



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BERNARDO ANTONIO LIMA PONTES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO
JAGUARIBE UTILIZANDO CN3S E SMAP**

CRATEÚS

2025

BERNARDO ANTONIO LIMA PONTES

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO JAGUARIBE
UTILIZANDO CN3S E SMAP

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

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

CRATEÚS

2025

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

- L696m Lima Pontes, Bernardo Antonio.
Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do alto Jaguaribe utilizando CN3S e SMAP / Bernardo Antonio Lima Pontes. – 2025.
43 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Cratêus, Curso de Ciência da Computação, Cratêus, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre .
1. Hidrologia . 2. CN3S. 3. SMAP. 4. Modelos Conceituais . 5. Simulação de Vazão. I. Título.
CDD 004
-

BERNARDO ANTONIO LIMA PONTES

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO JAGUARIBE
UTILIZANDO CN3S E SMAP

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará - UFC, como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADA EM: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

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

Mestra Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (Campus Crateús)
(Avaliador Interno)

Mestrando José Kerlly Soares de Araújo
Universidade Federal do Ceará (DEHA)
(Avaliador Externo)

Dedico este trabalho a minha mãe e a meu pai que me criou, por me acompanharem e me apoiarem em cada momento de minha vida. Aos meus fieis amigos, que sempre me aconselharam e forneceram suporte durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada. Sem sua graça e orientação, cada desafio teria sido ainda mais difícil, e cada conquista teria menos significado.

Ao meu professor e orientador, Alan Michel, minha gratidão por toda paciência, dedicação e ensinamentos compartilhados. Seu apoio e conhecimento foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e profissional, e levarei seus ensinamentos comigo para sempre.

À minha mãe, Maria Izanete, minha eterna fonte de amor e inspiração. Seu apoio incondicional, suas palavras de incentivo e sua presença constante me deram forças nos momentos mais difíceis e tornaram cada conquista ainda mais especial.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, celebrando minhas vitórias e me fortalecendo diante dos desafios. O amor e a união de vocês foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus colegas de trabalho, por cada aprendizado compartilhado e pelo companheirismo ao longo dessa jornada. A troca de experiências e o apoio mútuo tornaram cada dia mais leve e motivador.

Aos meus amigos, que foram abrigo nos momentos difíceis e alegria nas horas de celebração. Obrigado por cada palavra de incentivo, cada risada e cada lembrança que levarei comigo.

Aos meus amigos de turma, com quem compartilhei essa trajetória acadêmica, as dificuldades, os estudos intermináveis e as conquistas. A parceria e a amizade de vocês tornaram essa jornada mais enriquecedora e especial.

E por fim a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão dessa pesquisa.

“Tudo quanto te vier à mão para fazer,
faze-o conforme as tuas forças.”

— *Eclesiastes 9:10*

RESUMO

Este estudo analisou a utilização dos modelos hidrológicos CN3S (Curve Number - Three Steps) e SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) para simular o escoamento superficial em bacias do semiárido cearense. A utilização de modelos chuva-vazão é essencial para compreender a relação entre precipitação e vazão, apoiar o planejamento e a gestão de recursos hídricos e fornecer dados para tomada de decisão, especialmente em regiões com grandes variações pluviométricas. As bacias de Arneiroz e Iguatu, situadas no trecho superior do rio Jaguaribe, foram estudadas com dados mensais de chuvas e vazão entre 1974 e 2012. O modelo foi ajustado e verificado usando a ferramenta solver no Excel, com o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) como **meta funcional**. Depois, os resultados do CN3S foram confrontados com o modelo SMAP, que é comumente utilizado no Ceará. O CN3S apresentou um desempenho satisfatório nas duas bacias, com NSEs superiores a 0,67 e **EQMs** reduzidos. Os resultados indicaram que o modelo CN3S apresentou melhor desempenho geral, especialmente durante a simulação dos picos de cheia, evidenciando maior sensibilidade às variações da precipitação. O modelo SMAP, embora tenha apresentado bons resultados, mostrou tendência à suavização dos extremos hidrológicos. Na bacia de Arneiroz, o CN3S alcançou melhores valores de NSE tanto na calibração quanto na validação. Na bacia de Iguatu, a performance dos dois modelos foi mais equilibrada, mas o CN3S apresentou uma leve superioridade na representação da dinâmica hidrológica. Conclui-se que os dois modelos são adequados às condições hidrológicas das bacias analisadas, com o CN3S demonstrando maior sensibilidade a eventos extremos, o que evidencia sua utilidade para análises em áreas semiáridas, como o Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: hidrologia; modelos conceituais; CN3S; SMAP; simulação de vazão.

ABSTRACT

This study analyzed the use of the CN3S (Curve Number - Three Steps) and SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) hydrological models to simulate surface runoff in basins in the semiarid region of Ceará. The use of rainfall-runoff models is essential for understanding the relationship between precipitation and streamflow, supporting water resource planning and management, and providing data for decision-making, especially in regions with large rainfall variations. The Arneiroz and Iguatu basins, located in the upper reaches of the Jaguaribe River, were studied using monthly rainfall and streamflow data from 1974 to 2012. The model was adjusted and verified using the solver tool in Excel, with the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) as the functional target. The CN3S results were then compared with the SMAP model, which is commonly used in Ceará. The CN3S performed satisfactorily in both basins, with NSEs greater than 0.67 and reduced MSEs. The results indicated that the CN3S model performed better overall, especially during the simulation of flood peaks, demonstrating greater sensitivity to precipitation variations. The SMAP model, although presenting good results, tended to smooth out hydrological extremes. In the Arneiroz basin, the CN3S achieved better NSE values in both calibration and validation. In the Iguatu basin, the performance of the two models was more balanced, but the CN3S showed a slight superiority in representing hydrological dynamics. It is concluded that both models are suitable for the hydrological conditions of the analyzed basins, with the CN3S demonstrating greater sensitivity to extreme events, demonstrating its usefulness for analyses in semiarid areas, such as Northeast Brazil.

Keywords: hydrology; conceptual models; CN3S; SMAP; flow simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seções de um trecho de rio.....	19
Figura 2 - Mapa das Bacias estudadas.	24
Figura 3 - Fluxograma.....	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Datos de Arneiroz.....	25
Gráfico 2 – Datos de Iguatú.....	26
Gráfico 3 – Gráfico Comparativo de Arneiroz.....	33
Gráfico 4 – Gráfico Comparativo de Iguatú.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros calibrados de estudos passados.....	32
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Modelos Hidrológicos	17
3.2	Modelos Chuva-Vazão	17
3.3	Classificação dos Modelos	19
3.3.1	<i>Contínuo e discreto:</i>	19
3.3.2	<i>Concentrado e distribuído:</i>	19
3.3.3	<i>Estocástico e determinístico:</i>	20
3.4	Modelo CN-3S	22
3.5	Coefficiente de Nash-Sutcliffe(NSE)	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Área de estudo	25
4.2	Métodos e Materiais.	26
4.2.1	<i>Coleta de Dados</i>	26
4.3	Tratamento dos Dados	27
4.4	Calibração dos parâmetros no Modelo CN3S	28
4.5	Calibração dos parâmetros do modelo SMAP	29
4.6	Comparação com o Modelo SMAP	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1	Desempenho do Modelo CN3S nas Bacias Estudadas	31
5.2	Interpretação dos Indicadores Estatísticos	31
5.3	Parâmetros Calibrados do CN3S	32
5.4	Parâmetros Calibrados do SMAP	34
5.5	Comparação entre CN3S e SMAP	34
5.6	Análise dos gráficos	35
5.7	Vantagens Operacionais do CN3S	36
6	CONCLUSÃO	38
7	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Mais de quatro bilhões de pessoas vivem ameaçadas pela escassez de água em diferentes partes do mundo. O restante opta por viver em regiões adensadas providas de infraestrutura básica. Esta solução provoca impactos ambientais importantes pelo elevado consumo de água, energia, alimentos, e pela geração de poluentes de forma concentrada (GRANT et al., 2012; MOLINOS-SENANTE; DONOSO, 2016; JAEGER et al., 2017). Não é diferente, no território brasileiro, a constatação de má distribuição desses recursos em escala intra e inter-regional, sendo, o país, afetado tanto pela escassez quanto pela abundância (CIRILO, 2015).

A otimização do uso da água é fundamental para garantir a sustentabilidade local e minimizar os impactos da escassez hídrica na região. Para tanto, faz-se necessário uma rede de monitoramento eficiente. A rede de monitoramento climático do estado do Ceará conta com uma grande quantidade de estações pluviométricas, cerca de 1300 estações de acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no entanto as estações fluviométricas ainda são limitadas em termos de quantidade, por volta de 400 estações no território cearense, deixando uma grande parte dos seus rios com pouco ou nenhum monitoramento.

Entre os modelos utilizados, destaca-se o SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure). Trata-se de um modelo com boa aceitação regional, mesmo com estrutura relativamente simples. Por outro lado, o modelo CN3S (Curve Number–Three Steps) apresenta bom potencial de aplicação no semiárido brasileiro por permitir a representação das condições de umidade antecedente na modelagem chuva-vazão. Esse princípio encontra respaldo na literatura, como demonstrado por Mishra, Jain e Singh (2004), que destacam a importância de incorporar a umidade do solo prévia na formulação baseada no método CN. Esse modelo incorpora seis parâmetros de calibração e possui como vantagem sua estrutura conceitual simplificada e adaptabilidade a planilhas eletrônicas.

Neste estudo, buscou-se avaliar a performance do modelo CN3S em representar o comportamento hidrológico das bacias do alto curso do Rio Jaguaribe, utilizando dados das estações fluviométricas de Arneiroz e Iguatu. Os resultados obtidos foram comparados aos do modelo SMAP, com o intuito de verificar a viabilidade do CN3S como alternativa para a modelagem hidrológica no semiárido. Assim, a aplicação do modelo CN3S contribui para aprimorar a previsão hidrológica em regiões semiáridas, fornecendo subsídios para a gestão

hídrica e apoio à tomada de decisão frente à variabilidade climática.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a eficiência do uso de modelos hidrológicos chuva-vazão mensal na Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe, Ceará, considerando sua precisão e limitações.

2.2 Objetivos específicos

- Calibrar e validar os modelos chuva-vazão CN3S e SMAP utilizando planilhas eletrônicas e a ferramenta solver, tendo o coeficiente de Nash-Sutcliffe como função objetivo;
- Analisar os resultados obtidos com os dois modelos por meio de indicadores estatísticos (NSE e EQM) e análise gráfica;
- Avaliar a aplicabilidade dos modelos no contexto do semiárido cearense.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Modelos Hidrológicos

O ciclo hidrológico compreende o conjunto de processos responsáveis pela movimentação da água no meio ambiente. Apesar da constância no volume global de água no planeta, a quantidade disponível em um determinado local está sempre mudando, circulando entre diferentes estados e reservas de forma contínua, o que caracteriza o ciclo da água (LIMA, 2011).

Os modelos hidrológicos são ferramentas criadas pela ciência para representar e compreender o comportamento do fluxo de água em bacias hidrográficas. Esses modelos simplificam o funcionamento do sistema, permitindo simular cenários distintos e auxiliar no entendimento do escoamento superficial e do comportamento hídrico da bacia (TUCCI, 2005).

Para a aplicação adequada da modelagem hidrológica, é necessário conhecimento sobre o ciclo hidrológico e os processos físicos associados à precipitação, como a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial. Esses processos são representados matematicamente dentro dos modelos hidrológicos (SANTOS, 2009).

De acordo com Martinez (2014), os modelos hidrológicos são amplamente utilizados para preencher lacunas em séries de vazões, prever vazões em tempo real, simular transporte de sedimentos e qualidade da água, além de apoiar o dimensionamento de barragens e o gerenciamento de recursos hídricos. Seibt (2013) complementa destacando que tais modelos ajudam a entender o comportamento hidrológico de diferentes bacias, além de apoiar o planejamento e avaliação de cenários de uso do solo, identificando possíveis impactos sobre os recursos hídricos.

3.2 Modelos Chuva-Vazão

Desde os primeiros estudos quantitativos em Hidrologia, os pesquisadores se deparam com os modelos chuva-vazão. Durante a primeira metade do século XIX, foram publicados registros de medições de vazões de vários rios europeus, marco inicial para o desenvolvimento de "modelos" de processo hidrológico (Linsley, 1981). Os primeiros modelos originaram-se, principalmente, em resposta aos problemas de esgoto urbano, projeto de sistemas de drenagem e projeto de vertedouro de barragens (Todini, 1988).

Dentro de uma perspectiva histórica, convém salientar o uso do método racional a partir do início do século passado. A seguir, surgiu o conceito de hidrograma unitário (Sherman, 1932), baseado no princípio da superposição, até que, na década de 50 do século

passado, apareceram os primeiros modelos ditos "conceituais".

O Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos (U. S. Soil Conservation Service), em 1954, apresentou um procedimento para estimar o escoamento direto a partir da precipitação com base nas denominadas curvas-número (*Curve Number* ou CN). Surgiram, a posteriori, diversos modelos que se utilizavam de tais curvas. Após a década de 60, em razão da incorporação da ferramenta computacional, os modelos chuva-vazão sofreram um grande impulso, até atingirem o estado da arte atual.

Um modelo é denominado chuva-vazão (MCV) quando, partindo-se de certos dados, em geral, precipitação e evaporação, pode-se obter, através de equações empíricas e/ou físicas, o escoamento em determinada seção de uma bacia hidrográfica. Em Viessman et al. (1977), bem como em Fleming (1975) encontra-se a descrição de diversos modelos hidrológicos.

Como os modelos são representações simplificadas do sistema real (natureza), nem sempre o que incorpora maior complexidade é o mais indicado para determinada utilização, posto que se deve considerar a disponibilidade de dados. Portanto, é imprescindível ter-se em conta a finalidade do uso do modelo. Assim, para uma perfeita escolha do modelo a ser empregado, o hidrólogo deveria observar, além de, é claro, a disponibilidade do modelo, dois outros aspectos: I) o objetivo do uso do modelo e II) a confiabilidade dos resultados como um todo: dados, modelo, calibração, validação e aplicação (Freitas; Porto, 1990).

Sendo o modelo uma representação simplista da complexa realidade, é notório o aparecimento de imperfeições. Urge, portanto, atentar para as diversas fontes de incerteza. O'Donnell ; Canedo (1980) relacionaram as principais fontes de incerteza, quais sejam: registros de dados hidrometeorológicos da bacia hidrográfica, estrutura dos modelos chuva-vazão e calibração de modelos chuva-vazão.

Tucci et al. (1988), procurando sanar esse problema relacionado à infiltração, propõem algoritmos que consideram a variabilidade espacial da capacidade de infiltração e que podem ser incorporados aos modelos chuva-vazão. Outro aspecto interessante levantado por Sorooshian ; Gupta (1985) trata da identificação e estruturação de modelos. O referido artigo enfoca que o procedimento para determinar a estrutura do modelo é um auxílio ou um obstáculo para a determinação dos valores ótimos dos parâmetros. Sorooshian ; Gupta (1985) traçam uma discussão acerca dos parâmetros estruturais (liminares ou patamares), os quais levam à modificação da estrutura do modelo de chuva-vazão, a depender da série de dados em questão. Canedo et al. (1989) atenuam esse mesmo problema com o uso de técnicas de suavização.

Pilgrim et al. (1982) apresentaram um importante estudo dos efeitos do tamanho da bacia hidrográfica nas relações de escoamento. Quanto à função do tempo, segundo Sorooshian et al. (1983) deve ser ajustada após análise da autocorrelação e tendência nos dados. Diskin ; Simon (1977) propuseram critérios objetivos e subjetivos de seleção de modelos para bacias hidrográficas, considerando modelos estocásticos e modelos determinísticos. Estudos posteriores abordam métodos de 1ª ordem e métodos de 2ª ordem. Discussões sobre esses métodos encontram-se em Kuester ; Mize (1974), Sorooshian ; Gupta (1983), assim como em Bard (1974).

3.3 Classificação dos Modelos

3.3.1 Contínuo e discreto:

Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, e discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. Um sistema pode modificar-se continuamente, mas para efeito de projeto os registros são efetuados em intervalos de tempo. A escolha deste intervalo é função da economia desejada e da precisão dos resultados que são conflitantes, já que à medida que o intervalo diminui, o custo para medir os dados ou da computação aumenta em favor da melhoria da precisão dos resultados. Exemplo do registro de uma função contínua no tempo é o uso do linógrafo gráfico para registrar níveis. O registro discreto desta mesma variável é efetuado através de observadores, em determinadas horas do dia. A maioria dos sistemas hidrológicos são contínuos e são representados por modelos discretos (Tucci,2005).

3.3.2 Concentrado e distribuído:

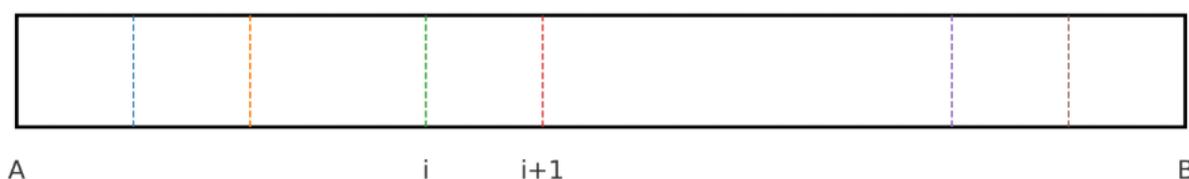
Um modelo é concentrado (*lumped*) quando não leva em conta a variabilidade espacial. A precipitação média de uma bacia é um exemplo da integração espacial da variável de entrada. Em geral, os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente (Tucci,2005).

Um modelo é dito distribuído (*distributed*) quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Em termos matemáticos, a equação diferencial ordinária possui uma variável independentemente, neste caso, o tempo, e representa um modelo concentrado, enquanto que a equação diferencial parcial com o tempo e o espaço, como variáveis independentes, representa um modelo distribuído (Tucci,2005).

Na prática não existem modelos puramente distribuídos, já que são utilizadas

discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído concentrado numa pequena subdivisão. Na figura 1, um modelo pode ser chamado de distribuído por retratar o trecho entre A e B por várias seções, mas será concentrado se considerarmos somente o trecho entre as seções i e $i+1$. A qualidade do modelo distribuído é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade espacial do sistema, sujeito às condições também variáveis da entrada, como a precipitação. O grau de detalhamento está ligado diretamente às informações disponíveis e à precisão desejada para retratar a bacia. Um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais aos de um modelo concentrado. Quanto ao ajuste dos valores simulados aos observados, somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema. (Tucci, 2005)

Figura 1- Seções de um trecho de rio



Fonte: Tucci, 2005, p.22

3.3.3 Estocástico e determinístico:

Esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. Segundo Chow (1964), se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. De outro lado, se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, e o modelo segue uma lei definida que não é da lei das probabilidades, o modelo e os processos são ditos determinísticos.

Dooge (1973) definiu a diferença entre sistemas determinísticos e estocásticos da seguinte forma: quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída, o sistema é dito determinístico, enquanto que o sistema é estocástico quando o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico. Nesta definição é necessário acrescentar que as condições iniciais também devem ser exatamente as mesmas para certos sistemas.

Quando uma variável de entrada de um sistema é aleatória, a variável de saída também será aleatória, no entanto, o sistema pode ter comportamento determinístico ou representado por um modelo determinístico. Por exemplo, a vazão de entrada e saída de um reservatório são variáveis aleatórias, mas a determinação da vazão de saída, com base na entrada e nas características do reservatório, é um processo determinístico bem conhecido.

O simples exame da resposta de um sistema pode levar a conclusões erradas. Um sistema com comportamento aparentemente aleatório também pode ser determinístico. Quando o sistema é não-linear e altamente dependente das suas condições iniciais, a resposta pode apresentar características de uma variável aleatória e passar pelos testes estatísticos e estocásticos. Este processo é denominado na literatura de caos determinístico. (Tucci,2005)

- Conceitual e empírico:

Um modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Esta definição é estabelecida para diferenciar os modelos que consideram os processos físicos, dos modelos ditos “caixa-preta”. Os modelos do tipo “caixa-preta” ou empíricos são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

A definição de modelo conceitual é artificial, já que funções empíricas são também usadas (equações de Darcy, Horton, etc.), mas estão relacionadas com a física do sistema. Alguns autores utilizam uma subdivisão na classificação dos modelos conceituais: semiconceituais e físicos. Os primeiros se referem aos modelos que relacionam características do processo, embora mantenham um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto que os segundos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema.

As dificuldades dos modelos físicos têm residido sempre na variabilidade espacial dos processos e na dificuldade de estimar os parâmetros. (Tucci, 2005)

Nesse contexto, os modelos hidrológicos CN3S e SMAP, utilizados neste estudo, são ambos classificados como modelos determinísticos e conceituais. O CN3S, por sua vez, adota uma estrutura concentrada baseada no método do CN (*Curve Number*), e se destaca pela simplicidade operacional, ideal para regiões com dados limitados. Já o SMAP possui uma estrutura mais elaborada, com múltiplos compartimentos que representam de forma detalhada os processos hidrológicos internos da bacia, como infiltração, percolação e escoamento subterrâneo. Em ambos os casos, dadas as mesmas condições de entrada e parâmetros, os modelos fornecem resultados consistentes e repetíveis, caracterizando-se como determinísticos.

A adoção dos dois modelos neste trabalho visa não apenas simular o processo chuva-vazão, mas também permitir uma análise comparativa entre diferentes abordagens conceituais aplicadas às bacias do semiárido.

3.4 Modelo CN-3S

O modelo CN-3S (*Curve Number 3 Step*), baseia-se nas relações desenvolvidas pelo *U.S. Conservation Service* das curvas CN (*Curve Number*) e é composto de seis parâmetros de calibração. Trata-se de um modelo conceitual para a geração de deflúvios que foi desenvolvido por Torga ; Freitas (1987) e aplicado a diversos estudos hidrológicos no semiárido do Piauí, Ceará, Pernambuco e Paraíba (MARCOS FREITAS, 1990).

O modelo determinístico chuva-vazão CN-3S (*Curve Number with Three Step Antecedent Precipitation*) foi desenvolvido com o objetivo de gerar vazões sintéticas para a simulação de operações de reservatórios. O CN-3S utiliza como dados de entrada, necessário ao cálculo da lâmina de escoamento superficial de um determinado intervalo de tempo, a precipitação pluviométrica do próprio período e as precipitações dos períodos antecedentes.

O modelo CN3S, que é um modelo usado para identificar o escoamento superficial a partir da precipitação e o CN (*Curve Number*) como base deste cálculo utiliza a precipitação de três períodos antecedentes para o cálculo do escoamento, que é uma característica procurada em um modelo que simula os fluxos em bacias com alta variabilidade climática.

3.5 Modelo SMAP

O *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), desenvolvido por Lopes et al. (1982), é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação precipitação-vazão. Esse modelo é classificado como concentrado, conceitual e é baseado basicamente em dois reservatórios, que correspondem à camada superficial do solo e à camada subterrânea (OLIVEIRA, 2015). O desenvolvimento desse modelo baseou-se na experiência com a aplicação dos modelos Stanford Watershed IV e Mero, a partir de trabalhos realizados no DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Inicialmente, o SMAP foi desenvolvido para a escala de tempo diária e, posteriormente, apresentado em versão horária e mensal (GONÇALVES, 2008).

As principais vantagens do modelo SMAP são referentes ao uso de poucos parâmetros, simplificando assim a sua utilização. Dos seis parâmetros do modelo em escala diária, três são considerados fixos, com estimativas baseadas em processos físicos, e os demais, com parâmetros calibráveis baseados em séries históricas de precipitação e vazão (FAYAL, 2008). Segundo Seibt (2013), alguns parâmetros utilizados para o processo da modelagem precipitação-vazão, não podem ser monitorados e nem medidos, dessa forma, é

necessário a calibração dos mesmos com o objetivo de estimá-los. Essa etapa, consiste em atribuir valores aos parâmetros, de maneira a promover o ajuste às respostas esperadas do modelo.

A calibração do modelo SMAP pode ser realizada através de dois métodos: de forma manual, através de “tentativa e erro” e através de calibração automática utilizando métodos matemáticos para otimização. A principal desvantagem desta última calibração é a falta de acompanhamento do hidrólogo no ajuste dos parâmetros, impossibilitando o desenvolvimento da sua sensibilidade, e desse modo reduz a confiabilidade dos resultados (BUCHIANERI, 2004).

De acordo com Lucas et al. (2009), além do processo de calibração, para desenvolver um modelo hidrológico completo, é necessário a etapa de validação. Essa etapa se refere ao processo de usar a segunda parte da série de dados para verificar a persistência do desempenho do modelo, que opera com os valores dos parâmetros obtidos no período de calibração.

3.6 Coeficiente de Nash-Sutcliffe(NSE)

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma das principais métricas utilizadas na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos. O NSE é definido matematicamente pela seguinte equação:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (8)$$

Onde:

$Q_{obs,i}$ = vazão observada no instante i ;

$Q_{sim,i}$ = vazão simulada pelo modelo no instante i ;

\bar{Q}_{obs} = média das vazões observadas;

O valor do NSE varia entre $-\infty$ e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho do modelo, indicando que as vazões simuladas se aproximam das observadas. Valores iguais a 1 representam uma simulação perfeita. Valores negativos indicam que a média observada é uma estimativa melhor do que o modelo, evidenciando falhas significativas na simulação.

Conforme Moriasi et al. (2007), valores de NSE acima de 0,75 podem ser considerados como indicativos de uma simulação muito boa, entre 0,65 e 0,75 como boa, entre

0,5 e 0,65 como aceitável, e abaixo de 0,5 como insatisfatória. No entanto, esses limites podem variar conforme o tipo de bacia, modelo e objetivo do estudo.

O NSE é amplamente utilizado por sua simplicidade interpretativa e por ser sensível aos desvios quadráticos entre os valores observados e simulados, penalizando fortemente grandes erros. Contudo, o índice apresenta maior sensibilidade em períodos de altas vazões, podendo subestimar erros em períodos secos (Krause et al., 2005).

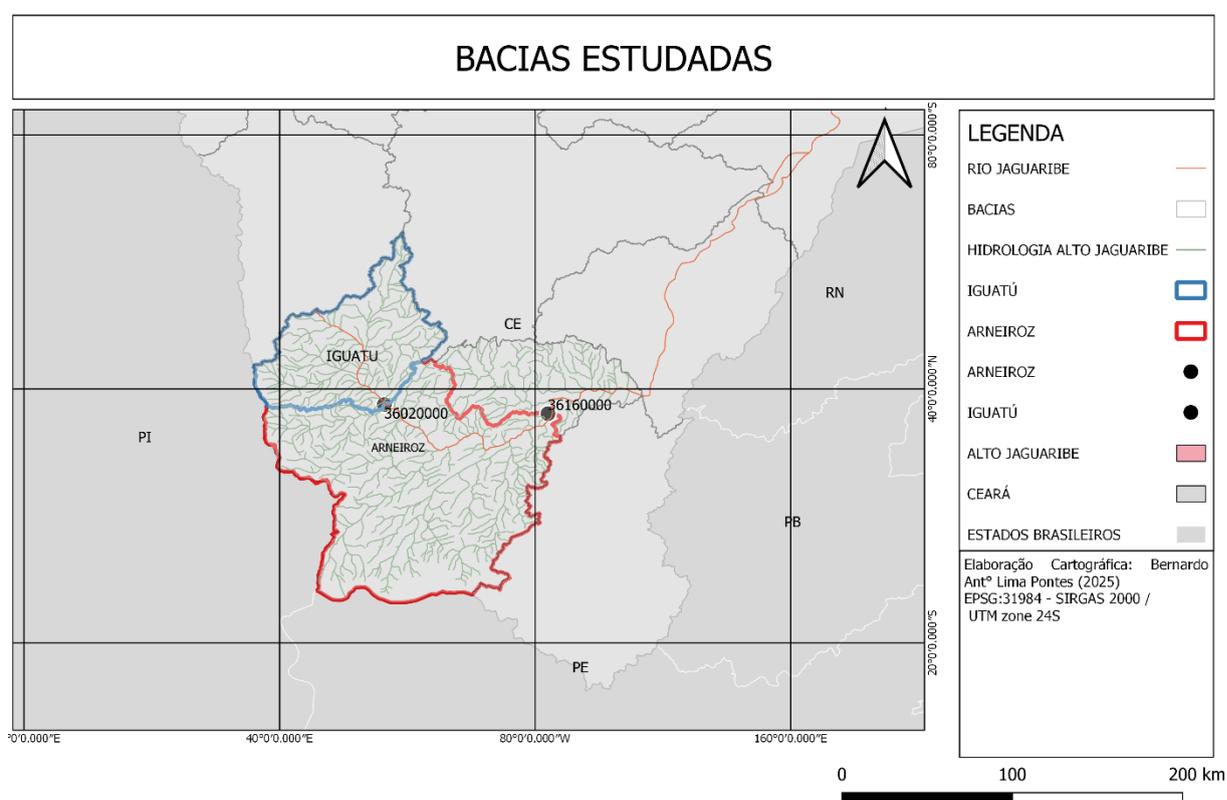
Em função de suas características, o NSE foi adotado neste estudo como principal indicador para avaliar a qualidade da calibração e validação do modelo CN3S, além de servir como critério objetivo para o ajuste dos parâmetros durante o uso da ferramenta solver.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas localizadas no estado do Ceará conforme mostrado na figura 2, a bacia de Arneiroz e a bacia de Iguatu, ambas pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, principal curso d'água do estado. As bacias analisadas situam-se predominantemente na região centro-sul do Ceará, em área caracterizada pelo clima semiárido, apresentando baixa precipitação anual e elevada evapotranspiração.

Figura 2 - Mapa das Bacias estudadas



Fonte: Autoria própria(2025)

A bacia de Arneiroz tem uma área em torno de 5.868 km², ao passo que a bacia de Iguatu ocupa aproximadamente 20.673 km² (COGERH). Ambas são formadas principalmente por solos rasos e pouco evoluídos, ligados à vegetação de caatinga. No que tange ao uso do solo, prevalece a agropecuária em larga escala e regiões de vegetação nativa.

O padrão de chuvas na região é mais intenso de fevereiro a maio, correspondente ao principal período de recarga de água. Os rios dessas bacias são intermitentes, com grande aporte hídrico somente na época das chuvas.

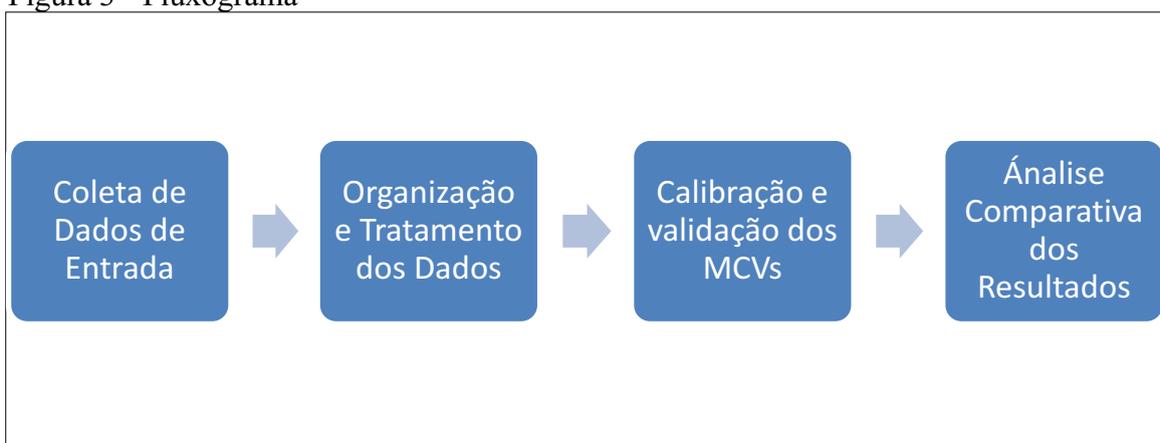
O rio Jaguaribe, o principal das duas bacias, tem sua origem no município de Tauá

e se estende por cerca de 633 km até desaguar no Oceano Atlântico. Vários açudes estratégicos para o fornecimento de água para consumo humano e usos diversos estão situados ao longo de seu caminho

4.2 Métodos e Materiais.

Na figura 3 é demonstrado as etapas realizadas para a elaboração do trabalho e obtenção dos resultados.

Figura 3 - Fluxograma



Fonte: Autoria Própria

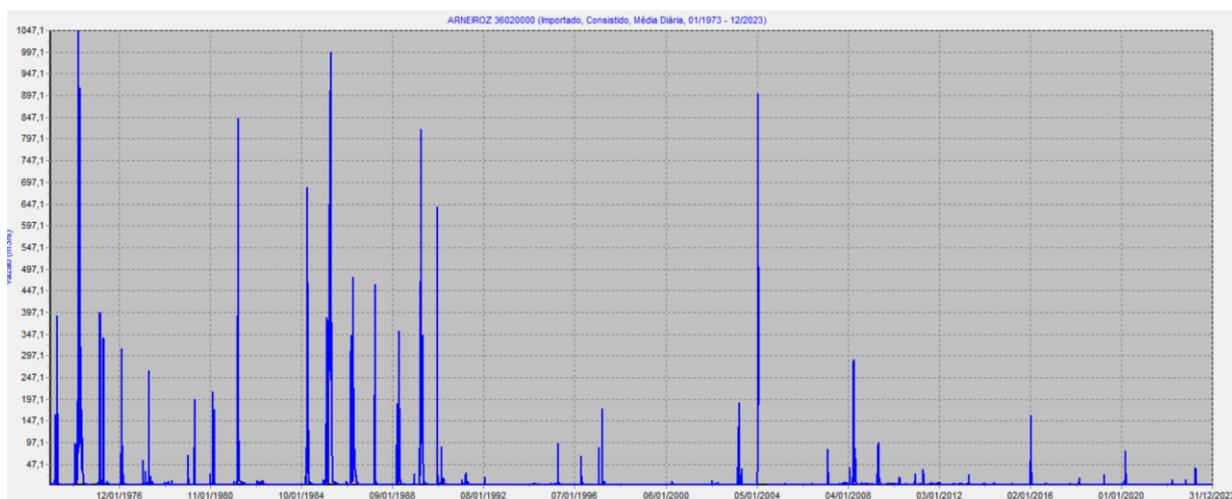
4.2.1 Coleta de Dados

De início, foi feita uma seleção nas estações com maior quantidade de dados, logo após foi definido o intervalo de anos, optando por iniciar a análise a partir de 1974 pela maior disponibilidade de dados em estações fluviométricas e indo até 2012 devido à seca entre 2012 e 2018 para que os resultados não ficassem enviesados. Esses dados de vazões vieram da Hidroweb/SNIRH e foram tratados no software Hidro versão 1.4.

Para este trabalho, foram selecionadas duas estações fluviométricas:

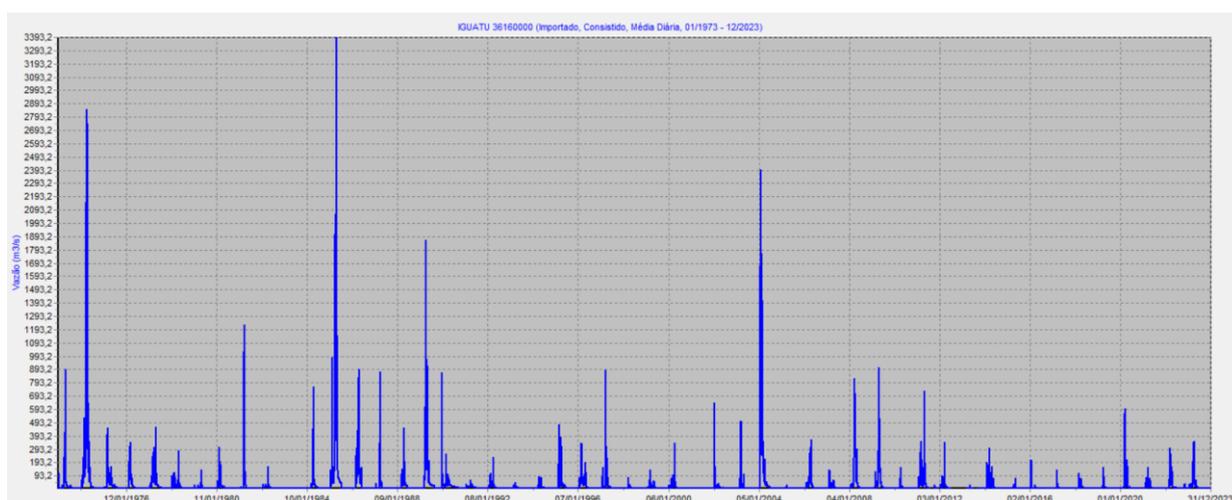
- Arneiroz (código 36020000)
- Iguatu (código 36160000)

Gráfico 1 - Dados de Arneiroz



Fonte: Hidroweb/SNIRH tratado no Hidro 1.4

Gráfico 2 - Dados de Iguatu



Fonte: Hidroweb/SNIRH tratado no Hidro 1.4

4.3 Tratamento dos Dados

Com os dados brutos obtidos, procedeu-se a organização deles em planilhas eletrônicas no Excel com o modelo hidrológico CN3S configurado com intuito de facilitar o manuseio das séries temporais.

Primeiramente, foi realizada uma análise de consistência dos dados, verificando-se a presença de falhas nos registros, valores extremos e incongruências em relação aos períodos analisados para então ser feito a uniformização dos dados. Após as séries uniformizadas, procedeu-se à padronização temporal garantindo que os dados de entradas e as vazões observadas estivessem no mesmo intervalo de anos.

Além disso, também foram conferidas as unidades das variáveis e ajustadas para

ser compatíveis com a estrutura do CN3S, após isso foram inseridos os dados de vazões mensais e as vazões observadas como dados de entrada com o intuito de obter as vazões calculadas.

Assim, todo o processo de coleta, organização e tratamento dos dados foi essencial para o sucesso da calibração e posterior análise comparativa entre os modelos estudados.

4.4 Calibração dos parâmetros no Modelo CN3S

Com as tabelas organizadas e os dados verificados, seguiu-se para a fase de calibração do modelo CN3S. O modelo foi previamente configurado em planilhas no Excel, organizado de modo a aceitar as séries mensais de chuvas como entrada e simular as vazões de saída correspondentes com base no ajuste de seus parâmetros internos.

Para garantir a qualidade da análise e permitir uma avaliação confiável do desempenho dos modelos, a série histórica de dados foi dividida de forma temporal: o período de 1975 a 2002, correspondente a aproximadamente dois terços ($2/3$) da série, foi utilizado para a calibração dos parâmetros do modelo CN3S, enquanto o período de 2003 a 2012 (cerca de um terço – $1/3$) foi reservado para a validação.

A calibração foi efetuada utilizando a ferramenta solver, que faz parte do Excel, empregada na busca iterativa dos valores ideais para os parâmetros do CN3S: CN1, ALFA, BETA, K0, K1 e K2. O critério escolhido para o processo de otimização foi a maximização do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), uma métrica comumente empregada na análise do desempenho de modelos hidrológicos, pois possibilita quantificar o nível de concordância entre as vazões simuladas e as observadas.

O processo envolveu estabelecer intervalos razoáveis para cada parâmetro, fundamentando-se em referências técnicas e vivências anteriores na literatura, assegurando que os valores ajustados se mantivessem dentro de limites fisicamente consistentes para bacias hidrográficas localizadas no semiárido nordestino (MARCOS FREITAS, 1990). Com base nessa configuração inicial, o Solver foi empregado para experimentar várias combinações entre os parâmetros, buscando de forma iterativa a solução que otimizasse o NSE.

Durante a calibração, além do NSE, o Erro Quadrático Médio (EQM) foi acompanhado como um indicador secundário, ajudando na análise da precisão do modelo. Embora o foco principal fosse maximizar o NSE, também se procurou minimizar o EQM, equilibrando eficiência e exatidão nos resultados.

Esse procedimento possibilitou o refinamento do modelo, assegurando que o comportamento hidrológico simulado se aproximasse ao máximo da realidade verificada nas

bacias de estudo. O CN3S revelou, nesse cenário, uma significativa vantagem operacional: sua interface simplificada em Excel e a metodologia intuitiva de calibragem possibilitaram um controle direto sobre os ajustes e uma rápida visualização dos resultados intermediários, facilitando a tomada de decisão ao longo do processo.

A calibração foi efetuada de forma distinta para cada uma das duas bacias analisadas (Arneiroz e Iguatu), considerando suas características hidrológicas e morfométricas. No término desta fase, os conjuntos de parâmetros alcançados refletiram as melhores condições de simulação para cada bacia, atuando como fundamento para a comparação subsequente com os resultados do modelo SMAP.

4.5 Calibração dos parâmetros do modelo SMAP

Com o objetivo de realizar uma comparação justa dos resultados obtidos no CN3S com os do SMAP, foi feita a calibração dos parâmetros do modelo SMAP utilizando a mesma base de dados e no mesmo intervalo de anos usados no CN3S. A divisão temporal da série histórica seguiu o mesmo critério adotado para o CN3S, o intervalo de 1975 a 2002 foi utilizado como período de calibração, enquanto os dados de 2003 a 2012 foram reservados para a validação do modelo.

O critério de desempenho adotado para otimização foi, assim como no CN3S, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Segundo Machado et al. (2003) é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos.

A calibração foi executada separadamente para as bacias de Arneiroz e Iguatu, respeitando suas particularidades. Ao final da etapa, os parâmetros obtidos proporcionaram a melhor configuração possível do modelo SMAP para cada bacia, permitindo realizar uma comparação técnica e equilibrada com os resultados alcançados pelo CN3S.

4.6 Comparação com o Modelo SMAP

Com os ajustes feitos no modelo CN3S, começou-se a etapa de comparação com o modelo SMAP, colocando os mesmos dados iniciais nos mesmos períodos temporais, tanto na calibração como na validação. O propósito dessa comparação foi ver a eficácia do CN3S em relação a um modelo já conhecido na biblioteca e em estudos hidrológicos local, levando em conta tanto números quanto qualidades.

Foram pegos os números que vêm do SMAP, incluindo as contas do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e do Erro Quadrático Médio (EQM) sobre as etapas de

calibração e validação. Esses índices foram confrontados diretamente com os números obtidos no CN3S permitindo uma análise clara das habilidades dos modelos em representar a resposta hidrológica das bacias estudadas.

Além da análise estatística, foram examinados aspectos conceituais e operacionais dos dois modelos. Enquanto o SMAP possui uma estrutura mais elaborada, com diversos reservatórios internos e uma parametrização detalhada dos processos de armazenamento e escoamento, o CN3S se destaca por sua simplicidade estrutural, baseada no método do *Curve Number*. Essa simplicidade revelou ser benéfica no processo de calibração, tornando mais fácil a identificação de parâmetros essenciais e viabilizando ajustes mais ágeis e intuitivos.

Por fim, destaca-se que a comparação entre os modelos não se limitou aos índices estatísticos. A análise gráfica do comportamento das séries simuladas, especialmente no que se refere à simulação de picos de vazão e períodos secos, reforçou a superioridade do CN3S na reprodução de eventos críticos, condição essencial para o planejamento e gestão de recursos hídricos em regiões do semiárido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 *Desempenho do Modelo CN3S nas Bacias Estudadas*

A aplicação do modelo hidrológico CN3S nas bacias de Arneiroz (código 36020000) e Iguatu (código 36160000) proporcionou uma avaliação da capacidade do modelo em simular a resposta hidrológica regional, especialmente no contexto semiárido. A calibração e validação foram realizadas com base em séries temporais mensais de precipitação e vazão, divididas em dois períodos distintos: 1975 a 2002 (calibração) e 2003 a 2012 (validação).

Na bacia de Arneiroz, o desempenho do CN3S foi satisfatório, apresentando um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,843 na etapa de calibração, o que indica alta capacidade do modelo em representar a variabilidade das vazões observadas. Já na validação, o NSE foi de 0,671, valor ainda considerado aceitável para aplicações em estudos de planejamento, especialmente considerando as condições hidrológicas complexas da região semiárida. Os valores do Erro Quadrático Médio (EQM) reforçam esses resultados, com 16,53 mm na calibração e 8,70 mm na validação, indicando boa precisão na reprodução dos volumes de vazão.

Na bacia de Iguatu, o CN3S também demonstrou bom desempenho. O valor de NSE obtido na calibração foi de 0,778, levemente inferior ao registrado em Arneiroz, porém ainda dentro dos padrões esperados para uma simulação confiável. Na validação, o modelo obteve NSE de 0,718, evidenciando uma maior consistência no período de teste em comparação à bacia vizinha. O EQM foi de 37,38 mm na calibração e 59,01 mm na validação. Apesar de o EQM de validação ser mais elevado, o modelo manteve boa capacidade de replicar a tendência geral das vazões, mesmo com variações expressivas no regime de chuvas ao longo da série histórica.

Esses resultados mostram que o CN3S é um modelo robusto para simulação chuva-vazão nas condições semiáridas, conseguindo captar os padrões hidrológicos principais das duas bacias estudadas. A resposta positiva do modelo tanto na fase de calibração quanto na validação demonstra sua aplicabilidade prática, especialmente em contextos onde a simplicidade estrutural e a confiabilidade dos resultados são aspectos determinantes para a escolha do método.

5.2 *Interpretação dos Indicadores Estatísticos*

Na bacia de Arneiroz, o CN3S apresentou NSE de 0,843 na calibração e 0,671 na validação, evidenciando que o modelo foi capaz de ajustar-se bem aos dados históricos e, mesmo fora do período de calibração, manteve desempenho satisfatório. Em Iguatu, o NSE foi de 0,778 na calibração e 0,718 na validação, indicando um comportamento mais equilibrado

entre os períodos. Esses valores revelam que o modelo apresenta boa capacidade de generalização, principalmente em Iguatu, onde a diferença entre calibração e validação foi menor.

O Erro Quadrático Médio, por sua vez, representa a média dos quadrados das diferenças entre os valores observados e simulados. Trata-se de um indicador de precisão absoluta, sendo sensível a discrepâncias pontuais. Na bacia de Arneiroz, os valores de EQM foram 16,53 mm na calibração e 8,70 mm na validação, enquanto em Iguatu foram de 37,38 mm e 59,01 mm, respectivamente.

Ao considerar os dois indicadores em conjunto, percebe-se que o CN3S obteve melhores resultados em Arneiroz na fase de calibração, mas apresentou maior estabilidade em Iguatu na fase de validação. Isso sugere que o modelo conseguiu se ajustar com mais precisão à bacia de Arneiroz durante o período de treinamento, enquanto em Iguatu demonstrou maior robustez ao ser testado fora do período calibrado, ainda que com perdas na precisão dos volumes estimados.

5.3 Parâmetros Calibrados do CN3S

O processo de calibração do modelo CN3S exigiu a identificação dos valores ótimos para seis parâmetros fundamentais: CN1 (*Curve Number inicial*), ALFA, BETA (parâmetros de infiltração), e os coeficientes de recessão K0, K1 e K2, que representam diferentes componentes do escoamento (superficial, intermediário e base, respectivamente). A calibração foi realizada de forma individual para cada bacia, respeitando suas particularidades hidrológicas e morfométricas.

Os valores calibrados para a bacia de Arneiroz foram:

- CN1 = 18,33
- ALFA = 0,2
- BETA = 0,0037
- K0 = 0,2086
- K1 = 0,0239
- K2 = 0,4932

Já para a bacia de Iguatu, os parâmetros ajustados foram:

- CN1 = 11,72
- ALFA = 0,2
- BETA = 0,0046

- $K_0 = 0,0800$
- $K_1 = 0,0403$
- $K_2 = 0,5418$

Para validar a consistência dos resultados obtidos, realizou-se uma comparação com os valores calibrados em outras bacias nordestinas já estudadas na literatura. A tabela 3 apresenta os parâmetros calibrados nesses estudos, além da média, máximo e mínimo observados.

Tabela 1- Parâmetros calibrados de estudos passados

NOME DA BACIA	ÁREA(KM ²)	ESTADO	CN	ALFA	BETA	K0	K1	K2
PEDRA REDONDA	3340	PIAUÍ	24,00	0,200	0,0030	0,570	0,0105	0,42
GROAIRAS	2759	CEARÁ	26,50	0,200	0,0014	0,880	0,0110	0,95
MATRIZ ANTENOR NAVARRO	468	PERNAMBUCO	21,10	0,225	0,0026	1,000	0,0090	0,95
PAJEÚ	1257	PARAÍBA	15,50	0,200	0,0039	0,690	0,0180	0,40
SALOBRO RECURSO	6170	CEARÁ	16,50	0,200	0,0060	0,250	0,0060	0,40
POÇO DAS PEDRAS GRANJA	15,6	PERNAMBUCO	20,00	0,200	0,0034	0,990	0,0050	0,90
MAIOR MENOR MÉDIA	313	PIAUÍ	11,00	0,200	0,0018	0,810	0,0980	0,70
ARNEIROZ	3144	PARAÍBA	30,10	0,200	0,0040	0,550	0,0300	0,70
IGUATÚ	3993	CEARÁ	19,00	0,200	0,0009	0,730	0,0635	0,45
			30,50	0,225	0,0060	1,000	0,0980	0,95
			11,00	0,200	0,0009	0,250	0,0050	0,40
			21,42	0,203	0,0028	0,736	0,0260	0,64
			18,33	0,200	0,0037	0,209	0,0239	0,49
			11,72	0,200	0,0046	0,080	0,0403	0,54

Fonte: Autoria Própria 2025

Abaixo, destacam-se alguns pontos de análise:

- O CN1 médio dos estudos foi de 21,42, enquanto Arneiroz e Iguatu apresentaram 18,33 e 11,72, respectivamente, indicando consistência com a tendência de infiltração moderada a alta nas bacias estudadas;
- Os valores de ALFA (0,2) coincidem com a média dos estudos, reforçando a adequação do parâmetro à realidade do semiárido;
- Os parâmetros BETA (0,0037 e 0,0046) também se alinham com os limites verificados em outras calibrações (de 0,0009 a 0,006), o que reforça sua validade hidrológica;
- Os coeficientes de recessão K2, relacionados ao escoamento de base, apresentaram valores próximos da média geral (~0,54), o que sugere boa representação da drenagem de base nas duas bacias.

Essa comparação fortalece a robustez da calibração realizada, evidenciando que os valores encontrados neste trabalho não só são coerentes com a teoria e a prática hidrológica,

como também refletem adequadamente o comportamento hidrológico das bacias de Arneiroz e Iguatu, inseridas no contexto climático e geomorfológico do semiárido cearense.

5.4 Parâmetros Calibrados do SMAP

A calibração do modelo SMAP também exigiu a identificação dos valores ótimos para seus principais parâmetros hidrológicos, que representam processos de armazenamento, escoamento e perdas no sistema. Assim como no CN3S, a calibração foi conduzida separadamente para as duas bacias estudadas, respeitando suas características morfométricas e hidrológicas.

Para a bacia de Arneiroz, os valores calibrados foram:

- Sat = 967,1
- PEs = 3,40
- Crec = 0
- K = 3

Para a bacia de Iguatú, os valores calibrados foram:

- Sat = 1364,0
- PEs = 3,32
- Crec = 0
- K = 3

5.5 Comparação entre CN3S e SMAP

A comparação entre os modelos CN3S e SMAP permitiu avaliar não apenas o desempenho estatístico de cada abordagem na simulação chuva-vazão, como também aspectos operacionais e conceituais relevantes. Os dois modelos foram aplicados nas mesmas condições, utilizando os mesmos dados de entrada, período de calibração e validação, nas bacias de Arneiroz e Iguatu, localizadas no alto curso do rio Jaguaribe.

Na bacia de Arneiroz, os resultados mostraram que o CN3S obteve um NSE de 0,843 na calibração e 0,671 na validação, enquanto o SMAP apresentou 0,8237 e 0,7662, respectivamente. Embora o CN3S tenha superado ligeiramente o SMAP na calibração, o modelo SMAP apresentou melhor desempenho na validação, indicando maior estabilidade fora do período de ajuste. Isso pode ser atribuído à estrutura mais detalhada do SMAP, que tende a suavizar oscilações extremas e capturar padrões sazonais com maior fidelidade.

Na bacia de Iguatu, o CN3S registrou NSE de 0,778 na calibração e 0,718 na

validação, enquanto o SMAP apresentou valores de 0,7662 e 0,7085, respectivamente. Nesse caso, o CN3S teve desempenho levemente superior em ambos os períodos, mostrando uma boa capacidade de adaptação mesmo com sua estrutura simplificada.

Além dos indicadores estatísticos, foram consideradas as características operacionais dos modelos. O CN3S possui implementação simples, diretamente em planilhas eletrônicas, e com parâmetros facilmente interpretáveis. Essa abordagem torna o modelo particularmente atrativo em ambientes de baixa complexidade computacional, como escritórios de planejamento local ou universidades. Já o SMAP, apesar de mais robusto conceitualmente — com múltiplos reservatórios e representação detalhada de processos físicos —, exige maior esforço de calibração e interpretação, o que pode dificultar sua aplicação em contextos menos estruturados.

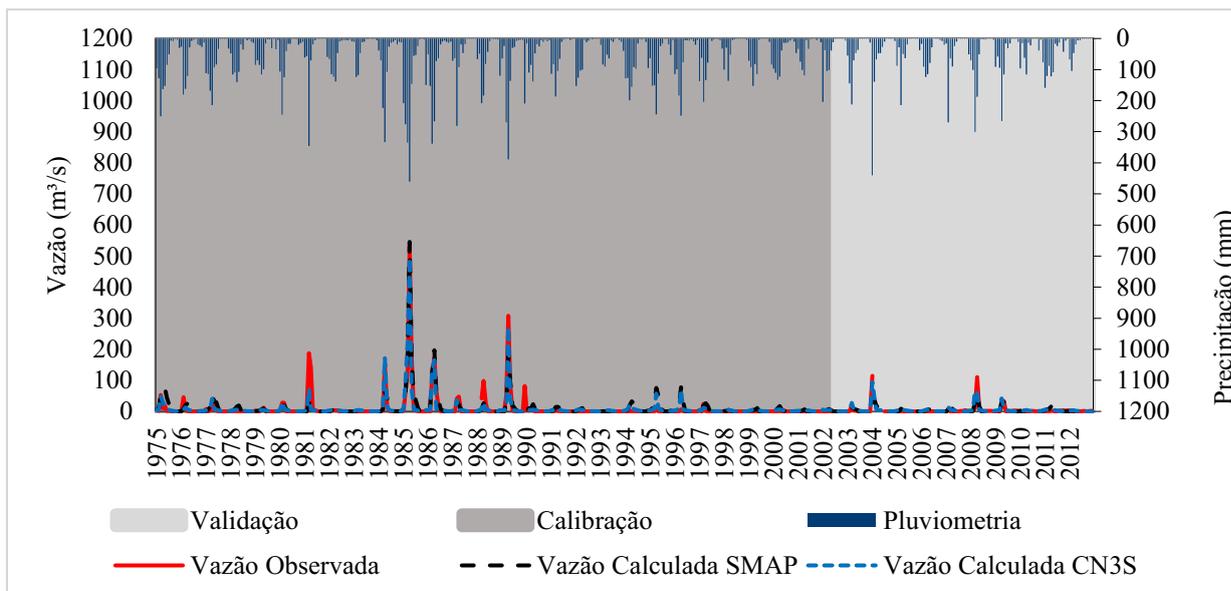
Outra diferença importante refere-se à sensibilidade dos modelos aos eventos críticos. O CN3S, por utilizar o método do *Curve Number* como base para estimativa de escoamento, responde mais rapidamente a variações bruscas de precipitação, o que pode ser vantajoso para capturar picos de cheia. Por outro lado, o SMAP, com maior inércia hidrológica, tende a suavizar tais extremos, o que pode representar uma limitação quando a análise exige foco em eventos máximos.

Em síntese, os resultados apontam que o CN3S demonstrou desempenho comparável ou superior ao SMAP, especialmente em termos de simplicidade, velocidade de calibração e aplicabilidade prática. Embora o SMAP tenha mantido uma boa consistência na validação em Arneiroz, o CN3S obteve desempenho competitivo em ambas as bacias e períodos, justificando sua escolha como modelo prioritário neste estudo.

5.6 Análise dos gráficos

O gráfico 3 apresenta o hidrograma da Bacia de Arneiroz, destacando os períodos de calibração (em cinza escuro) e validação (em cinza claro). Observa-se que, embora ambos os modelos tenham acompanhado a tendência da vazão observada, o CN3S apresentou resultados mais ajustados aos picos, enquanto o SMAP tende a suavizar os extremos, o que é característico do seu comportamento mais amortecido frente a eventos intensos.

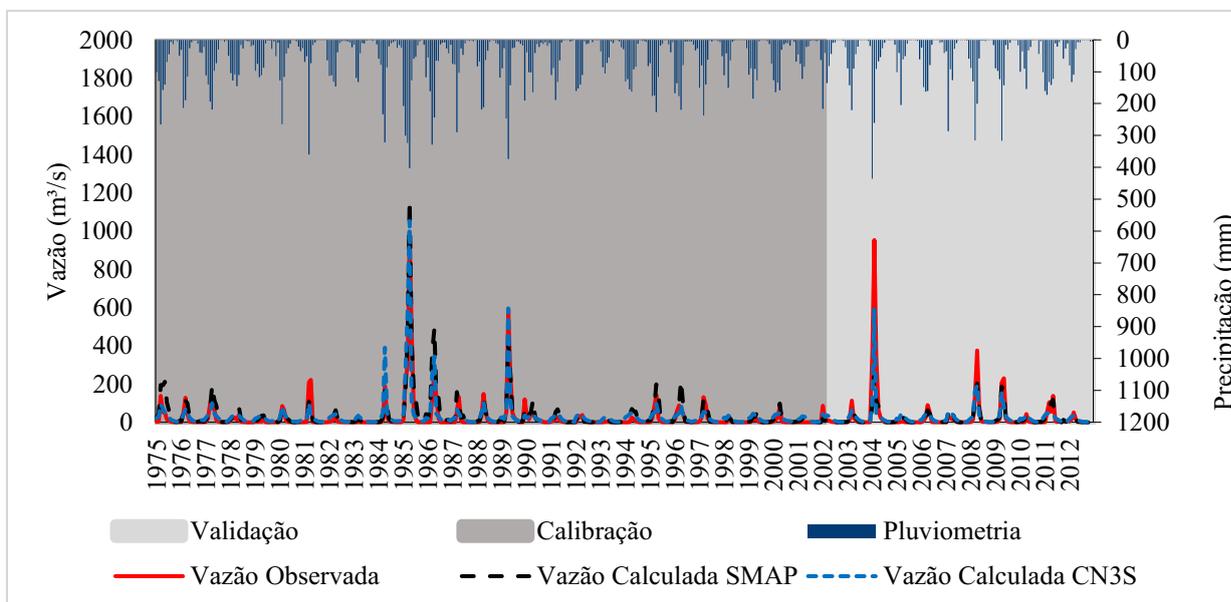
Gráfico 3 - Gráfico Comparativo de Arneiroz



Fonte: Autoria Própria 2025

O gráfico 4, referente à Bacia de Iguatu, mostra um desempenho mais equilibrado entre os dois modelos. Apesar de ambos acompanharem de forma satisfatória a evolução da série hidrológica, o modelo SMAP teve ligeira vantagem na calibração, enquanto o CN3S respondeu melhor à variabilidade da vazão durante a validação, captando picos expressivos como os ocorridos em 2004 e 2008.

Gráfico 4 - Gráfico Comparativo de Iguatú



Fonte: Autoria Própria 2025

5.7 Vantagens Operacionais do CN3S e do SMAP

A análise das bacias de Arneiroz e Iguatu evidenciou que tanto o CN3S (Curve Number Three Steps) quanto o SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) apresentam

vantagens operacionais relevantes, que justificam seu uso em estudos de simulação hidrológica no semiárido brasileiro.

O CN3S destaca-se por sua simplicidade estrutural, podendo ser implementado diretamente em planilhas eletrônicas, como o Excel. Essa característica dispensa softwares especializados ou domínio de linguagens de programação, favorecendo sua aplicação por técnicos e estudantes com conhecimentos básicos. Além disso, o uso do Solver como ferramenta de calibração garante praticidade e reprodutibilidade, já que os cálculos são transparentes e rastreáveis em cada etapa.

Por outro lado, o SMAP apresenta como principal vantagem a robustez conceitual, sendo amplamente utilizado em pesquisas e órgãos de gestão de recursos hídricos. Sua estrutura, baseada em reservatórios que representam a camada superficial e subterrânea, permite captar de forma mais detalhada o comportamento hidrológico de diferentes ambientes. Embora o modelo exija maior tempo de familiarização e calibração, sua formulação consolidada confere credibilidade e aceitação institucional, tornando-o especialmente adequado em contextos de planejamento de longo prazo e estudos oficiais.

Enquanto o CN3S mostra-se mais acessível, leve e adaptável a diferentes bacias, o SMAP oferece maior sofisticação e consolidação científica, ainda que a custo de maior complexidade. Ambos, portanto, apresentam potenciais complementares: o CN3S, para diagnósticos rápidos e ambientes com restrições técnicas; o SMAP, para análises aprofundadas e de maior robustez metodológica.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar a aplicação do modelo hidrológico CN3S na simulação do processo chuva-vazão em duas sub-bacias do alto curso do rio Jaguaribe, localizadas no semiárido nordestino: Arneiroz (36020000) e Iguatu (36160000). Através da calibração e validação do modelo em ambas as bacias, foi possível avaliar sua capacidade de representação hidrológica e compará-lo ao modelo SMAP.

Com base nas séries de 1974 a 2012, os modelos CN3S e SMAP foram calibrados e validados para ambas as bacias. No caso do CN3S, a calibração foi realizada por meio do uso de planilhas eletrônicas, com o auxílio da ferramenta solver e tendo o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) como função objetivo. O modelo SMAP, por sua vez, foi aplicado no mesmo intervalo e nas mesmas condições, a fim de permitir a comparação direta de desempenho.

Os resultados indicaram que o CN3S obteve desempenho superior em relação ao SMAP, apresentando valores mais elevados do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e menores valores de erro quadrático médio (EQM). Isso evidencia maior aderência do CN3S às vazões observadas, refletindo sua eficácia na simulação do escoamento superficial nas condições hidroclimáticas da região estudada.

A estrutura conceitual simplificada do CN3S, aliada à sua incorporação explícita da umidade antecedente, demonstrou-se particularmente adequada às características das bacias analisadas. Tal sensibilidade favorece uma calibração mais precisa, permitindo representar de forma fiel o comportamento hidrológico em regiões com alta variabilidade pluviométrica.

Além do desempenho técnico, destaca-se a praticidade do CN3S em ambientes operacionais. Sua implementação em planilhas eletrônicas, com menor exigência de parâmetros e interpretação mais direta, o torna uma ferramenta acessível em contextos com restrições de dados e infraestrutura técnica — ao contrário do SMAP, que demanda maior conhecimento técnico e ajuste cuidadoso de suas variáveis internas.

Conclui-se, portanto, que o modelo CN3S não apenas oferece melhor desempenho estatístico frente ao SMAP, como também se mostra mais eficiente do ponto de vista prático e operacional. Sua adoção em estudos hidrológicos no semiárido se justifica pela combinação de robustez, simplicidade e confiabilidade.

Como perspectivas futuras, recomenda-se expandir a aplicação do CN3S para outras bacias do semiárido, testar sua performance com dados em escalas temporais menores (diárias ou decendiais) e desenvolver análises de sensibilidade e incerteza para consolidar sua

utilização em cenários de planejamento e gestão de recursos hídricos.

7 REFERÊNCIAS

ANA. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Nota Técnica nº 027/2012/SPR-ANA. Brasília, 2012.

BARD, Y. **Nonlinear Parameter Estimation**, Academic, Orlando, Fla., 1974.

BUCHIANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2004.

CANEDO, P. M. **Hidrologia Superficial**. In: Engenharia Hidrológica, Rio de Janeiro, ABRH, Ed. da UFRJ, vol. 2, 1989.

CIRILO, J. A. **Crise hídrica: desafios e superação**. Revista USP, São Paulo, v. 106, p. 45–48, 2015.

COGERH. **Projeto gerenciamento de risco, alocação e operação do sistema de recursos hídricos**. 2021

DISKIN, M. H. ; SIMON, E. **A procedure for the Selection of Objectives Functions for Hydrologic Simulation Models**, *Journal of Hydrology*, 34 (1/2), 129-149, 1977.

FAYAL, M. de A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada wavelet**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dissertação, Departamento de Engenharia Elétrica, 2008.

FLEMING, G. **Computer Simulation Techniques in Hydrology**, American Elsevier Publ. Co. Inc, N. Y., 1975, 334p.

FREITAS, M. A. S.; PORTO: **Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado às Bacias do Semi-Árido Nordeste**, *Revista Tecnologia – UNIFOR*, vol 11, 45-49. 1990.

GRANT, S. B.; SAPHORES, J.-D.; FELDMAN, D. L.; HAMILTON, A. J.; FLETCHER, T. D.; COOK, P. L. M.; STEWARDSON, M.; SANDERS, B. F.; LEVIN, L. A.; AMBROSE, R. F.; DELETIC, A.; BROWN, R.; JIANG, S. C.; ROSSO, D.; COOPER, W. J.; MARUSIC, I. **Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability**. *Science*, [s. l.], v. 337, n. 6095, p. 681–686, 2012.

GONÇALVES, R. C. **Modelagem hidrológica do tipo de chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL – Estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

JAEGER, W. K.; AMOS, A.; BIGELOW, D. P.; CHANG, H.; CONKLIN, D. R.; HAGGERTY, R.; LANGPAP, C.; MOORE, K.; MOTE, P. W.; NOLIN, A. W.; PLANTINGA, A. J.; SCHWARTZ, C. L.; TULLOS, D.; TURNER, D. P. **Finding water scarcity amid abundance using human–natural system models**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [s. l.], v. 114, n. 45, p. 11884–11889, 2017.

KUSTER, J. L.; MIZE, J. H. **Optimization Techniques with FORTRAN**, McGraw Hill Book Company, 1976.

LINSLEY, R. K. Jr. **Rainfall-Runoff Models – An Overview**. In: **Rainfall-Runoff Relationships**, edited by V. P. Singh, Water Resources Publications, p. 32, 1981.

LIMA, L. S. de. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem Dinamica EGO**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2011.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP – A simplified hydrologic model, applied modelling in catchment hydrology**. Littleton: V. P. Singh, 1982.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. **Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.1, p.147-155, 2003.

MARCOS A. S. F. **Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado a Bacias do Semi-Árido Nordestino.** Article in Revista Tecnologia, 1990.

MARTINEZ, C. A. E. **Calibração automática de modelo hidrológico com algoritmo baseado no comportamento de formigas.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2014.

MISHRA, S.; JAIN, M. K.; SINGH, V. P. **Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture.** *Water Resources Management*, v. 18, p. 567–589, 2004.

MOLINOS-SENANTE, M.; DONOSO, G. **Water scarcity and affordability in urban water pricing: A case study of Chile.** *Utilities Policy*, [s. l.], v. 43, p. 107–116, 2016.

O'DONNELL, T. ; CANEDO, P. M. **The Reliability of Conceptual Basin Model Calibration,** Proceedings of the Oxford Symposium on Hydrological Forecasting, IAHS, n° 129, 1980.

OLIVEIRA, G. P. C. **Modelagem hidrológica apoiada por sistema de informações geográficas.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2015.

PILGRIM, D. H. et al. **Effects of Catchment Size on Runoff Relationship,** *Journal of Hydrology*, 58, 247-264, 1982.

RETNAM, M. T. P. ; WILLIAMS, B. J. **Input Errors in Rainfall-Runoff Modeling,** *Mathematics and Computers in Simulation*, 30, 119-131, North-Holland, 1988.

SANTOS, L. L. **MODELOS HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 3, p. 1–19, 2009.

SEIBT, A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Botafogo–Goiânia–Go.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Goiânia – GO. 2013.

SHERMAN, L. W. **Streamflow from Rainfall by the Unit-Graph Method,** *Eng. News Record*, 108, 1932.

SOROOSHIAN, S. ; GUPTA, V. K. **The Analysis of Structural Identifiability: Theory and Application to Conceptual Rainfall-Runoff Models,** *Water Resources Research*, 21(4), 487-495, 1985.

SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. K. ; FULTON, J. C. **Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Technique for Conceptual Rainfall-Runoff Models: Influence of Calibration Data Variability and Length of Model Credibility,** *Water Resources Research*, 10(1), 251-259, 1983.

TABORGA, J.; FREITAS, M. A. S. **Simulação da Lâmina de Escoamento Mensal.** In: III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 1987, Salvador. Anais do III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, v. 2, p. 558-570.

TODINI, E. **Rainfall-Runoff Modelling – Past, Present and Future,** *Journal of Hydrology*, 100, 341-352, 1988.

TUCCI, C. E. M. et al. **Avaliação da Distribuição Espacial da infiltração.** *Revista Brasileira de Engenharia*, vol. 6, nº 02, 1988.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos: conceitos básicos.** 2005.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. **National Engineering Handbook**, Section 4: Hydrology. 1954.

VIESMANN, W. et al. **Introduction to Hydrology**, IEP a DUN-Donnelley Publisher, New York, 1977, 704p.