores dos parâmetros teor de umidade inicial (Tuin) e constante de recessão (Kkt) foram estabelecidos com base nas características das bacias hidrográficas, respeitando os limites inerentes ao modelo, conforme apresentado nas Tabela 4 e 5. Os valores dos parâmetros calibráveis capacidade de saturação do solo (Sat), parâmetro de escoamento superficial (Pes) e coeficiente de recarga (Crec) foram calibrados através da função *solver* contida no *software Microsoft Excel*, através do Método de Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), que também foi utilizado por Pereira *et al.* (2016) no desenvolvimento de um modelo chuva-vazão via *Tank Model* e calibração automática, apresentando bons resultados.

**Tabela 4** – Parâmetros utilizados para a sub-bacia do rio Taperoá.

Parâmetro	Valor
Kkt (dias)	0.8909
Tuin (%)	30%

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 5** – Parâmetros utilizados para a sub-bacia do rio Piancó.

Parâmetro	Valor
Kkt (dias)	0.8909
Tuin (%)	20%

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.4 Modelagem das Redes Neurais Artificiais

Para o presente trabalho, as redes utilizadas para ambas as áreas de estudo são do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP). A atualização dos pesos sinápticos foi feita por meio de um algoritmo de aprendizado *Levenberg-Marquardt*, que utiliza uma aproximação do método de Newton. Este algoritmo de aprendizado foi utilizado por Freire (2012), apresentando bons resultados. Hagan e Menhaj (1994) descrevem detalhadamente este algoritmo de aprendizado. As RNAs são do tipo *feedforward* ou alimentada adiante, isto é, os dados são sempre propagados em uma única direção, nunca voltando para camadas anteriores.

De acordo com Freire (2012), o algoritmo *Levenberg-Marquardt* é uma variação do *Backpropagation*, sendo o algoritmo de aprendizado do tipo supervisionado. Neste

tipo de aprendizado supervisionado, os pesos sinápticos entre os neurônios são ajustados por meio das iterações (ou *epochs*) com o objetivo de adequar uma série de dados de entrada a outra série de respostas conhecidas (LOURENÇO, 2012). Os dados de entrada e saída foram escalonados, isto é, fez-se a normalização dos valores de modo que sua média seja igual a zero e tenham desvio padrão unitário (BEALE *et al.*, 2010).

Todas as redes foram treinadas por meio do software *MatLab*, em sua versão 2020a. O *MatLab* utiliza como recurso padrão para o encerramento do treinamento das redes o *early stopping* (BEALE *et al.*, 2010). Segundo Beale *et al.* (2010), os dados são automaticamente divididos em treinamento, validação e teste. Ainda segundo os autores, o erro no conjunto de validação é monitorado durante o treinamento, e o treinamento termina quando os erros da validação crescem por mais do que o número de iterações pré-estabelecido, também chamado de *validation-check*. Para este trabalho, o número de iterações utilizados como referência para o encerramento do treinamento foram de 6 iterações seguidas. Os dados foram divididos em 70% para o treinamento, 15% para validação e 15% para teste. Vale ressaltar que para cada treinamento da rede, os dados de treinamento, validação e teste são aleatórios, isto é, os valores utilizados nas etapas de treinamento, validação e teste podem ser quaisquer valores da série histórica.

Para facilitar o treinamento, elaborou-se um programa na linguagem de código *MatLab*, que tem como principal objetivo aumentar a eficiência do treinamento, isto é, treinar um número maior de redes num intervalo menor de tempo.

Para a sub-bacia do rio Taperoá, utilizou-se para calibração os dados de precipitação mensais dos 12 postos pluviométricos e os dados mensais de vazão do período de 01/01/1970 à 01/12/2004, totalizando 330 valores por posto. Sendo assim, os valores de entrada correspondem à uma matriz de 330x12, enquanto que os valores de saída correspondem à uma matriz de 330x1. Para validação, utilizou-se os dados mensais de precipitação dos 12 postos pluviométricos e os dados mensais de vazão do período entre 01/01/2005 à 01/12/2014, totalizando 107 valores por posto. Logo, os valores de entrada correspondem à uma matriz de 107x12, enquanto que os valores de saída correspondem à uma matriz de 107x1.

Para a sub-bacia do rio Piancó, utilizou-se para calibração os dados de precipitação mensais dos 8 postos pluviométricos e os dados mensais de vazão do período de 01/05/1969 à 01/12/2004, totalizando 345 valores por posto. Dessa forma, os valores

de entrada correspondem à uma matriz de 345x8, enquanto que os dados de saída correspondem à uma matriz de 345x1. Para validação, utilizou-se os dados de precipitação mensais dos 8 postos pluviométricos e os dados mensais de vazão do período entre 01/01/2005 à 01/12/2014, totalizando 109 valores por posto. Sendo assim, para validação, os valores de entrada correspondem à uma matriz de 109x8, enquanto que os valores de saída correspondem à uma matriz de 109x1.

### 3.4 ÍNDICES DE DESEMPENHO

Para a análise de desempenho, utilizou-se os seguintes índices de desempenho: a) o coeficiente de determinação ( $R^2$ ); b) o coeficiente de Nash-Sutcliffe e c) o erro *Root Mean Square Error* (RMSE).

#### 3.4.1 Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação representa a variabilidade de um número de previsões ao redor do seu valor verdadeiro. Em outras palavras, o coeficiente de determinação indica se o modelo foi ou não capaz de explicar satisfatoriamente os dados observados. Seu valor está sempre entre 0 e 1, sendo  $R^2 = 1$  o ajuste perfeito.

$$R^2 = \frac{\sum((Q_o - \bar{Q})(Q_c - \bar{Q}))^2}{\sum(Q_o - \bar{Q})^2 \sum(Q_c - \bar{Q})^2} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde  $Q_o$  é a vazão observada;  $\bar{Q}$  é a vazão média e  $Q_c$  é a vazão calculada.

#### 3.4.2 Coeficiente de Nash-Stucliffe

O coeficiente de *Nash-Stucliffe* é largamente utilizado como critério estatístico para avaliar a precisão de modelos hidrológicos. De maneira simplificada, este coeficiente indica se o modelo conseguiu acompanhar os picos de vazão de forma satisfatória ou não. Seu valor pode variar de  $-\infty$  até 1, sendo  $Nash = 1$  o ajuste perfeito.

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_c)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q})^2} \quad (\text{Eq. 24})$$

### 3.4.3 Erro médio padrão

O erro médio padrão (RMS) é dado pela raiz quadrada do *Mean Square Error* (MSE), sendo o ajuste perfeito o valor de  $\text{RMS} = 0$ . Seu valor é interpretado como uma medida do desvio médio entre os valores observados e calculados.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum(Q_c - Q_o)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 25})$$

onde  $n$  é o número de dados.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 SMAP

#### 4.1.1 Sub-bacia do rio Taperoá

A Tabela 6 mostra os índices de desempenho obtidos a partir da calibração do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá.

**Tabela 6** – Índices de desempenho do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá.

Índice	Calibração	Validação	Período Total
R <sup>2</sup>	0.77	0.51	0.72
Nash	0.74	0.16	0.67
RMSE	7.91	9.81	8.40

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 ilustra as séries históricas de precipitação e vazão, bem como a vazão calculada através do modelo SMAP. Os parâmetros calibráveis encontrados por meio do Método de Programação não-linear do GRG, através da função *solver* do *Microsoft Excel* podem ser observados na Tabela 7. Os coeficientes de correlação podem ser visualizados na Figura 18.

**Tabela 7** – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá.

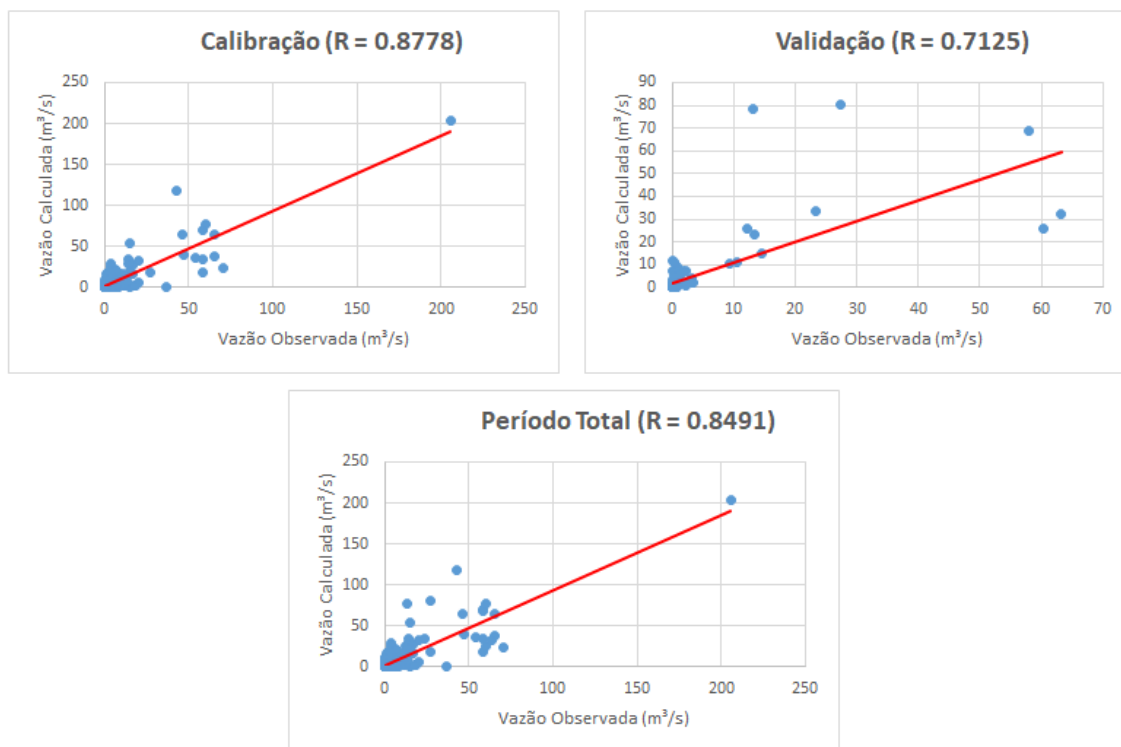
Parâmetro	Valor
Sat (mm)	508.10
Pes	4.39
Crec	0.02

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 17** - Séries de precipitação, de vazão calculada e observada a nível mensal para a sub-bacia do rio Taperoá utilizando o SMAP.



**Figura 18** – Valores de vazão calculada e observada e os coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação e período total, para a sub-bacia do rio Taperoá utilizando o SMAP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.2 Sub-bacia do rio Piancó

A Tabela 8 mostra os índices de desempenho obtidos a partir da calibração do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Piancó.

**Tabela 8** - Índices de desempenho do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Piancó.

Índice	Calibração	Validação	Período Total
R <sup>2</sup>	0.47	0.26	0.42
Nash	0.43	0.24	0.40
RMSE	22.26	25.92	27.39

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros calibráveis encontrados por meio do Método de Programação não-linear do GRG, através da função *solver* do *Microsoft Excel* podem ser observados na Tabela 9. A Figura 19 ilustra as séries históricas de precipitação e vazão, bem como a



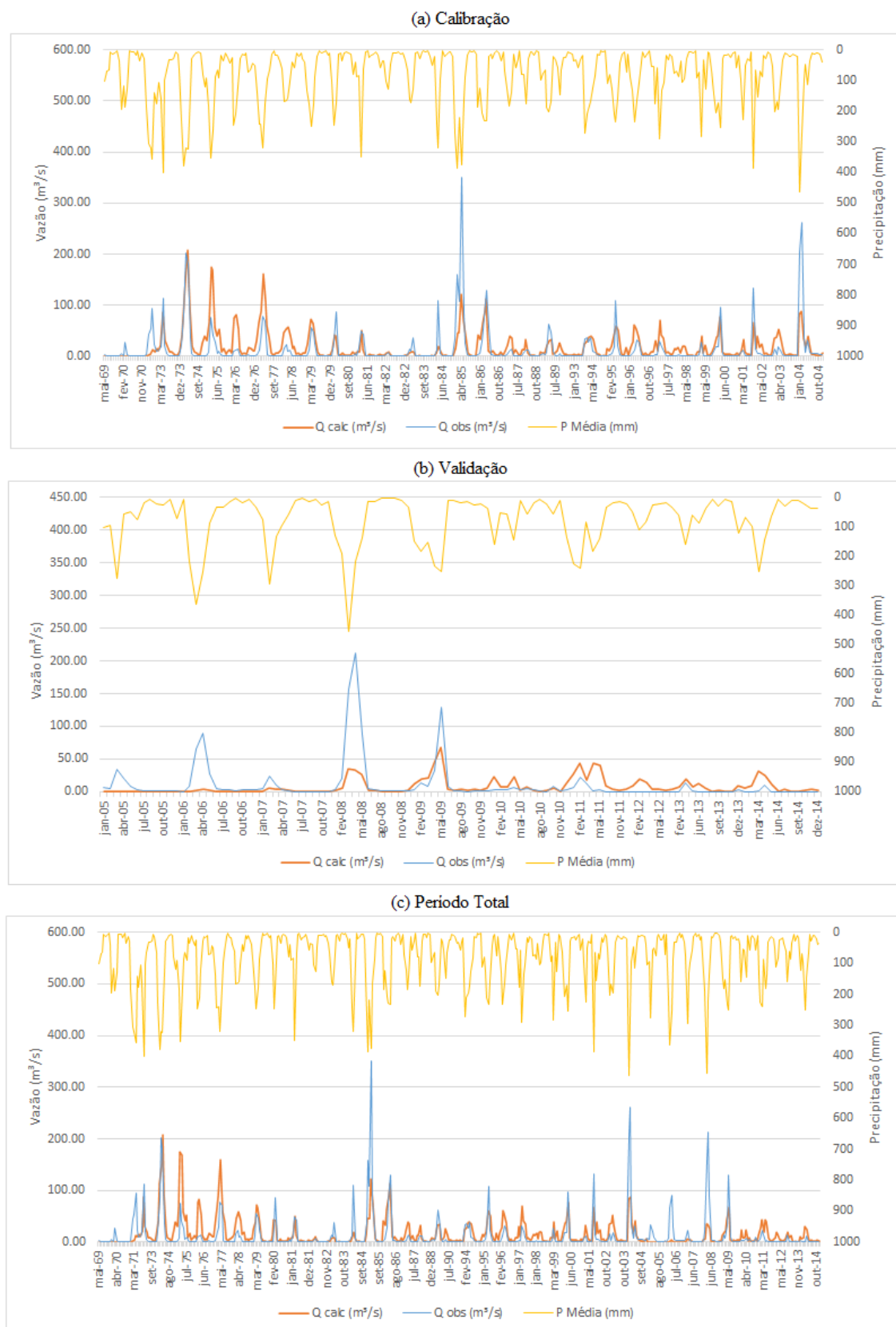
vazão calculada através do modelo SMAP. Os coeficientes de correlação podem ser visualizados na Figura 20.

**Tabela 9** - Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Piancó.

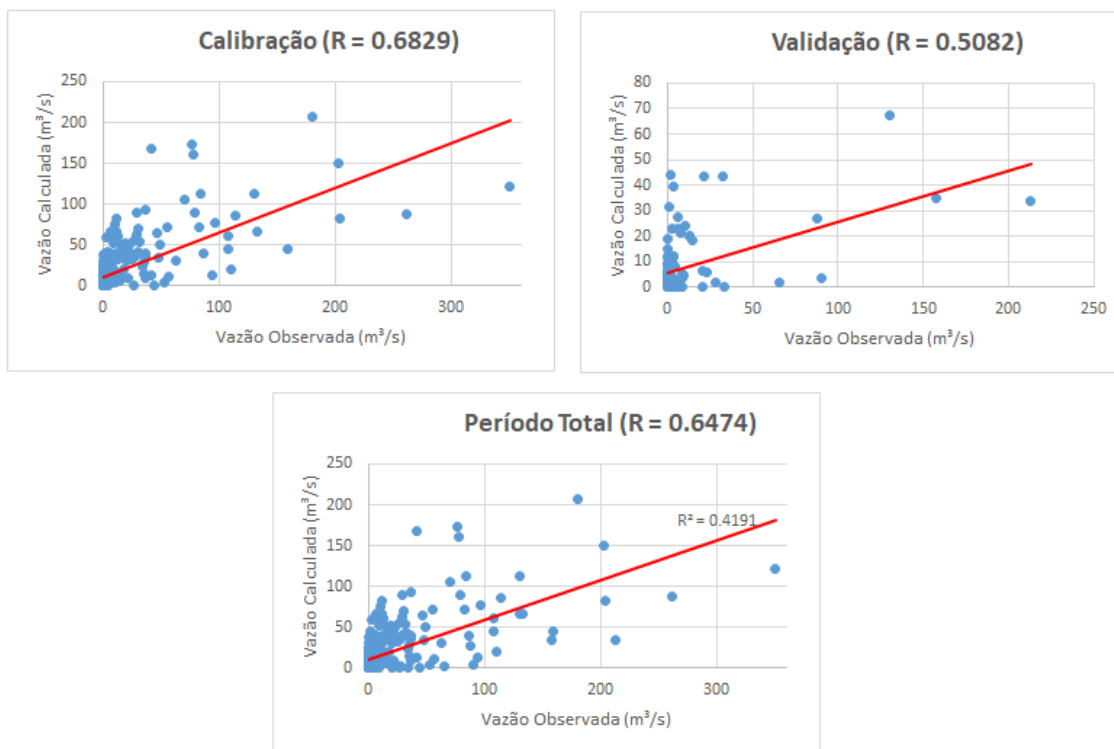
Parâmetro	Valor
Sat (mm)	3593.33
Pes	6.72
Crec	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 19** - Séries de precipitação, de vazão observada e calculada a nível mensal para a sub-bacia do rio Piancó utilizando o SMAP.



**Figura 20** - Valores de vazão calculada e observada e os coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação e período total, para a sub-bacia do rio Piancó utilizando o SMAP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

### 4.2.1 Sub-bacia do rio Taperoá

Para esta sub-bacia, realizou-se entre 100 a 150 treinamentos, variando-se tanto o número de camadas intermediárias quanto o número de neurônio das mesmas, chegando-se à uma RNA formada por uma camada de entrada, uma camada intermediária e uma camada de saída, com 30 neurônios na camada intermediária. Para fins didáticos, esta RNA será denominada RNA #1. Os valores dos índices de desempenho referentes ao treinamento da RNA #1 podem ser observados na Tabela 10.

**Tabela 10** – Índices de desempenho referentes à modelagem da sub-bacia do rio Taperoá por meio da RNA #1.

Índice	Calibração	Teste	Período Total
R <sup>2</sup>	0.95	0.77	0.92
Nash	0.90	0.49	0.84
RMSE	5.00	7.63	5.76

Fonte: Elaborado pelo autor.

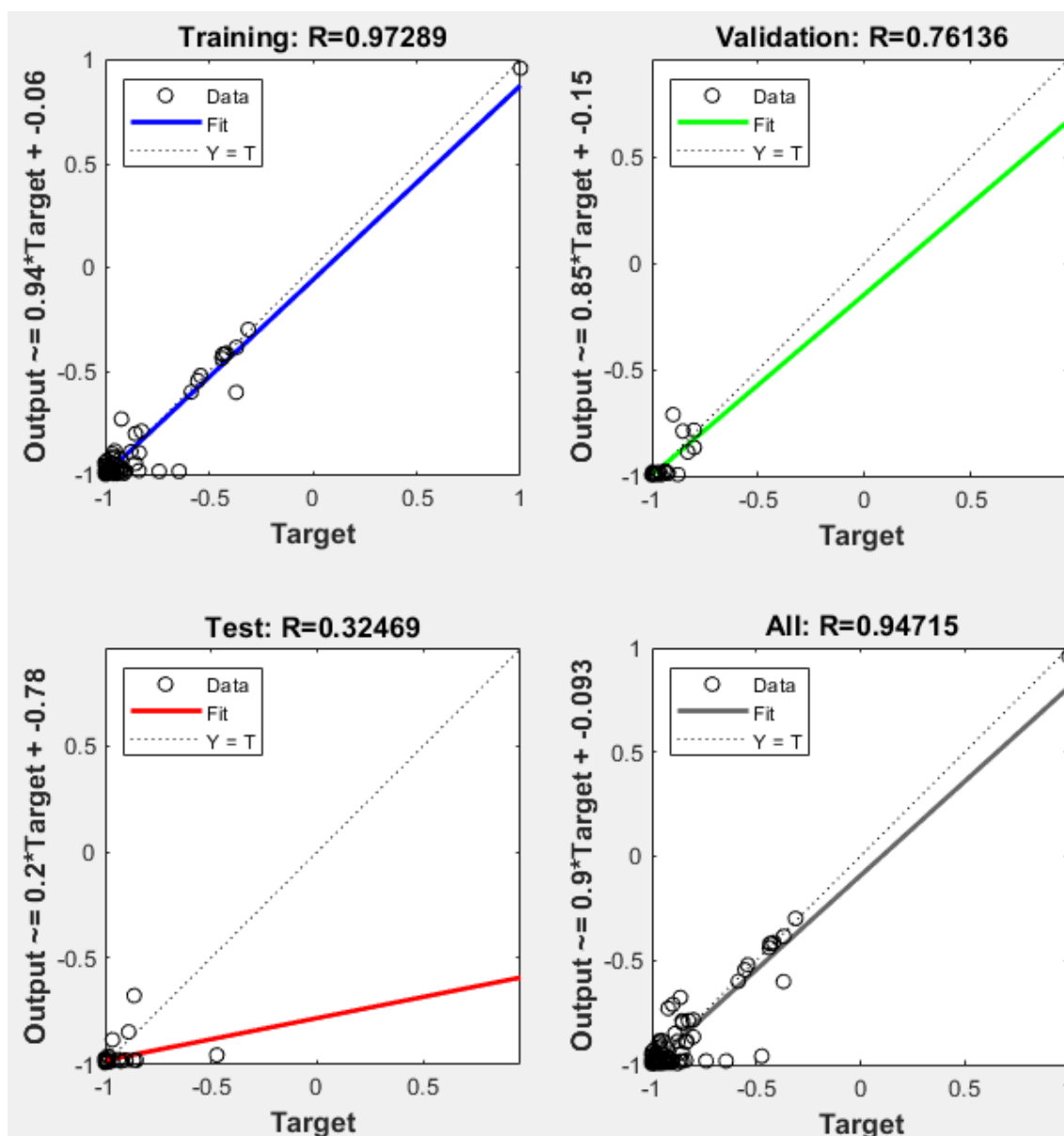
Na Figura 21 podem ser visualizadas as séries das vazões observadas e previstas referentes ao período de calibração e validação da rede, bem como os valores de precipitação para os respectivos períodos. Os coeficientes de regressão linear fornecidos pelo *MatLab* referentes ao treinamento da RNA #1 para a sub-bacia do rio Taperoá (Figura 22) representam a relação linear entre os resultados de vazão observada e calculada.

**Figura 21** – Séries de vazões calculadas e observadas e de precipitação para os períodos de calibração, teste e para o período total referentes à RNA #1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 22** – Valores das vazões observadas e calculadas e regressão linear para os períodos de treinamento, validação, teste e todo o período para a RNA #1.



Fonte: Adaptado do *MatLab*.

#### 4.2.2 Sub-bacia do rio Piancó

Para esta sub-bacia, realizou-se entre 150 a 200 treinamentos, variando-se o número de camadas intermediárias, bem como o número de neurônios das mesmas. Chegou-se, portanto, à uma RNA de uma camada de entrada, três camadas intermediárias e uma camada de saída. As duas primeiras camadas intermediária possuem 28 neurônios, enquanto que a terceira camada intermediária apresenta 32 neurônios. Para fins didáticos,

esta RNA será denominada de RNA #2. Os índices de desempenho referentes ao treinamento da RNA #2 podem ser vistos na Tabela 11.

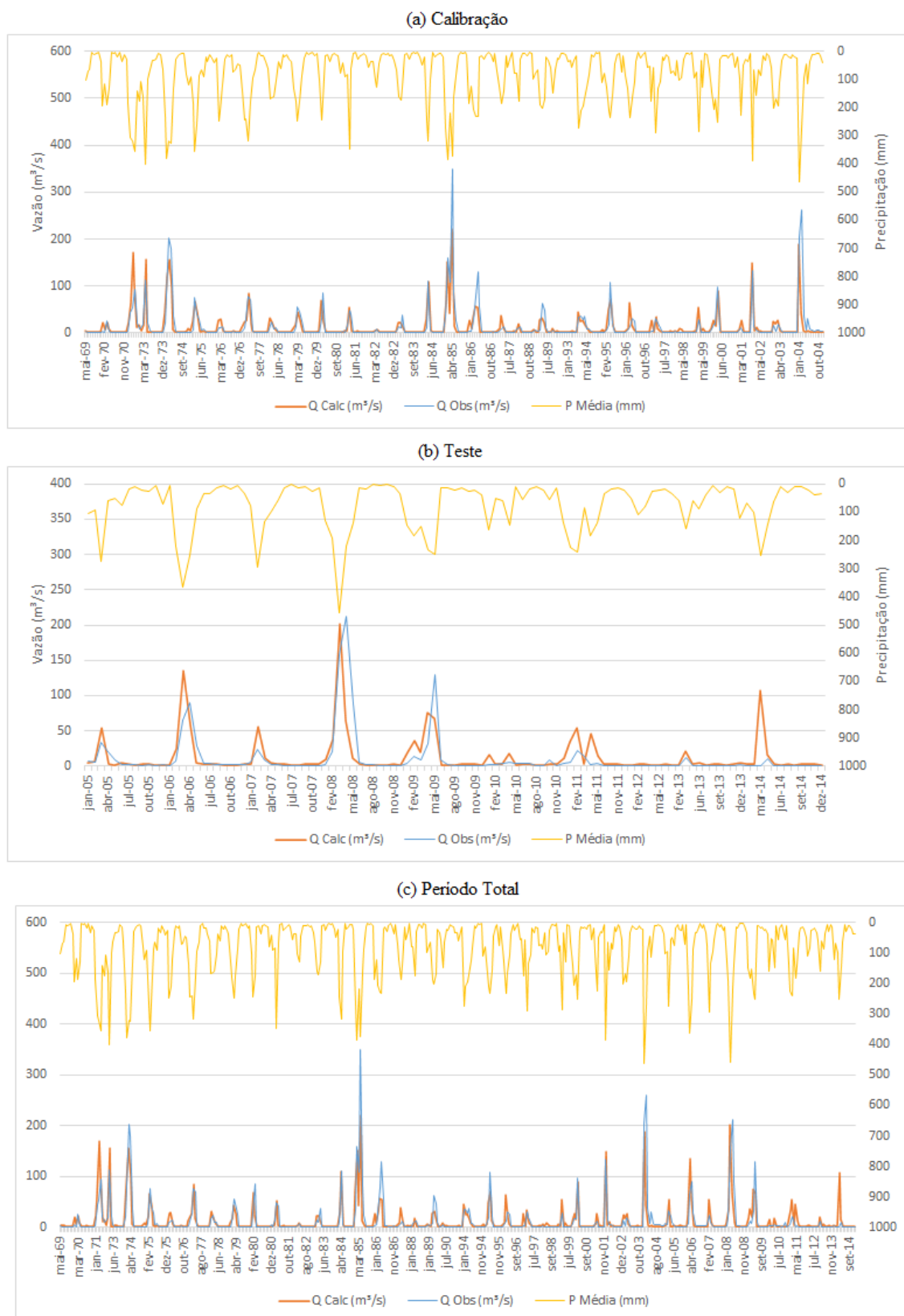
**Tabela 11** - Índices de desempenho referentes à modelagem da sub-bacia do rio Piancó por meio da RNA #2.

Índice	Calibração	Teste	Período Total
R <sup>2</sup>	0.83	0.68	0.80
Nash	0.69	0.39	0.64
RMSE	20.38	23.88	21.27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 23 podem ser observados as séries das vazões observadas e calculadas referentes ao período de calibração e validação da rede, bem como os valores de precipitação para os respectivos períodos. Os coeficientes de regressão linear fornecidos pelo *MatLab* referentes ao treinamento da RNA #2 para a sub-bacia do rio Taperoá (Figura 24) representam a relação linear entre os resultados de vazão observada e calculada.

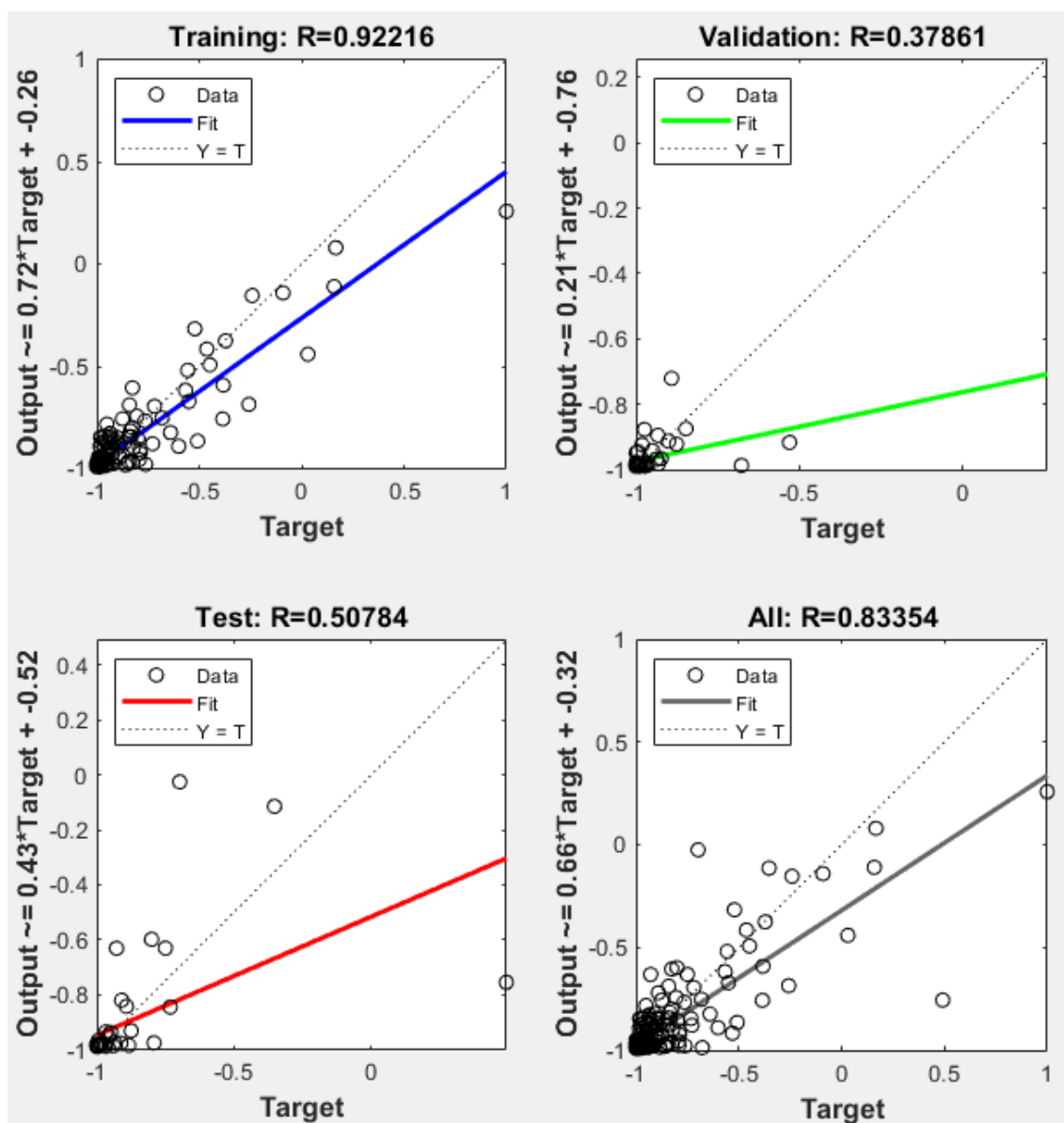
**Figura 23** - Séries de vazões calculadas e observadas e de precipitação para os períodos de calibração, teste e para o período total referentes à RNA #2.



Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 24** – Valores das vazões observadas e calculadas e regressão linear para os períodos de treinamento, validação, teste e todo o período para a RNA #2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação à modelagem obtida através do modelo SMAP para a sub-bacia do rio Taperoá, é possível observar que (Tabela 6 e 7 e Figuras 17a, 17b e 17c) o modelo conseguiu acompanhar de forma competente na etapa da calibração os picos e vales ao longo de toda a série, com um valor satisfatório do coeficiente de Nash, que foi de 0.74. Por outro lado, em termos do coeficiente de Nash, o modelo não apresentou um bom

resultado durante a fase de validação (coeficiente de Nash = 0.16). Apesar disso, nota-se que o coeficiente de correlação na etapa de validação (0.71) é de certa forma satisfatório, enquanto que na etapa de calibração foi de 0.88. Na Figura 17b pode-se perceber que há uma correlação linear entre os valores de vazão prevista e observada, indicando que o modelo, durante a validação, responde de forma razoável aos dados de entrada.

Ainda em relação à sub-bacia do rio Taperoá, observa-se que o valor do coeficiente de Nash para o período total, apesar de seu baixo valor na etapa de validação, foi de 0.67. Por fim, para o período total, obteve-se um valor consideravelmente baixo de 8.40 m<sup>3</sup>/s para o índice RMSE, devido ao grande número de vazões previstas e observadas nulas ou próximas à nulas. Sendo assim, os resultados obtidos por meio do SMAP para esta sub-bacia (Figura 17c) podem ser considerados satisfatórios, levando em consideração as características de simplicidade que o modelo apresenta.

Em relação à modelagem utilizando o SMAP para a sub-bacia do rio Piancó (Tabelas 8 e 9 e Figuras 18a, 18b e 18c), os resultados obtidos foram consideravelmente inferiores aos obtidos na modelagem anterior. O valor do coeficiente de Nash (Tabela 8) para a calibração foi de 0.43, o que pode ser observado graficamente por meio da Figura 18a, uma vez que o modelo não foi capaz de gerar vazões previstas que acompanhassem os picos de vazão observada.

Como resultado direto disso, o valor do coeficiente de Nash obtido na etapa de validação (Tabela 8) foi de 0.24. Na Figura 18b pode-se observar que praticamente todos os picos de vazão são subestimados pelo modelo. O valor do coeficiente de Nash para o período total foi de 0.40. Apesar disso, o coeficiente de correlação obtido para o período total foi de 0.65, mostrando que apesar das vazões terem sido subestimadas, os valores ainda preservam grande correlação. O valor obtido para o RMSE no período total foi de 27.39 m<sup>3</sup>/s, que para as grandezas aqui utilizadas pode ser considerado um valor relativamente alto.

Em relação à RNA #1 (sub-bacia do rio Taperoá), a Tabela 10 mostra os índices de desempenho a partir da modelagem da rede. O coeficiente de Nash obtido para o período de calibração foi de 0.90, indicando uma melhora significativa em relação à modelagem feita para a mesma sub-bacia com o SMAP. A Figura 19a pode-se visualizar que as vazões previstas praticamente acompanham as vazões observadas durante quase toda a série, inclusive nos maiores picos de vazão. Por outro lado, o valor do coeficiente de Nash para o período de validação da RNA #1 foi de 0.49. Pode-se enxergar graficamente este resultado a partir da Figura 19b, onde os valores das vazões previstas

superam, nos picos, os valores das vazões observadas. Para valores de vazão mais baixos, a rede conseguiu acompanhar de forma satisfatória os valores de vazão observada.

Para o período total, o valor do coeficiente de Nash foi de 0.84, indicando que a rede conseguiu se comportar de forma satisfatória. Além disso, o valor do índice RMSE foi de 5.76 m<sup>3</sup>/s, ou seja, 2.64 m<sup>3</sup>/s a menos do que o resultado obtido a partir do SMAP. O coeficiente de correlação para o período total foi satisfatório (0.92), apesar no baixo resultado obtido para o período de teste (Figura 20).

Já em relação à RNA #2 (sub-bacia do rio Piancó), a Tabela 11 mostra os resultados obtidos para os índices de desempenho. O coeficiente de Nash para o período de calibração foi de 0.69. Este resultado pode ser observado graficamente a partir da Figura 21a. Assim como na modelagem realizada através do SMAP para esta mesma sub-bacia, a RNA #2 também não conseguiu reproduzir vazões que acompanhassem os picos de vazão observada. O valor coeficiente de Nash para o período de validação foi de 0.39. Na Figura 21b pode-se observar que os valores de vazão apresentaram forte correlação linear, apesar da vazão prevista subestimar ou superestimar a vazão observada nos picos.

O valor do coeficiente de Nash para o período total foi de 0.64, apresentando uma melhora significativa em relação à modelagem do SMAP, conforme pode-se observar graficamente a partir da Figura 21c. O coeficiente de correlação para o período total foi de 0.80, apresentando também uma melhora substancial no seu valor quando comparado à modelagem realizada por meio do SMAP. Por fim, o valor do índice RMSE para o período total foi de 21.27 m<sup>3</sup>/s, isto é, 6.12 m<sup>3</sup>/s a menos em relação à modelagem feita a partir do SMAP.

É interessante observar que ambas as modelagens realizadas para a sub-bacia do rio Piancó apresentaram resultados inferiores aos obtidos na modelagem da sub-bacia do rio Taperoá. Isto pode ter ocorrido por diversos motivos, como por exemplo a grande presença de valores nulos nas séries históricas, que, segundo Sarmiento (1996), os valores nulos utilizados como dados na fase de treinamento não acrescentam nenhuma informação para a modelagem no período úmido. De acordo com Lourenço (2012), a existência de muitos valores nulos prejudica a calibração de modelos hidrológicos para esta região.

A Tabela 12 resume de forma geral os principais resultados obtidos neste trabalho para o período total.

**Tabela 12** – Principais índices estatísticos obtidos na modelagem hidrológica para as sub-bacias do rio Taperoá e do rio Piancó.

Índice	SMAP		RNA	
	Taperoá	Piancó	Taperoá (RNA #1)	Piancó (RNA #2)
R <sup>2</sup>	0.85	0.65	0.92	0.80
Nash	0.67	0.40	0.84	0.64
RMSE	8.40	27.39	5.76	21.27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo a classificação das performances gerais dos modelos hidrológicos à nível mensal, proposta por Moriasi *et al.* (2007), pode-se classificar, com base no valor do coeficiente de Nash, a performance da modelagem da RNA #1 em muito boa ( $0.75 \leq \text{Nash} \leq 1.00$ ), da RNA #2 em satisfatória ( $0.50 \leq \text{Nash} \leq 0.65$ ). Para as modelagens feitas através do SMAP, pode-se classificar a performance da modelagem da sub-bacia do rio Taperoá em boa ( $0.65 \leq \text{Nash} \leq 0.75$ ) e a modelagem da sub-bacia do rio Taperoá em insatisfatória ( $\text{Nash} \leq 0.50$ ).

#### 4.6 CONCLUSÕES DOS RESULTADOS

De modo geral, a modelagem realizada por meio das RNAs utilizadas nesta pesquisa, seguindo a metodologia e demais considerações aqui propostas, apresentaram resultados consideravelmente acima dos resultados obtidos através do modelo SMAP. Por outro lado, é importante ressaltar que as sub-bacias aqui estudadas possuem características hidrológicas complexas e requerem, portanto, modelos complexos que representem de forma mais aproximada os fenômenos físicos que ali ocorrem.

Dessa forma, de modo geral, pode-se dizer que a modelagem chuva-vazão realizada através do modelo SMAP apresentou resultados satisfatórios para a sub-bacia do rio Taperoá e insatisfatórios para a sub-bacia do rio Piancó. Por outro lado, os resultados obtidos a partir da modelagem chuva-vazão feita através da RNA #1 gerou resultados muito bons, enquanto que a RNA #2 gerou resultados satisfatórios. Portanto, ambos os modelos chuva-vazão baseados em RNA utilizados apresentaram resultados superiores aos obtidos através da modelagem realizada pelo SMAP.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É válido ressaltar que modelos com características simplificadas, a exemplo do SMAP, normalmente não conseguem representar de forma satisfatória os fenômenos físicos que possam ocorrer nestas bacias. Isto não significa dizer, no entanto, que modelos simplificados sempre irão fornecer resultados piores, apenas que para determinadas regiões seus resultados não são tão precisos quanto os obtidos por outros modelos hidrológicos mais complexos.

Além disso, os modelos matemáticos hidrológicos são de grande importância para o entendimento dos fenômenos naturais que ocorrem na bacia. Comparar os resultados gerados por ambos os métodos somente ressalta o potencial das RNAs, bem como do aprofundamento de seu estudo.

Sendo assim, a aplicação de RNAs na modelagem de fenômenos hidrológicos pode ser justificada em casos onde não haja modelos matemáticos capazes de reproduzir com satisfatória precisão as variáveis climáticas e hidrológicas de determinada região. De acordo com Sarmiento (1996), a utilização de RNAs para modelagem hidrológica em regiões semi-áridas requer uma quantidade de dados significativamente maior do que quando comparado a regiões de rios perenes, uma vez que as chuvas na região semi-árida se concentram em poucos meses do ano.

Outro aspecto importante a ser destacado é que, em épocas de seca, os reservatórios subsuperficiais são praticamente inexistentes. Em outras palavras, as precipitações que ocorrem nestes períodos costumam não gerar escoamento superficial. Dessa forma, para estes períodos, apesar dos pluviômetros registrarem precipitação, esta normalmente não se converte em escoamento superficial. Este problema pode ser melhor observado por meio da Figura 21b, na qual por volta de junho de 2009 à dezembro de 2014, apesar de haver registro significativo de precipitação, praticamente não há registro de vazão. Este período (2009 a 2014) está integralmente dentro do período de validação dos modelos, o que pode ter influenciado de forma mais impactante na modelagem da sub-bacia do rio Piencó tanto por meio do SMAP quanto pela RNA.

Ademais disso, foram utilizados, devido à disponibilidade de dados na região, 8 postos pluviométricos na modelagem da sub-bacia do rio Piencó. A quantidade significativamente inferior de dados para esta modelagem pode ter influenciado nos resultados obtidos tanto pelo SMAP, quanto pela RNA.

Vale destacar, por outro lado, que o modelo SMAP é um modelo concentrado, que utiliza como dados de entrada a precipitação média da bacia, ao contrário das RNAs utilizadas nesta pesquisa, que utilizaram os dados pontuais dos postos pluviométricos. Ou seja, a variabilidade de dados que foram fornecidos para o treinamento das RNAs pode ser uma possível explicação para a obtenção de resultados superiores.

Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros a utilização, sempre que possível, da maior quantidade de postos pluviométricos disponíveis na região, desde que apresentem séries históricas com dados consistentes. Além disso, há a possibilidade dos dados de precipitação fornecidos pelas agências (ANA e AESA, por exemplo) não apresentarem uma total precisão. Neste sentido, outra possibilidade de se realizar a modelagem chuva-vazão é a partir de dados de precipitação obtidos a partir de estimativas realizadas por satélites de sensoriamento remoto, como por exemplo o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), que apresentou bons resultados no trabalho realizado por Nascimento (2020), com um valor do coeficiente de Nash de 0,9370, para o melhor resultado obtido durante o período de teste do modelo.

## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (2009). Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília, DF.

AMADOR, M. C.; SILVA, C. A (2020). O preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação: o método de ponderação regional associado ao Hidro-Plu e o HIDROWEB. Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros. v. 1, Nº 31.

BARP, A. R. B. (1999). Modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas com suporte em redes neurais artificiais. Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade de Campinas.

BEALE, M. H.; HAGAN, M. T.; DEMUTH; H. B. (2010). Neural Network Toolbox 7: user's Guide. The MathWorks, Inc.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2013). Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre.

FARIAS, C. A. S.; CARNEIRO, T. C.; LOURENÇO, A. M. G (2012). Mapas auto-organizáveis para modelagem chuva-vazão. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

FILHO, G. M. M. *et al.* (2012). Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. Revista de Ciências Ambientais, v.6, n.2, p. 35 a 47.

FREIRE, K. de M. M. (2012). O uso de transformada Wavelet na previsão de vazão. Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba.

GOMES, B. F. M. L.; SOUSA, S. S. O. de; C. C. (2017). Caracterização de variáveis fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Paraíba – PB: subsídios para identificação das unidades ambientais naturais. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. I Congresso Nacional de Geografia Física. Unicamp. Campinas, SP.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M.B. (1994). Training feedforward networks with the Marquart algorithm. Transactions on Neural Networks. v. 5, n. 6.

LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. (1989). MODHAC - Modelo Hidrológico Auto-Calibrável. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LOPES, J. E. J; CONEJO, J. G. L.; BRAGA JR. B. P. F. (1981). Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2. Fortaleza - CE.

LOURENÇO, A. M. G. (2012). Modelos chuva-vazão baseados em redes neurais artificiais para rios intermitentes no semiárido paraibano. Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar. Universidade Federal de Campina Grande. Pombal, PB.

MACEDO, M. J. H. (2013). Aplicações de redes neurais artificiais e satélite TRMM na modelagem chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu/BA. Programa de pós-graduação em meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

MACHADO, F. W. (2005). Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais. Programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná.

MORIASI, D. N. *et al.* (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. v. 50, n. 3.

MOURA, E. M. de (2007). Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do rio Piranhas-Açu entre os açudes Coremas-Mãe D'água e Armando Ribeiro Gonçalves. Programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN.

NASCIMENTO, T. V. M. do. (2020). Modelagem hidrológica chuva-vazão por meio de mapas auto-organizáveis para a bacia hidrográfica do Alto Rio São Francisco utilizando dados de precipitação TRMM. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB.

OLIVEIRA, Luiz F. C. de *et al* (2010). Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 14, n. 11, p. 1186-1192. Campina Grande, PB.



PAZ, A. R. (2010). Hidrologia aplicada. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caxias do Sul, RS.

PEREIRA, T. S. R. et al. (2016). Desenvolvimento de um modelo chuva-vazão via Tank Model e calibração automática. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. v. 11, n. 3.

RAMOS, R. P. da S. *et al.* (2017). Caracterização fisiográfica de bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. I Congresso Nacional de Geografia Física. Unicamp. Campinas, SP.

REBOUÇAS, A. da C. (2001). Água e desenvolvimento rural. Estudos Avançados. v. 15, n. 43.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V (2000). Modelos hidrológicos para Gestão Ambiental. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais.

SARMENTO, F.J. (2020). Engenharia Civil e Ambiental: uma abordagem computacional. v. 1 – Programação com Visual Basic. 1ª Ed.

SARMENTO, F. J. (1996). Modelagem de séries hidrológicas através de redes de neurônios. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 1, n. 2.

SARMENTO, F.J.; MARTINS, E.S.P.R. (1990). Cálculo dos coeficientes de Thiessen em microcomputador. Anais do XIV Congresso Latino-Americano de Hidráulica. Montevideo, Uruguai.

SANTOS, F. E. F. dos. (2017). Aplicação de modelos matemáticos para transformação de chuva em vazão. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba.

SANTOS, L. L. dos (2009). Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. Revista Brasileira de Geografia Física. v.2, n.03. Recife, PE.

SUGAWARA, M (1979). Automatic calibration of the tank model. Hydrological Sciences Journal. v. 24, n. 3.

TEIXEIRA, F. L. (2003). Modelagem de séries fluviométricas para o semi-árido brasileiro via redes neurais artificiais. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

THIESSEN, A. H (1991). Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, v. 39, n. 10.

TUCCI, C. E. M. (2001). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2 ed. Porto Alegre, RS.