

ESTUDO MORFOMÉTRICO E HIDROLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO REAL¹

Dayane Oliveira Santos Melo²; Ludmilson Abritta Mendes³

RESUMO: O conhecimento das variáveis hidrológicas é imprescindível para a gestão adequada dos recursos hídricos. Os modelos hidrológicos são capazes de representar o comportamento de uma bacia hidrográfica de forma complexa, permitindo análises detalhadas a partir de seus resultados. A descrição fisiográfica da bacia é uma das premissas básicas para o uso destes modelos. Visando apresentar informações não exibidas na literatura, o presente trabalho objetiva realizar um estudo morfométrico e hidrológico da bacia hidrográfica do rio Real, localizada nos estados de Sergipe e Bahia, com a integração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o modelo chuva-vazão SMAP. A delimitação automática com o uso do SIG apresentou precisão satisfatória com baixo erro, possibilitando o cálculo de tempo de concentração através dos métodos de Kirpich, Corpo de Engenheiros dos EUA e Dooge. O modelo chuva-vazão teve um bom desempenho na validação, com resultados condizentes para a bacia. Os testes estatísticos revelaram comportamento não estacionário para série de vazão estendida, com tendência de decréscimo a partir da década de 70. Ao calcular a disponibilidade hídrica com a série estendida, verificou-se redução da vazão mínima na bacia, principalmente nos meses úmidos.

ABSTRACT: Knowledge of hydrological variables is essential for the proper management of water resources. Hydrological models are able to represent the behavior of a watershed in a complex way, allowing detailed analysis from their results. The physiographic description of the basin is one of the basic premises for the use of these models. Aiming to present information not shown in the literature, the present work aims to conduct a morphometric and hydrological study of the Real river basin, located in the states of Sergipe and Bahia, with the integration of the Geographic Information System (GIS) and the rain-flow model SMAP. Automatic delimitation with GIS presented satisfactory accuracy with low error, allowing the calculation of concentration time by the methods of Kirpich, US Corps of Engineers and Dooge. The rain-flow model performed well in the validation, with results consistent with the basin. Statistical tests revealed non-stationary behavior for extended flow series, with a decreasing trend from the 70's. When calculating water availability with the extended series, there was a reduction of the minimum flow in the basin, especially in the humid months.

Palavras-chave: recursos hídricos, SIG, modelo chuva-vazão, disponibilidade hídrica

¹ Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Av. Marechal Rondon s/n, Bairro Rosa Elze, São Cristóvão-SE. Aprovado em agosto de 2019.

² Graduada em Engenharia Civil, Laboratório de Modelagem Matemática em Engenharia Civil (LAMEC), Universidade Federal de Sergipe (UFS), Av. Marechal Rondon s/n, Bairro Rosa Elze, São Cristóvão-SE. E-mail: dayaneosmelo@gmail.com

³ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Modelagem Matemática em Engenharia Civil (LAMEC), Universidade Federal de Sergipe (UFS), Av. Marechal Rondon s/n, Bairro Rosa Elze, São Cristóvão-SE. E-mail: ludmilsonmendes@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A realização de estudos hidrológicos é essencial para que haja uma estimativa adequada da disponibilidade hídrica nas bacias para a outorga de uso dos recursos hídricos. De acordo com Cruz e Tucci (2008), o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos é uma necessidade iminente que tende a buscar um balanço frente às demandas desejadas de uso da água e de manter a integridade ambiental da bacia ao longo do tempo.

Para o desenvolvimento de estudos hidrológicos e ambientais, é primordial o conhecimento das variáveis que influenciam o regime hidrológico da região (COLLISHONN; DORNELLES, 2015). A descrição detalhada das características morfométricas de uma bacia, tais como área, perímetro, comprimento do canal principal, declividade, ordem dos rios e índices de forma e compacidade, é um dos requisitos básicos para o estudo através de modelagem hidrológica.

Uma forma de se obter ou determinar as características morfométricas de uma bacia é através da sua delimitação em cartas topográficas, um método cada vez mais obsoleto, o qual vem sendo substituído pelo uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG). Leite (2013) explica que o SIG é um conjunto de *hardwares* e *softwares* que utilizam *rasters* (imagens com informações atribuídas ao pixel, de forma matricial) e *vectors* (dados cujo foco é a precisão espacial), para compor informações de diversas fontes georreferenciadas, os quais fornecem formas digitais consistentes de representação do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) gerados a partir de informações da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM).

Os dados de elevação SRTM são resultados da missão espacial realizada em conjunto pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imaging and Mapping Agency*) para obter um modelo digital da superfície terrestre, entre 60° N e 56° S, gerando modelos tridimensionais com amplitude de grade de 30 e 90 metros (MEDEIROS et al., 2009).

Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas por meio de dados SRTM por apresentarem modelos altamente precisos com cobertura global (JARVIS et al., 2004). Oliveira et al. (2010), que realizou a delimitação da bacia hidrográfica do Ribeirão Salobra na região central do Estado do Mato Grosso do Sul em ambiente SIG, concluiu a partir de seu trabalho que o processamento de dados SRTM demonstrou-se ser uma ferramenta viável, pois minimiza custos e tempo de execução, contribuindo na gestão e

gerenciamento dos recursos hídricos, além de ser compatível com a delimitação manual, apresentando pequenas variações nas características da bacia.

A escolha de variáveis e séries temporais que definem o comportamento hidrológico de um rio proporciona caracterização da disponibilidade hídrica na bacia. As curvas de permanência são uma ferramenta gráfica de análise do regime hidrológico da bacia até a seção fluvial de referência (PINHEIRO; NAGHETTINI, 2010).

Para simular o comportamento de uma bacia hidrográfica, utilizam-se modelos com uma série de equações com dados de entrada, como uso e ocupação do solo, precipitação ao longo do tempo e outras variáveis climáticas, gerando como resultados informações hidrológicas em vários pontos da bacia estudada, como a vazão nos rios (FAN; COLLISCHONN, 2014).

De acordo com Tucci (2005), os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de estender, de forma representativa, as séries hidrológicas de vazão para novos cenários nas bacias. A aplicação destes modelos tem sido bastante difundida, por apresentar bons resultados na representação do comportamento hidrológicos das bacias, tanto na simulação como na previsão de cenários hipotéticos (MARINHO FILHO et al., 2012).

Dentre os modelos hidrológicos, destacam-se os modelos distribuídos de transformação chuva-vazão, os quais representam os processos hidrológicos de precipitação e escoamento em uma bacia hidrográfica (FAN; COLLISCHONN, 2014). Araújo et al. (2009) explica que o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) tem sido amplamente utilizado em modelagens chuva-vazão por ser um modelo simples e de fácil calibração, caracterizando-se como um modelo determinístico capaz de estimar dados hidrológico e características do solo em uma bacia hidrográfica.

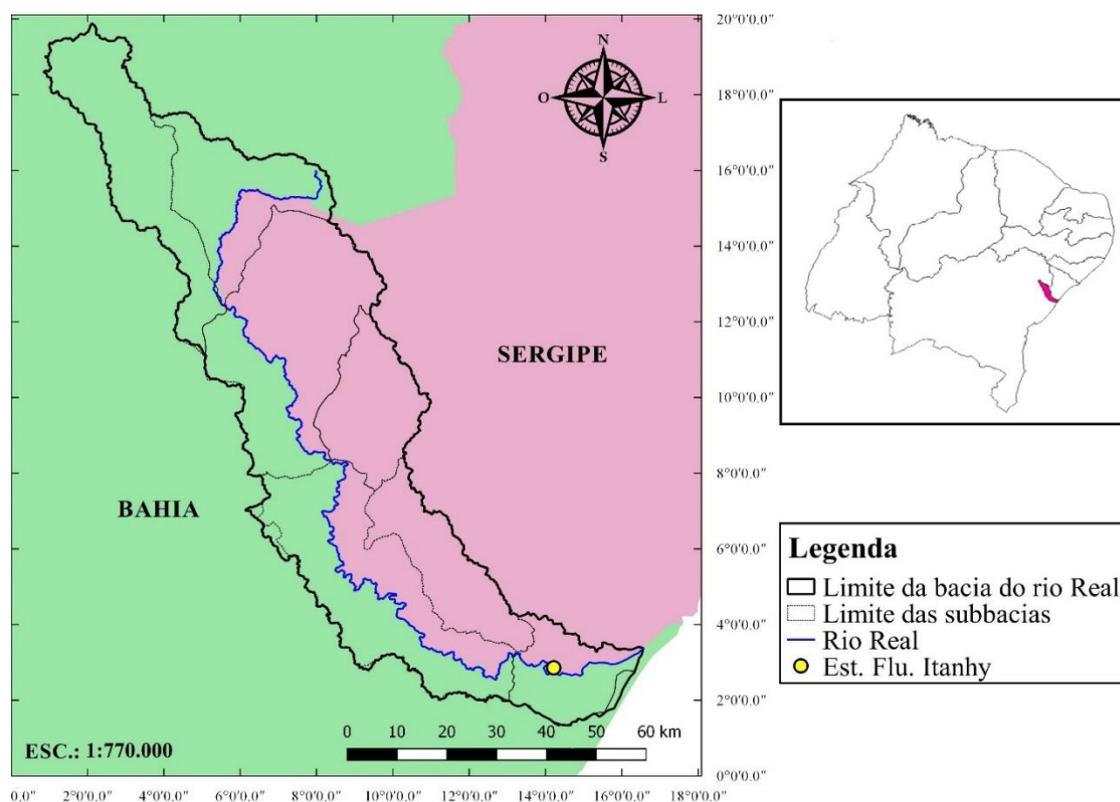
Partindo do pressuposto que há uma carência de informações e dados oficiais sobre a bacia hidrográfica do rio Real, localizada nos estados da Bahia e Sergipe, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo fisiográfico e hidrológico desta bacia. São objetivos específicos determinar as características fisiográficas da bacia, avaliar o comportamento das séries de precipitação e de vazão quanto à estacionariedade e determinar a disponibilidade hídrica da bacia.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Real encontra-se limitada ao sul pela bacia do Itapicuru e ao norte pela bacia do Vaza Barris, ocupando 6,03% da área da sub-bacia 50, região que engloba parte nordeste do estado da Bahia e Sudoeste de Sergipe. O rio principal da bacia, o rio Real, banha os estados da Bahia e Sergipe, portanto é um rio federal. O rio nasce na região dos municípios de Poço Verde – SE e desagua no oceano Atlântico na vila de Mangue Seco – BA, contendo como principais afluentes os rios Mocambo e Baixa do Tubarão (CPRM, 2013). Na Figura 1 é possível visualizar a localização da bacia hidrográfica do rio Real, e em destaque, o seu canal principal, as sub-bacias que a integram e a localização da estação fluviométrica Itanhy (50290000), analisada neste estudo.

Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do rio Real



Fonte: adaptado de ANA (2018)

Morfometria da bacia hidrográfica

A delimitação da bacia hidrográfica do rio Real foi realizada através do processamento dos dados SRTM no *software* GrassGIS 7.4.1. Para tal, foram levantadas

as cartas topográficas de códigos SC-24-Z-A, SC-24-Z-C e SC-24-Z-D, obtidas no sítio Brasil em Relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) que disponibiliza as cartas no formato *raster*, imagens que apresentam informações vinculadas a cada pixel. A resolução espacial para as cartas da SRTM é de 90x90 m, com cada pixel representando uma área de 8100 m², sendo satisfatório para delimitação de grandes bacias, como é o caso deste trabalho. As cartas disponibilizadas na EMBRAPA cobrem a superfície brasileira com o *Datum* WGS-84, logo foi necessário alterar para o *Datum* oficial usado pelo Brasil, o SIRGAS 2000.

A delimitação automática seguiu a metodologia proposta por Benigno (2013), gerando como resultados *rasters* e *vectors* com informações de limite da bacia, rede de drenagem e o rio principal. Através destes dados, foi possível determinar algumas características morfométricas da bacia, como comprimento do rio principal, área de drenagem, perímetro, declividade média e declividade “S10/85”, densidade de drenagem, tempo de concentração, ordenamento dos cursos d’água segundo a classificação de Horton-Strahler e os índices de forma e compacidade.

Tais dados foram extraídos com o uso do *software* QGIS 2.18.21, uma ferramenta bastante utilizada no meio acadêmico por ser livre e gratuita. As informações de área, perímetro e comprimento do rio principal foram encontrados através dos atributos associados aos *vectors* no QGIS.

O comprimento de drenagem foi obtido pela soma do comprimento do rio principal e de todos os seus afluentes e subafluentes. A declividade média e a declividade “S10/85” foram obtidas por meio do *vector* do rio principal e do *raster* da altitude. O valor da declividade “S10/85”, que é a declividade média em 85% do rio, é obtido com a construção de um *vector* auxiliar que começa a uma distância de 15% do comprimento do rio principal da cabeceira do rio e termina a uma distância de 10% da foz do rio principal.

Os índices de forma e compacidade foram calculados pelas Equações (1) e (2) e a densidade de drenagem pela Equação (3):

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (3)$$

em que K_f é o fator de forma; K_c o índice de compacidade; A a área da bacia em km^2 ; L o comprimento axial da bacia em km; P o perímetro da bacia em km; D_d a densidade de drenagem em km/km^2 ; e L_i o comprimento do rio i contido na bacia em km.

Para o cálculo do tempo de concentração, foram escolhidos três métodos para o cálculo de maneira a comparar os resultados. Os métodos utilizados foram Dooge, Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América e de Kirpich, apresentados nas Equações (4), (5) e (6) respectivamente (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

$$t_c = 21,88 \times \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (4)$$

$$t_c = 11,46 \times \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}} \quad (5)$$

$$t_c = 3,99 \times \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0,385} \quad (6)$$

sendo t_c o tempo de concentração em minutos; L é o comprimento do curso d'água principal em km; A a área da bacia em km^2 e S a declividade do curso d'água do rio principal em m/m.

Monitoramento hidrológico

Para a realização do estudo hidrológico, analisaram-se os dados consistidos do posto de medição fluviométrica Itanhy (50290000) e de cinco postos pluviométricos escolhidos em função da sua localização, proximidade com o curso do rio principal, sua distribuição na bacia e representatividade de dados: Poço Verde (01038000), Bonfim (01137011), Rio Real (01137033), Cícero Dantas (01038004) e Itabaianinha (01137020).

A Tabela 1 apresenta as informações dos postos obtidas do site HidroWeb (ANA, 2019) com auxílio do programa Hidro 1.4 para acesso aos dados das séries pluviométricas e fluviométricas.

Os dados de evapotranspiração da região foram obtidos das estações climatológicas Itabaianinha (01137021) e Rio Real (01137033), disponíveis no site HidroWeb (ANA, 2019). Como havia escassez destes dados em alguns anos de ambos os postos, foi feita uma média aritmética com os valores mensais de cada estação.

Tabela 1: Estações hidrometeorológicas utilizadas no estudo

Nome	Tipo	UF	Código	Abrangência*	Latitude	Longitude	Operador
Itanhy	Fluviométrico	BA	50290000	1966-2014	-11.5397	-37.5681	CPRM
Poço Verde	Pluviométrico	SE	01038000	1938-1984	-10.7086	-38.1775	DNOCS
Bonfim	Pluviométrico	SE	01137011	1913-1987	-11.0500	-37.8500	DNOCS
Itabaianinha	Pluviométrico	SE	01137020	1913-1978	-11.2667	-37.7833	DNOCS
Cícero Dantas	Pluviométrico	BA	01038004	1912-1989	-10.5950	-38.3858	DNOCS
Rio Real	Pluviométrico	BA	01137033	1914-1988	-11.4667	-37.9333	DNOCS

*Incluindo meses com falhas

Fonte: ANA (2019)

Para preenchimento das falhas de observação dos registros pluviométricos, foi utilizado o método da Ponderação Regional, considerado por Bertoni e Tucci (2007) como um processo simplificado de preenchimento de falhas que objetiva à homogeneidade dos dados de uma determinada bacia. Para o preenchimento de um posto y deve-se selecionar um grupo de postos que apresentem entre três e dez anos de série, utilizando a Equação (7).

$$y = \frac{1}{3} \left[\frac{x_1}{X_{m1}} + \frac{x_2}{X_{m2}} + \frac{x_3}{X_{m3}} \right] \cdot y_m \quad (7)$$

onde y é precipitação do posto Y que deseja ser estimada; x_1 , x_2 e x_3 as precipitações referentes ao mês que se deseja preencher, observadas nas 3 estações vizinhas mais próximas que atendiam aos requisitos; y_m a precipitação média do posto Y ; e X_{m1} , X_{m2} , X_{m3} as precipitações médias nas três estações vizinhas.

Para o cálculo da precipitação média, optou-se por utilizar o Método de Thiessen, que consiste em calcular a área de influência de cada posto dentro da bacia e considerá-la como peso numa média ponderada das precipitações observadas nos postos. O cálculo da área de influência dos postos na bacia em estudo foi feito através do *software* QGIS com a função “Polígono de Voronoi”.

Modelo SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica desenvolvido por Lopes et al. (1982). Este modelo possui como principais vantagens a estrutura relativamente simples e o uso de pequeno número de parâmetros que são relacionados às características físicas da bacia (KAVISKI et al., 2007).

Esse modelo utiliza como dados de entrada a precipitação mensal (P) em mm; a evapotranspiração potencial (EP) mensal em mm; área de drenagem em km^2 ; o teor de umidade inicial (T_{uin}) e escoamento básico inicial (E_{bin}) em m^3/s . Já os parâmetros do modelo a serem calibrados são: capacidade de saturação do solo (Sat) em mm, que varia de 400 a 5000; escoamento superficial (Pes) variando entre 0,1 e 10; o coeficiente de recarga ($Crec$) que varia de 0 a 70 e a constante de recessão do escoamento base (Kkt) variando de 1 a 6 (LOPES, 1999).

Segundo Lopes (1999) a série de calibração deve conter dados de vazão média mensal de 2 a 9 anos, iniciando a calibração nos períodos mais secos, pois são neles que a umidade do solo e a vazão básica terão valores mínimos.

Na otimização para estimativas de parâmetros em uma simulação hidrológica, é fundamental o estabelecimento da função objetivo, de forma a aproximar o máximo possível o hidrograma calculado com o observado (BUCHIANERI, 2004). Para a calibração neste estudo, a função objetivo foi maximizar o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, calculado por:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \quad (8)$$

em que E_m é o evento observado; E_s , o evento simulado pelo modelo; \bar{E}_s , a média do evento observado no período de simulação; e n , o número de eventos.

Segundo Collischonn (2001) o valor de E_{NS} é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, por isto, quando E_{NS} é próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para cheias. O desempenho do modelo é considerado bom quando o valor do E_{NS} é maior que 0,75. Para valores de E_{NS} entre 0,36 e 0,75 o desempenho é considerável aceitável, enquanto que para valores de E_{NS} inferiores a 0,36 rejeita-se o modelo.

Calibração e Validação

Para a calibração e validação do estudo, foram considerados os períodos em que as vazões médias anuais do posto fluviométrico de Itanhy (50290000) e as médias ponderadas dos dados de precipitação convergissem continuamente em anos com diferentes comportamentos, secos e úmidos, e que atendessem as recomendações de Lopes (1999) de no mínimo dois anos de duração. A Tabela 2 apresenta o período utilizado para calibração e validação do modelo neste estudo.

Tabela 2: Período utilizado para calibração e validação do modelo SMAP

Série	Mês Inicial	Mês Final
Calibração	Janeiro/1972	Dezembro/1974
Validação	Janeiro/1975	Dezembro/1977

Fonte: Autora (2019)

A calibração dos quatro parâmetros básicos do modelo (Sat, Pes, Crec e Kkt) foi realizada através do método de solução *Generalized Reduced Gradient* (GRG) Não Linear da Função Solver, pela planilha eletrônica do Microsoft Excel, enquanto que os parâmetros iniciais eram modificados manualmente. Esta solução, proposta por Ladson et al. (1978) trata de resolver problemas de otimização não lineares, onde a função objetiva pode ter ou não linearidades de qualquer forma, contanto que essa função seja diferenciável.

Após realizados os ajustes, a validação do modelo foi realizada mantendo fixo os quatro parâmetros calibrados, modificando apenas os dados de precipitação e vazão observada para o período proposto. As variáveis da condição inicial também foram modificadas para se adequarem à condição inicial do solo no período de validação.

Cálculo da Disponibilidade Hídrica

A curva de permanência foi escolhida para o estudo de análise de disponibilidade hídrica nesta bacia devido a sua representatividade dos períodos de estiagem. Esta curva pode ser estabelecida com base em valores diários, semanais ou mensais (TUCCI, 2015).

A permanência de uma vazão representa a probabilidade de ocorrência da vazão média diária do rio ser maior ou igual a um determinado valor no período amostral. Logo, a curva de permanência é o complemento da densidade cumulativa de probabilidade de não excedência das vazões médias diárias (CRUZ; TUCCI, 2008).

Considerando que os critérios de outorga utilizados em Sergipe são baseados na vazão de permanência $Q_{90\%}$, ou seja, que o valor de vazão de um corpo hídrico é igualado ou superado 90% do tempo, o cálculo desta vazão foi realizado pela função empírica “Percentil”, da planilha eletrônica do Microsoft Excel. O percentil 90% corresponde à vazão que é igualada ou superada em 90% do tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

Estacionariedade

Foi realizada a análise da estacionariedade das séries de precipitações acumuladas anuais dos postos pluviométricos e das séries de médias anuais do posto fluviométrico deste estudo.

Para avaliar a estacionariedade das séries pluviométricas e fluviométricas, foi utilizado o teste de Spearman, definido por Santos et al. (2016) como um teste não paramétrico baseado em classificação, utilizado para análises de tendências das séries temporais independentes e identicamente distribuídos.

determinado pela Equação (9), onde m_t é a ordem de classificação da sequência X_t ; T_t o índice de tempo e N a quantidade total de índices de tempo.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (9)$$

Sob a hipótese nula de que não há correlação entre m_t e T_t e para $N > 10$, a distribuição de r_s tende a ser aproximada por uma Normal de média 0, cuja variância é representada na Equação (10).

$$Var[r_s] = \frac{1}{N - 1} \quad (10)$$

Tendo em vista que o teste em questão possui caráter bilateral, não se rejeita a hipótese nula se $|T| > z_{1-\alpha/2}$ a um nível de significância α (NAGUETTINI; PINTO, 2007).

Para as séries de chuva e vazão que apresentaram não estacionariedade pelo teste de Spearman, utilizou-se o teste de Pettitt para verificar o ponto de mudança significativo da série. Para este estudo, foi considerado um nível de confiança de 95%, ou seja, para rejeição da hipótese nula do teste, é necessário obter um valor-p que deve ser menor ou igual a 0,05.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização morfométrica

A partir das delimitações automáticas da bacia hidrográfica do rio Real, foi possível obter os resultados apresentados nas Figuras 2 - 5. Os valores dos indicadores morfométricos das bacias estudadas estão apresentados na Tabela 3.

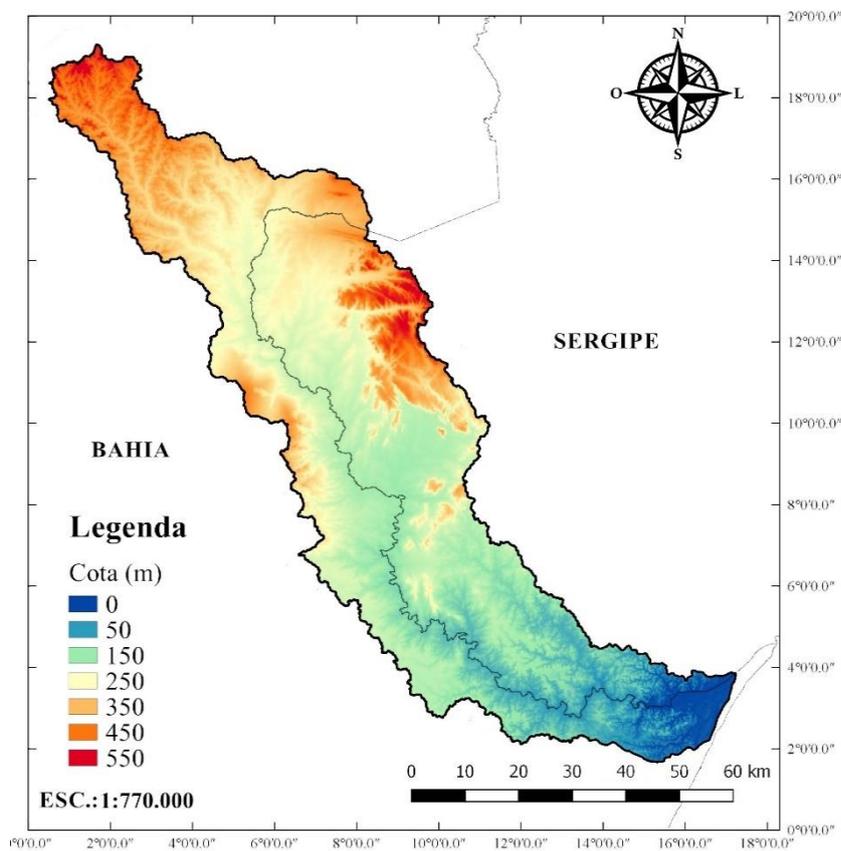
Tabela 3: Características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Real

Características físicas	Bacia Hidrográfica do Rio Real				
	SRTM	CPRM (2013)	Variação (%)	ANA (2018)	Variação (%)
Área de Drenagem (km ²)	4808,16	4972,0	3	4950,48	3
Perímetro (km)	595,60	-	-	524,26	14
Comprimento do talvegue principal (km)	269,2	246,0	10	233,1	16
Coefficiente de compacidade	2,41	-	-	2,086	16
Fator de forma	0,066	0,082	20	0,091	28
Ordem dos rios	6	NA*	-	NA*	-
Densidade de drenagem km/km ²	0,957	NA*	-	NA*	-

*Não se aplica

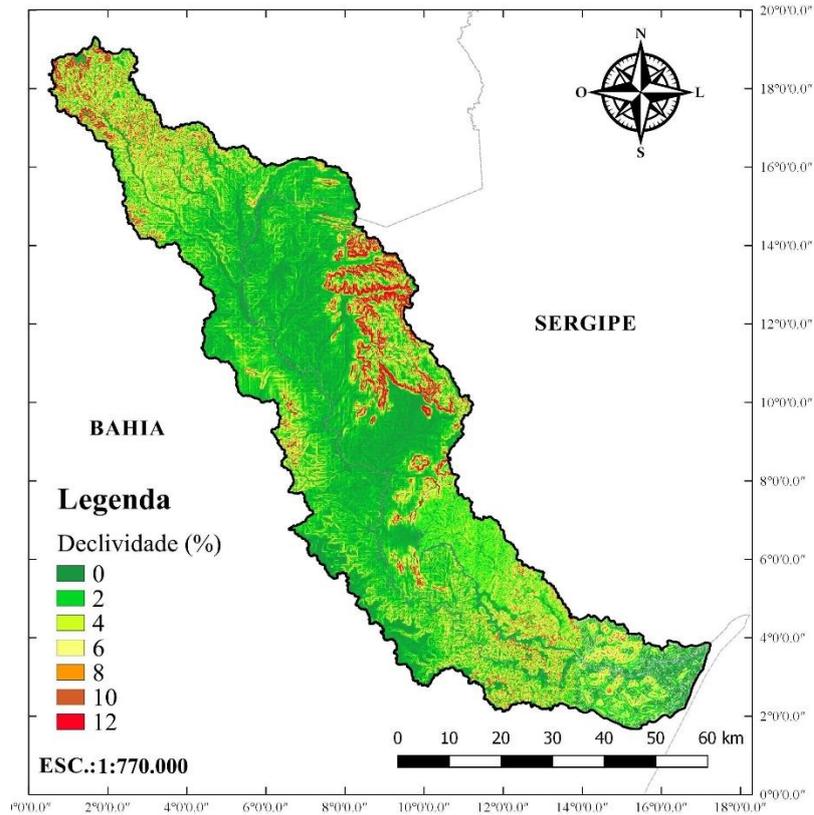
Fonte: Autora (2019)

Figura 2: Mapa altimétrico da bacia hidrográfica do rio Real



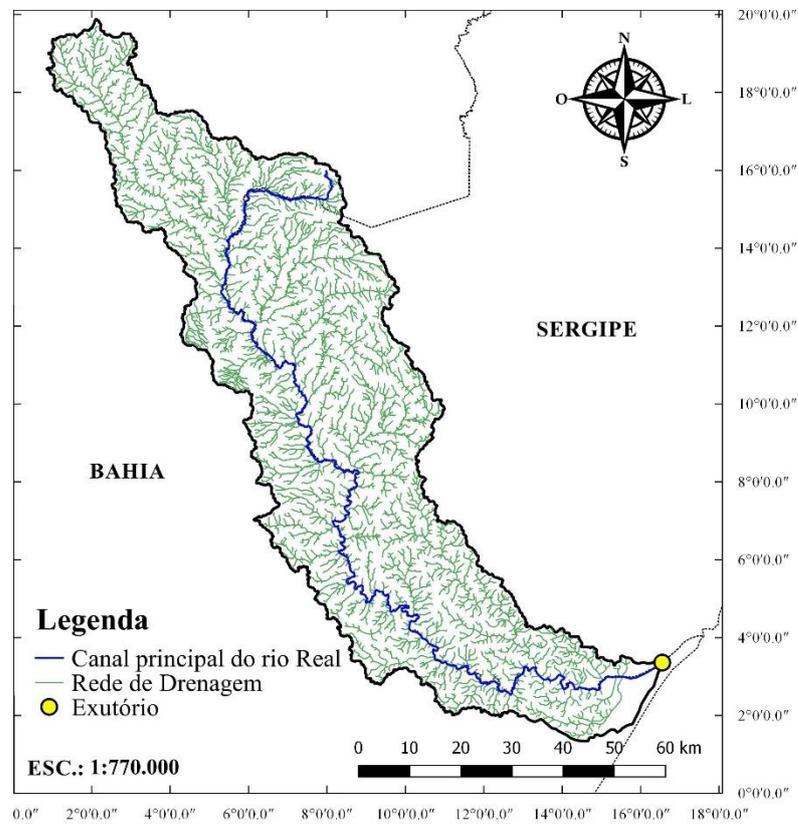
Fonte: Autora (2019)

Figura 3: Mapa de declividades da bacia hidrográfica do rio Real



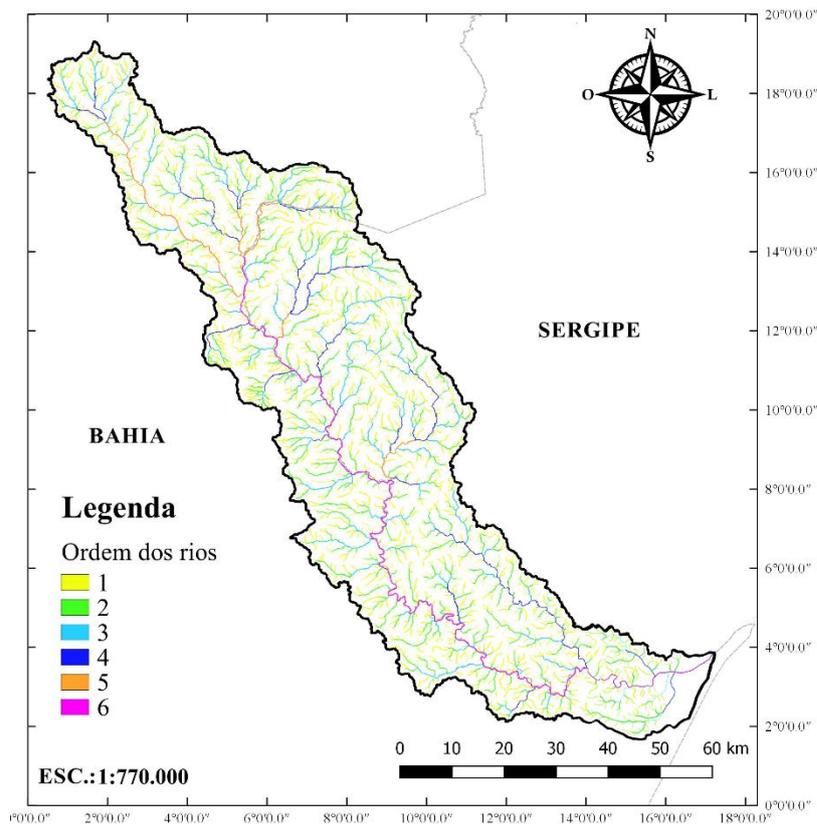
Fonte: Autora (2019)

Figura 4: Canal principal e rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Real



Fonte: Autora (2019)

Figura 5: Ordenamento dos rios da bacia hidrográfica do rio Real



Fonte: Autora (2019)

Para avaliar a eficiência da delimitação automática através do *software* GrassGIS, os resultados obtidos foram comparados com alguns dados da literatura. Os valores da primeira referência foram obtidos através do somatório dos dados referentes à morfometria da bacia hidrográfica do rio Real do Relatório de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras (CPRM, 2013) e a segunda referência está associada às informações disponibilizadas no site da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018) em formato de *shapes*, arquivos que contém formas vetoriais de dados espaciais utilizados no *software* QGIS.

Observa-se que, ao comparar os resultados do processamento com os valores das referências, houve uma variação diminuta e semelhante do valor da área, demonstrando eficácia do uso do SIG para delimitações de bacias. Esta variação pode ser justificada ao baixo desempenho do *software* na delimitação ao utilizar coordenadas em locais de baixas altitudes, próximo ao exutório, sendo necessária a delimitação manual nesta região.

O comprimento do talvegue principal também sofreu pequenas variações, que podem ser explicadas pelas características do rio. Uma vez que o rio Real é temporário, a localização de sua nascente pode mudar ao longo das estações do ano. Além disso, como

software GrassGIS interpola os valores de cota dos *pixels*, tal interpolação tende a não representar todos os meandros nos trechos do corpo d'água principal em que a sinuosidade é alta, influenciando no valor final do comprimento do talvegue. Dessa forma, pode-se justificar as altas variações do índice de forma, que é função do comprimento do rio principal.

Os valores obtidos para as declividades e para os tempos de concentração encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Declividade média e declividade “S10/85”

Declividade (m/m)		
	SRTM	ANA (2018)
Declividade média	0,00189	0,00201
Declividade S10/85	0,00091	0,00129

Fonte: Autora (2019)

Tabela 5: Tempo de concentração em minutos

Método de cálculo	Delimitação SRTM		ANA (2018)	
	Declividade média	Declividade "S10/85"	Declividade média	Declividade "S10/85"
Kirpich	3278	3477	3055	2898
Corpo de Engenheiros	2621	2419	2473	2160
Dooge	2055	2326	2058	2217

Fonte: Autora (2019)

Com relação aos dados de declividade da delimitação automática e o verificado por ANA (2018), observa-se que há uma pequena variação nos resultados, como já era esperado, tendo em vista que não houve variação relevante das características morfométricas.

Verificou-se também que os métodos de cálculo fornecem valores diferentes de tempo de concentração e que há uma diferença nos valores ao se utilizar diferentes tipos de declividade. No geral, os tempos de concentração calculados com a declividade “S10/85” possuem valores maiores em relação ao calculado com a declividade média.

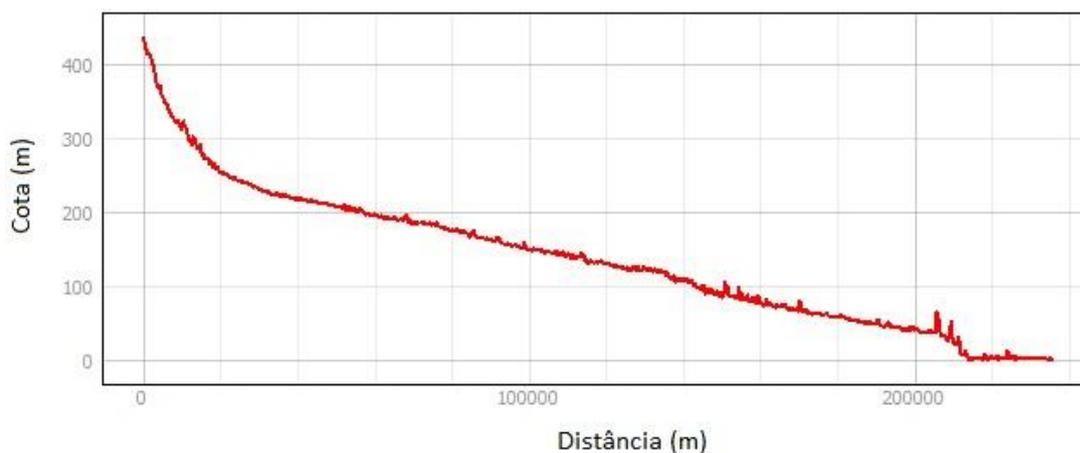
Ademais, nota-se que o método de Kirpich apresenta maiores valores de tempo de concentração em relação aos demais métodos, perceptível em ambos os casos, além de ser o método que mais diferiu entre a delimitação automática e o da referência. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato da equação de Kirpich ter sido parametrizada em bacias com áreas menores que 0,5 km² (COLLISCHONN;

DORNELLES, 2015). Já os métodos do Corpo de Engenheiros dos EUA e de Dooge apresentaram tempos de concentração próximos, principalmente quando utilizada a declividade “S10/85”, com o método do Corpo de Engenheiros mostrando o menor desvio médio em seus resultados, fato já observado por Silveira (2005).

A equação de Dooge, que utiliza a área da bacia como variável, exibiu a menor variação entre os resultados, pois foi o parâmetro que obteve menor variação dentre as características físicas. Tal observação leva a crer que utilizar a área da bacia como parâmetro não demonstra ser o principal fator das divergências entre os tempos de concentração, mas sim o comprimento do rio que embute informação física diretamente ligada a tempos de escoamento.

Na Figura 6 é possível observar o perfil topográfico do canal principal da bacia hidrográfica do rio Real.

Figura 6: Perfil topográfico do canal principal rio Real



Fonte: Autora (2019)

É possível identificar maiores declividades na nascente, na região de Poço Verde, com altitude em torno de 440 m, e um alívio à medida que se aproxima do exutório, próximo ao município de Indiaroba, com declividades nulas onde há o encontro dos Rio Real, Piauí e Indiaroba. Os pequenos picos do gráfico representam erros que ocorreram durante a interpolação do *raster*, pois a cota do *pixel* é uma média que ora considera a superfície do canal, ora considera a margem, resultando nessa irregularidade, principalmente em trechos sinuosos.

Precipitação média na bacia hidrográfica do Rio Real

Através do método da Ponderação Regional, foi possível realizar o preenchimento das falhas das séries pluviométricas de cada posto. O total de falhas nos postos está apresentado na Tabela 6.

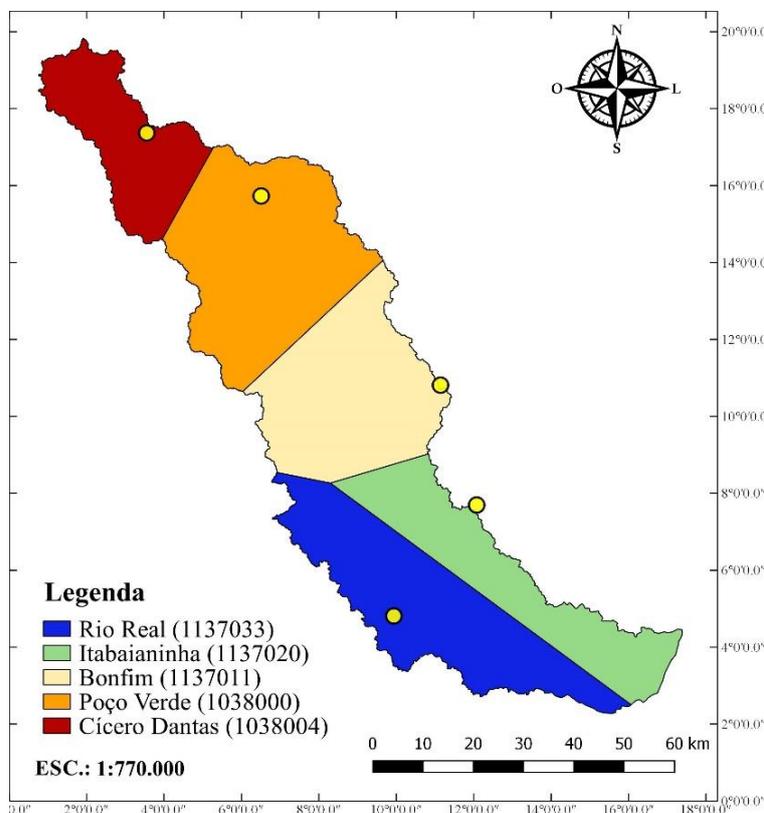
Tabela 6: Total de falhas dos postos pluviométricos no período utilizado

Posto	Período de Dados		Total de falhas
	Início	Final	
Poço Verde	Jan/38	Dez/84	70
Bonfim	Jan/13	Dez/87	48
Rio Real	Jan/14	Dez/88	6
Cícero Dantas	Jan/12	Dez/89	2
Itabaianinha	Jan/13	Dez/78	62

Fonte: Autora (2019)

As áreas de influência dos postos na bacia foram determinadas através do Polígono de Voronoi produzida com o auxílio do QGIS, observadas na Figura 7, bem como a posição das estações pluviométricas na bacia. A partir desse *vector*, foi possível obter o valor de área de influência de cada posto. Esses valores estão apresentados na Tabela 7.

Figura 7: Polígono de Voronoi utilizado na aplicação do Método de Thiessen



Fonte: Autora (2019)

Tabela 7: Área de influência dos postos pluviométricos na bacia

Posto	A (km ²)	A/A _{total} (%)
Cícero Dantas (01038004)	619,475	13
Poço Verde (01038000)	1253,903	26
Bonfim (01137011)	1033,838	22
Itabaianinha (01137020)	816,316	17
Rio Real (01137033)	1084,63	23

Fonte: Autora (2019)

Utilizando os dados de precipitação dos postos e suas áreas de influência, é possível obter as médias ponderadas das precipitações mensais e anuais da bacia hidrográfica do rio Real.

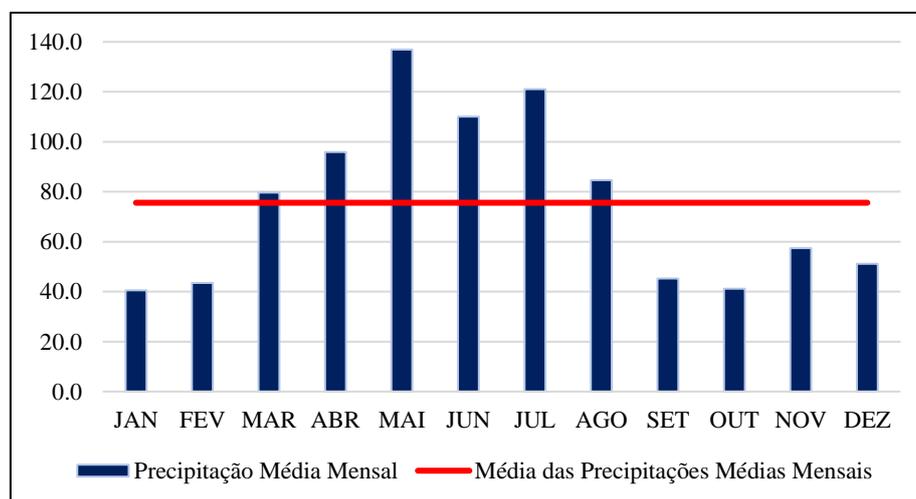
A Tabela 8 mostra as médias das precipitações para cada mês para a toda série histórica, considerando o período coincidente dos postos pluviométricos (1938-1978). Além disso, é possível observar na Figura 8 o ano hidrológico da bacia do rio Real.

Tabela 8: Precipitação média dos acumulados mensais da bacia do rio Real

Mês	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec. Média (mm)	40,6	43,5	79,7	95,9	137	110	121,1	84,6	45,2	41,1	57,4	51,2

Fonte: Autora (2019)

Figura 8: Precipitações médias mensais para bacia do rio Real



Fonte: Autora (2019)

A média das precipitações médias mensais é 75,6 mm na bacia, com período úmido compreendido entre os meses de março e agosto, e período seco entre setembro e fevereiro, comumente encontrado nos postos pluviométricos de Sergipe. Além disso, a bacia possui uma precipitação anual média de 907,3 mm, semelhante ao valor encontrado

no relatório da CPRM (2013) de 897,5 mm. Pode-se inferir então que o ano hidrológico no rio Real inicia-se no mês de março e termina no mês de fevereiro.

Simulação Hidrológica

Os valores dos parâmetros encontrados na de calibração e validação do modelo SMAP estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros utilizados na calibração e validação do modelo SMAP

Série	Parâmetros do Solo				Parâmetros de Inicialização		Área de drenagem
	<i>Sat</i>	<i>Pes</i>	<i>Crec</i>	<i>Kkt</i>	<i>Tuin</i>	<i>Ebin</i>	
Calibração					62	1,6	4490,45 km ²
Validação	883,41	6,21	0,1	1,03	68	1,2	

Fonte: Autora (2019)

Observa-se que a saturação do solo apresentou valor relativamente baixo, próximo do limite inferior. Como a bacia do rio Real encontra-se majoritariamente com solo do tipo planossolos e argissolos, típicos da região do agreste e semi-árido, influi assim em valores maiores de escoamento superficial e redução de infiltração (SERGIPE, 2016).

Para avaliar a performance do modelo, analisaram-se os coeficientes de eficiência bem como o gráfico vazão *versus* tempo para as vazões observadas e calculadas em conjunto com o hietograma do respectivo período. Os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos de calibração e validação nas Figuras 9 e 10, respectivamente. A Tabela 10 apresenta um resumo dos valores mínimo, médio e máximo das séries observada e calculada, para os períodos de calibração e validação.

Tabela 10: Comparação entre as vazões calculadas e observadas na calibração e validação do SMAP

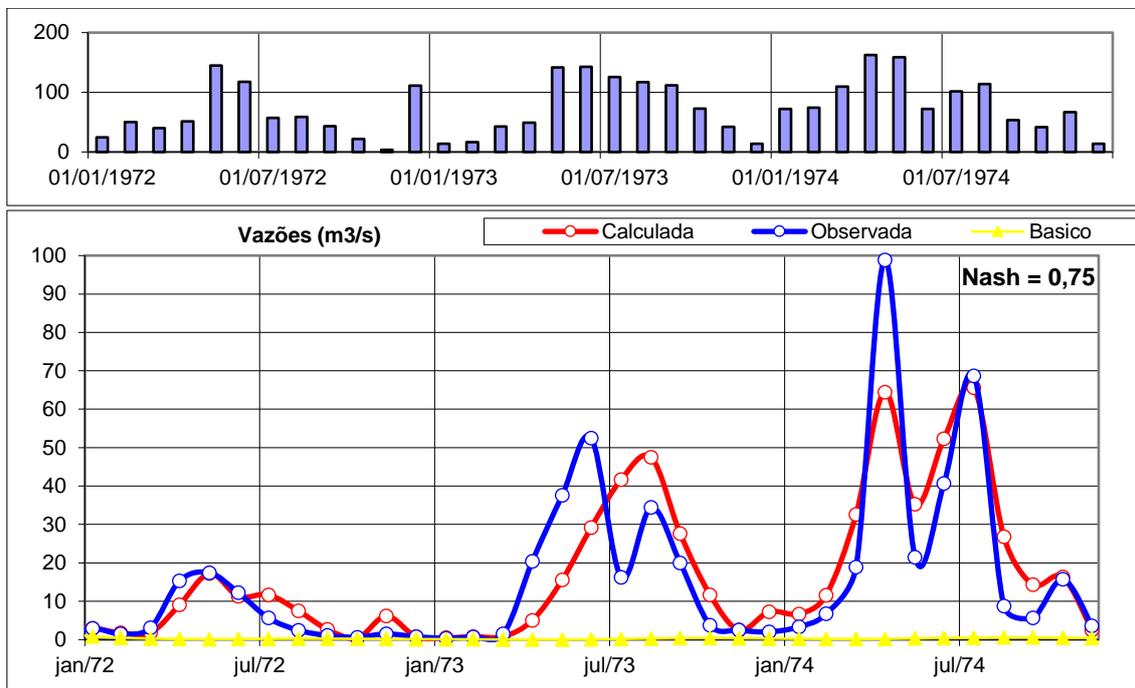
	Vazão Mínima		Vazão Média		Vazão Máxima	
	Observada	Calculada	Observada	Calculada	Observada	Calculada
Calibração	0,370	0,420	16,522	15,276	65,599	98,900
Validação	1,880	1,117	16,282	15,716	108,000	115,646

Fonte: Autora (2019)

Em alguns pontos de ambos os gráficos é possível observar algumas divergências entre a vazão observada e simulada. Essas discrepâncias são visíveis no período úmido, geralmente compreendido entre os meses de março e agosto, com picos de vazão no mês de julho. Na Tabela 10, observa-se que os valores de vazões máximas calculadas apresentam maiores variações em relação aos dados de vazão observada, quando comparada com as vazões mínimas e médias. Como discutido em Castanharo et. al (2007), o modelo tende a superestimar os picos das cheias, apresentando melhores

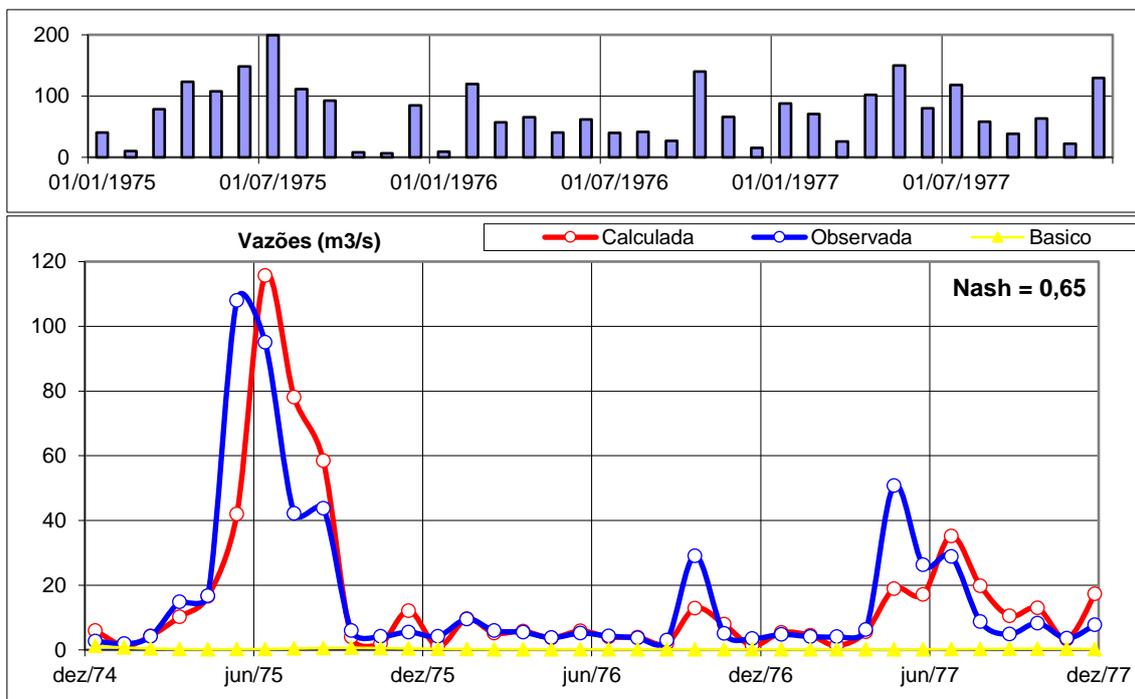
resultados em períodos de baixas médias vazões. Este erro do modelo pode ser atribuído aos coeficientes que contêm o quadrado da diferença entre vazão calculada e observada.

Figura 9: Calibração do modelo SMAP



Fonte: Autora (2019)

Figura 10: Validação do modelo SMAP



Fonte: Autora (2019)

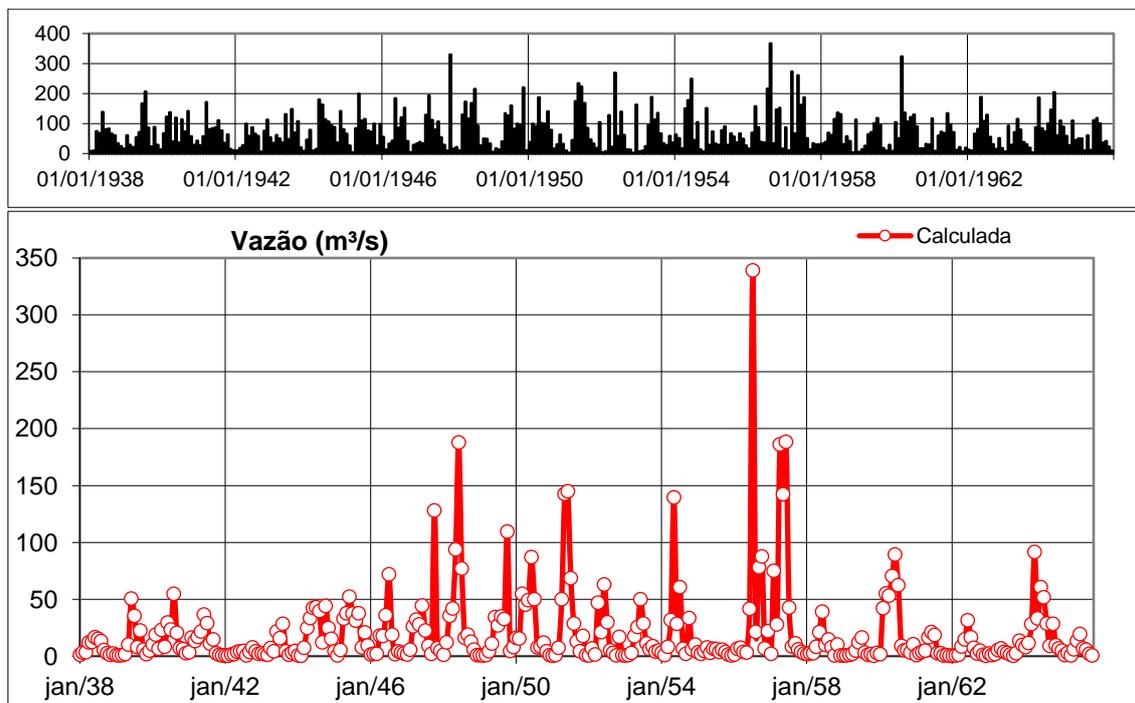
Ademais, nota-se que de uma maneira geral, ambos os gráficos apresentam uma sintonia entre as vazões observadas e calculadas com o hietograma, mostrando picos de vazões em períodos de elevada precipitação e baixas em períodos secos, com exceção do observado em maio/74 na Figura 9 que apresenta uma discrepância no valor da vazão observada de 98,9 m³/s para precipitações medianas, erro que pode ser atribuído por falha de operação na estação fluviométrica.

Apesar das observações supracitadas, o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe calculado para calibração de 0,75, e para validação de 0,65, possibilitou uma boa avaliação do modelo SMAP no estudo da bacia do rio Real, considerando que ambos os coeficientes encontram-se dentro da faixa aceitável de desempenho.

Geração da série estendida de vazão

Após a validação dos parâmetros calibrados, foi simulada a série de vazão para o período compreendido entre janeiro de 1938 e dezembro de 1965. Tal procedimento permitiu, assim, estabelecer uma série estendida de vazão de 1938-2014, contribuindo com 28 anos de dados para posto fluviométrico de Itanhy (50290000). A Figura 11 representa o gráfico de vazão *versus* tempo da série estendida no período de 1938-1965 para o posto fluviométrico.

Figura 11: Grafico vazão *versus* tempo da série fluviométrica estendida



Fonte: Autora (2019)

Após estendida a série do posto Itanhy, foram realizados os testes estatísticos de estacionariedade para avaliar o comportamento das séries pluviométricas e fluviométricas. A Tabela 11 apresenta os resultados do teste de estacionariedade para as séries pluviométricas deste estudo.

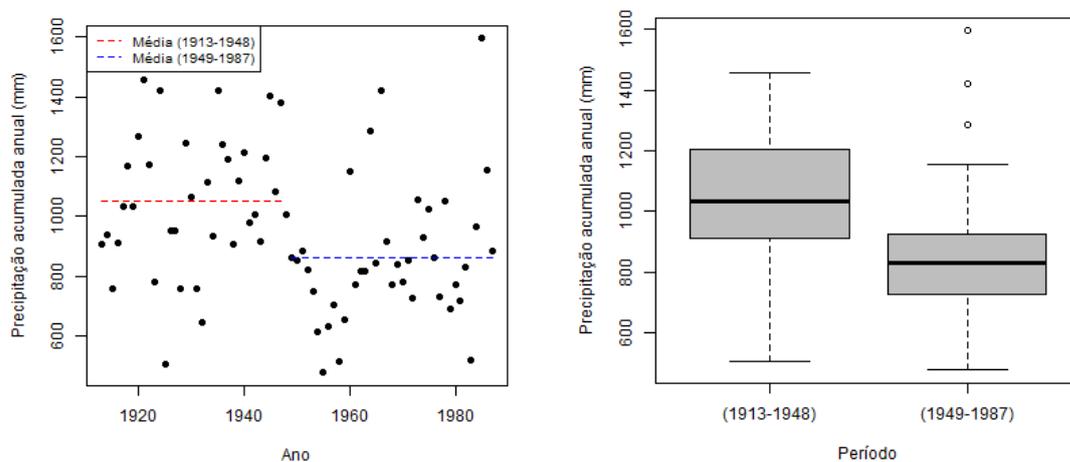
Tabela 11: Resultado do teste de estacionariedade dos postos pluviométricos para $\alpha=0,05$

Posto	r_s	$Var(r_s)$	Teste	Série
01038000	-0,004972	0,021739	Não rejeita H_0	Estacionária
01038004	0,19921	0,01299	Não rejeita H_0	Estacionária
01137011	-0,26068	0,01351	Rejeita H_0	Não Estacionária
01137020	-0,19082	0,01538	Não rejeita H_0	Estacionária
01137033	0,17215	0,01351	Não rejeita H_0	Estacionária

Fonte: Autora (2019)

Observa-se que o único posto que apresentou não estacionariedade foi Bonfim (01137011), que representa 22% da área de influência da bacia. Após ser realizado o teste de Pettitt para esta estação, como observado na Figura 12, a série apresentou tendência de decrescimento, com quebra no ano de 1948.

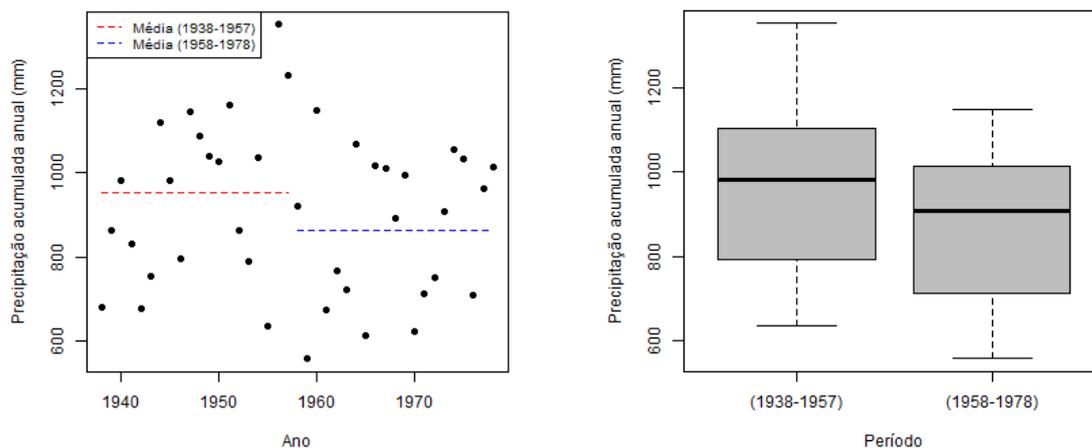
Figura 12: Resultados do teste de Pettitt para o posto pluviométrico Bonfim (01137011)



Fonte: Autora (2019)

Analisando o período em que os dados dos postos pluviométricos coincidem, de 1938 a 1978, existe uma mudança de tendência na série em 1957, quando a série apresenta uma leve subida neste ano, e em seguida, um decréscimo dos valores. Apesar da série apresentar este comportamento, como mostra a Figura 13 pelo teste de Pettitt, a série indica estacionariedade.

Figura 13: Resultados do teste de Pettitt para o período coincidente dos dados pluviométricos



Fonte: Autora (2019)

Com relação aos resultados do posto fluviométrico Itanhy (50290000), para o período de coincidência (1938-1978), a série apresentou estacionariedade, diferentemente das séries observadas e estendidas, como mostra a Tabela 12.

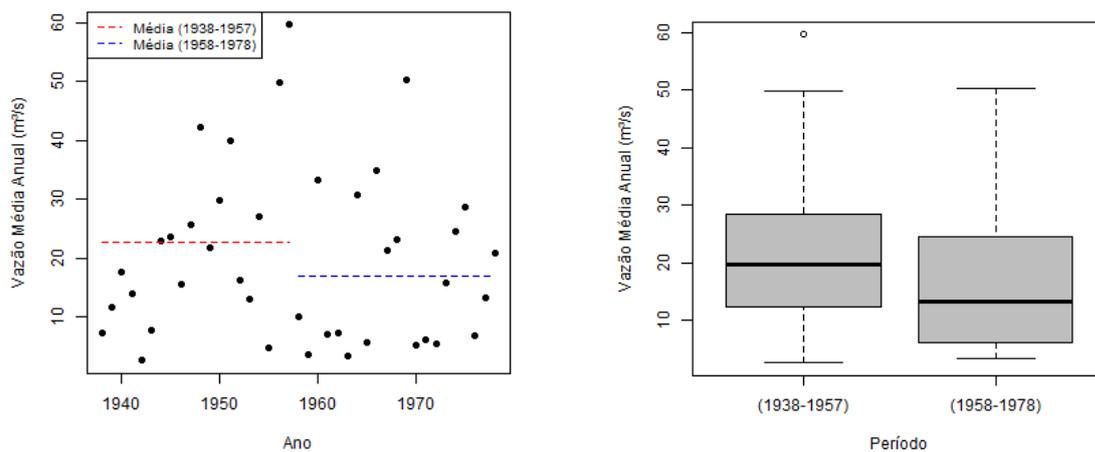
Tabela 12: Resultado do teste de estacionariedade para o posto fluviométrico Itanhy com $\alpha=0,05$

Dados	r_s	$Var(r_s)$	Teste	Série
Observada (1966-2014)	-0,32031	0,02083	Rejeita H_0	Não Estacionária
Período coincidente (1938-1978)	-0,02857	0,02500	Não rejeita H_0	Estacionária
Série estendida (1938-2014)	-0,32368	0,01316	Rejeita H_0	Não Estacionária

Fonte: Autora (2019)

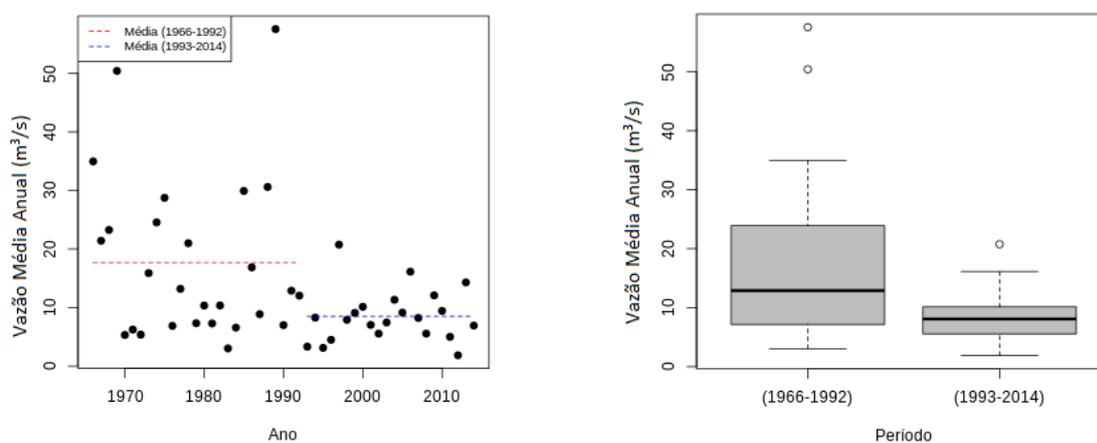
Verificou-se pelo teste de Pettitt (Figura 14) que para o período coincidente, apesar da série apresentar um salto em 1957, a mesma indica estacionariedade, concordando com o observado pela série pluviométrica. Além disso, ao analisar as Figuras 15 e 16 para séries observadas e estendidas, nota-se a tendência de decrescimento das séries fluviométricas no posto Itanhy, com quebra em 1970 para a série estendida. Logo, é possível deduzir que a série de vazões apresentou estacionariedade até a década de 70, e que partir desta época, os valores das vazões reduziram, implicando que a série estendida apresente não estacionariedade com tendência de decrescimento.

Figura 14: Resultados do teste de Pettitt para o período 1938-1978



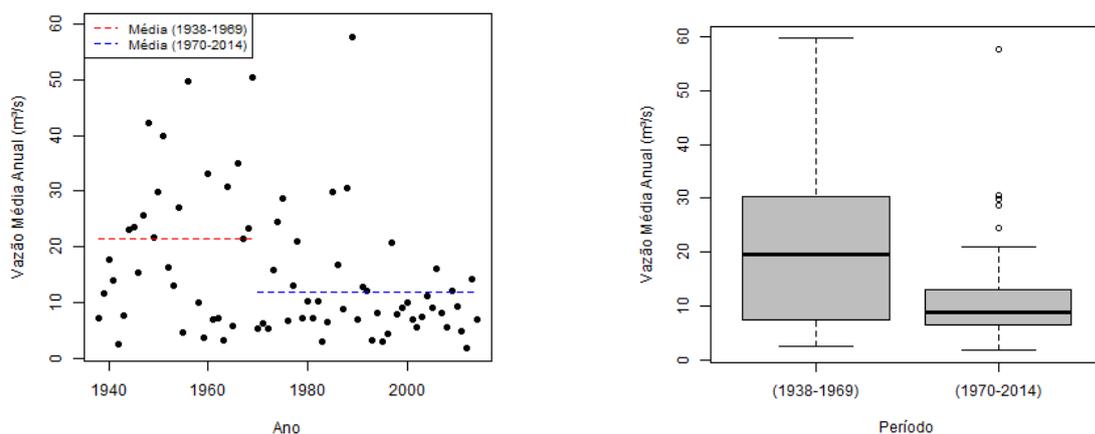
Fonte: Autora (2019)

Figura 15: Resultados do teste de Pettitt para o período da série observada de vazões



Fonte: Autora (2019)

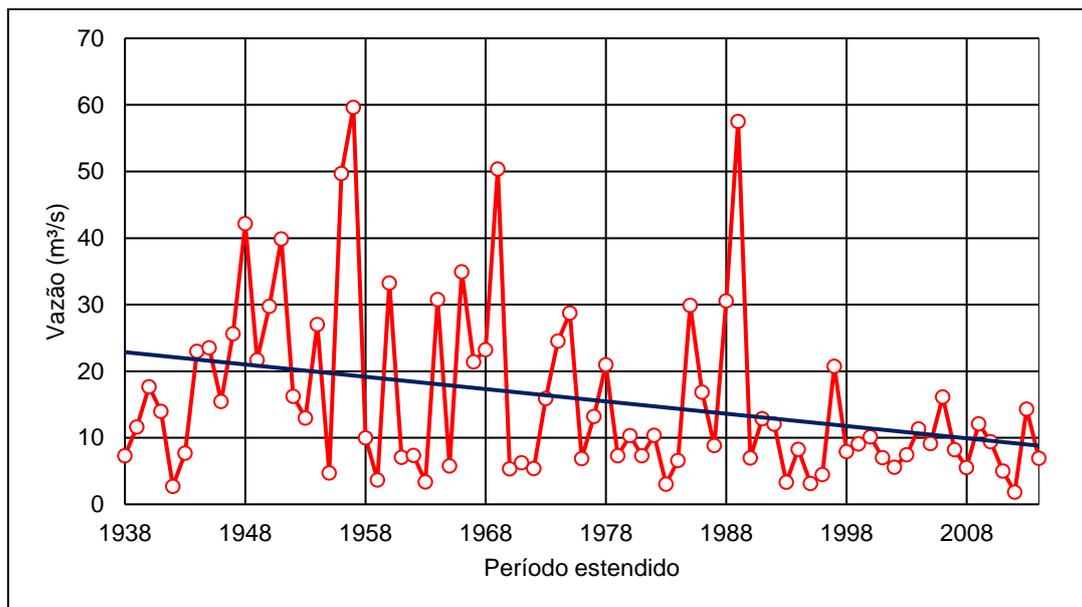
Figura 16: Resultados do teste de Pettitt para o período da série estendida de vazões



Fonte: Autora (2019)

Na Figura 17 está ilustrada a série de vazões médias anuais estendida para o posto fluviométrico Itanhy (50290000).

Figura 17: Gráfico das vazões médias anuais estendida para o posto fluviométrico Itanhy



Fonte: Autora (2019)

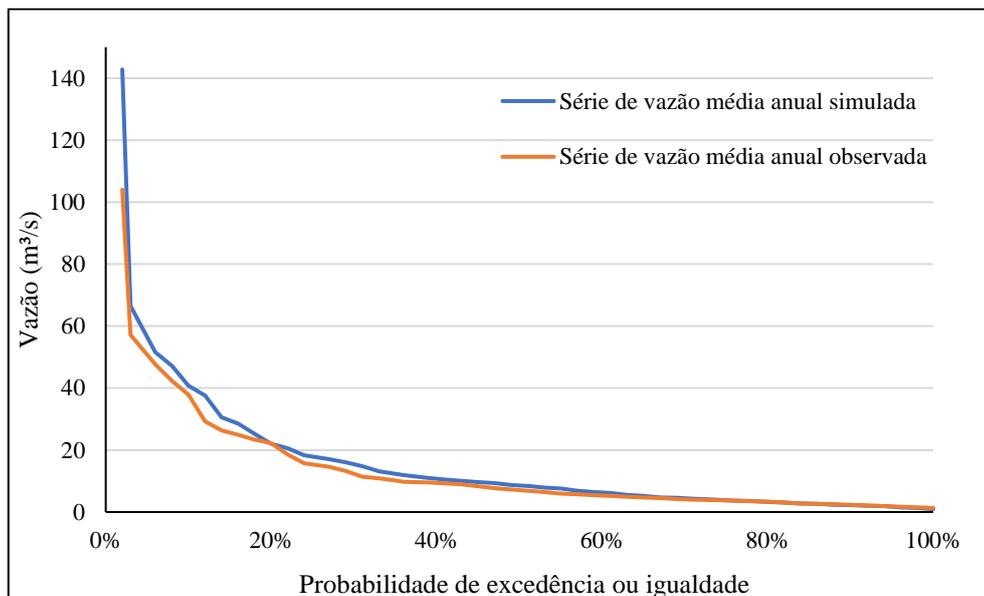
Como observado anteriormente, a série apresenta um comportamento estacionário de 1938 a 1978 e partir deste período, os valores das vazões tendem a reduzir. Como as séries pluviométricas, em sua maioria, são estacionárias, fatores como uso consuntivo da água e uso e ocupação do solo podem explicar a causa deste fenômeno, pois interferem diretamente na infiltração e recarga de aquífero, alterando vazões máximas e mínimas na bacia. Porém, a falta de informações relacionadas a esses fatores impede a realização de uma correlação embasada em dados para apoiar a indagação proposta.

Disponibilidade Hídrica

Com as séries de vazões do posto fluviométrico Itanhy (50290000) estendida, foram construídas as curvas de permanência para as séries de vazão média anual observada e estendida, como mostra a Figura 18.

É possível notar que quando a série é estendida, há um aumento das vazões máximas em relação a observada, porém as vazões médias e mínimas são próximas. Os resultados da vazão de referência $Q_{90\%}$ para cada mês da série fluviométrica observada (1966-2014) e estendida (1938-2014) encontram-se na Tabela 13.

Figura 18: Curva de permanência das séries de vazões médias anuais para o posto Itanhy



Fonte: Autora (2019)

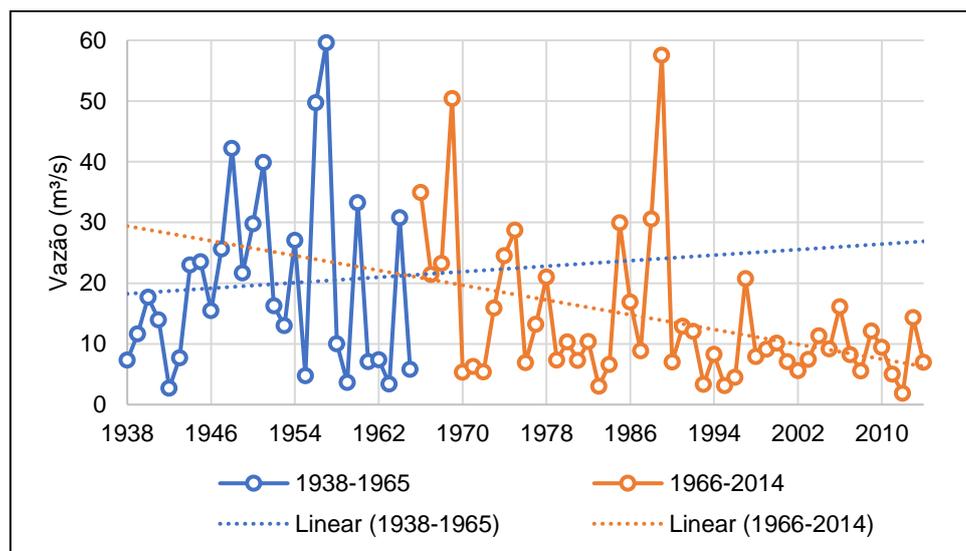
Tabela 13: $Q_{90\%}$ mensal

Série	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Observado	0,91	0,65	1,02	2,36	2,77	4,26	4,69	4,23	2,48	1,48	1,31	1,11	4,92
Estendida	0,60	0,54	0,61	1,48	2,63	3,91	5,52	4,35	2,52	1,53	1,24	1,03	4,65

Fonte: Autora (2019)

Ao estender a série de vazões, percebe-se que há uma redução da vazão mínima na maioria dos meses, com maiores variações nos meses com períodos secos. Essa diminuição pode estar associada ao número de observações dos valores de vazão nos meses secos, que aumentou ao ser estendida, induzindo a vazões mais baixas. Além disso, ao observar a Figura 19, nota-se que estender a série de vazões para o passado, onde havia maiores valores de vazão, proporcionou uma maior nitidez com relação a redução da $Q_{90\%}$ na bacia. Tal ocorrência poderia estar associada por fatores como redução das chuvas, uso e ocupação do solo e retirada de água em excesso que pode ter ocorrido no período da série histórica observada, de 1966 a 2014.

Figura 19: Tendência das séries de vazão calculada e observada



Fonte: Autora (2019)

De modo a comparar as vazões entre os períodos que ocorre a quebra da série estendida de vazão, pré 1970 e pós 1970, foi calculada a vazão de referência $Q_{90\%}$ para estas séries, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14: $Q_{90\%}$ mensal para os períodos pré e pós anos 70

Série	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Pré 70	0,51	0,50	0,43	1,20	2,10	4,19	12,19	6,18	3,05	1,91	1,22	1,01	4,86
Pós 70	0,95	0,65	1,02	2,29	2,72	3,93	4,68	4,20	2,47	1,47	1,30	1,11	4,71

Fonte: Autora (2019)

Com base nos valores de $Q_{90\%}$ da Tabela 14, é possível notar a tendência de decréscimo da disponibilidade hídrica em alguns meses úmidos e aumento nos meses secos na bacia. Entretanto, esse aumento percentual da vazão de permanência nos meses secos não compensa a queda observada nos períodos úmidos. Esse fenômeno pode estar associado a redução da precipitação média na bacia no período pós 70, que de fato é observada na Tabela 15, quando calculada a precipitação média mensal na bacia do rio Real para o período pré 70 e pós 70.

Tabela 15: Precipitação média na bacia para os períodos pré e pós anos 70

Série	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Pré 70	41,3	39,7	84,9	98,6	139,5	111,8	124,7	83,9	41,4	39,0	63,9	51,3
Pós 70	38,1	57,2	61,4	86,5	128,1	103,9	108,2	87,2	58,7	48,5	34,4	50,9

Fonte: Autora (2019)

Desse modo, é possível inferir que ao estender a série de vazões para o passado, é evidente a redução da vazão de referência, principalmente nos meses úmidos, por haver

uma diminuição de ocorrência de chuvas a partir da década de 70, com maiores variações nos meses úmidos. Essa diminuição pode trazer impactos tanto na capacidade dos corpos hídricos superficiais da bacia atenderem as demandas consuntivas como na sua capacidade de diluir efluentes. Assim, pode se constituir como uma limitação e demonstra, para os responsáveis pela gestão de recursos hídricos da bacia, que há uma necessidade de uma avaliação nos processos de concessão de outorga.

CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi possível realizar um estudo morfométrico e hidrológico da bacia hidrográfica do rio Real e obter resultados que preenchem o *gap* acerca de bacias interestaduais do Nordeste brasileiro.

Foram levantadas as principais características morfométricas da bacia através da delimitação automática pelo *software* GrassGis, apresentando pequenas variações em relação aos valores das referências, atestando a eficiência do uso do SIG para delimitações de bacias. Ademais, concluiu-se que dentre os métodos de cálculo de tempo de concentração, o método de Kirpich apresentou maiores valores, enquanto que o método do Corpo de Engenheiros dos EUA apresentou o menor desvio médio entre eles. O método de Dooge não sofreu alterações significativas devido ao fato de que seus parâmetros terem valores similares aos da referência. Logo, salienta-se a importância da escolha do método de tempo de concentração em função das características da bacia que pode comprometer o estudo hidrológico ao subestimar ou superestimar esse valor.

Verificou-se também que, para o modelo chuva-vazão SMAP, o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe apresentou valores aceitáveis para calibração e validação, possibilitando boa avaliação do modelo para estender as séries de vazão do posto fluviométrico Itanhy, encontrando resultados condizentes com a realidade da bacia estudada.

Levando em consideração o período estendido, os resultados da análise estatística indicaram não estacionariedade da série de vazões para o posto Itanhy, apesar dos testes apresentarem estacionariedade para grande parte dos postos pluviométricos. Ao analisar o período em que os dados das chuvas coincidem, notou-se que a série de vazões apresentavam comportamento estacionário até a década de 70. Essa constatação leva a crer que a partir desta época, fatores como uso consuntivo da água e uso e ocupação do solo podem ter interferido nos valores de vazões.

Por fim, ao calcular a $Q_{90\%}$ para cada mês, ficou evidente que há variações significativas nos valores de disponibilidade hídrica no ano. Com a série estendida, foi possível observar a redução da disponibilidade hídrica na bacia, com maiores variações nos períodos úmidos por apresentar uma redução da precipitação para estes períodos a partir da década de 70. Ademais, destaca-se que os órgãos responsáveis à concessão de recursos hídricos devem considerar as vazões de referência do período seco, a fim de preservar a qualidade ambiental da bacia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (2018). **Bacias Hidrográficas Ottocodificadas**. Disponível em: <<http://dadosabertos.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03/08/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (2019). HIDRO - Sistema de Informações Hidrológicas. Versão 1.4. **Manual do Usuário**. Acesso em 03/08/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (2019). **Portal HidroWeb**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 03/08/2019.

ARAÚJO, C. E. d. S et al. **Caracterização dos aquíferos da bacia do rio Siriri e estimativa de recarga subterrânea com os modelos WEAP e SMAP**. In: I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo [S.l.:s.n.], 2009.

BENIGNO, M. (2013) **Caracterização Morfométrica de Bacias Hidrográficas utilizando o GRASS**. 2013 Disponível em: <<http://profmarcello.blogspot.com/2013/12/caracterizacao-morfometrica-de-bacias.html>>. Acesso em: 13/06/2019.

BERTONI J. C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. p.177-241.

Brasil em Relevô. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA**. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/>>. Acesso em 20/06/2019.

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 (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2004.

CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R. F. C.; MÜLLER, I. I.; ANDRIOLO, M. V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. **Previsão de vazões na Bacia do Rio Iguaçu baseada no modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 3, p. 57-68, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p57-68>>. Acesso em: 18/06/2019.

CPRM (2013). **Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50 – Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japaratuba, Subaúma e Jacuípe**. / Múcio Valença Virões. – Recife: CPRM, 2013.

- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p. Tese Doutorado
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2015). **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2ª. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.
- CRUZ, J.; TUCCI, C. **Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 1, p. 111–124, 2008.
- FAN, F.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 243–254, 2014.
- JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali, CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. 32 p.
- KAVISKI, E. et al. **Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 3, p. 57–68, 2007.
- LASDON, L. S.; WAREN, A. D.; JAIN, A.; RATNER, M. **Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming**. ACM Transactions on Mathematical Software, New York, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978
- LEITE, Marcos Esdras (org). **Geotecnologias aplicadas aos estudos geográficos**. Montes Claros: Unimontes, 2013. 326 p.
- LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology**, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.
- MARINHO FILHO, G. M. et al. **Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades**. Revista de Ciências Ambientais, p. 13, 2012.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 02, n. 61, p. 15, 2009.
- NAGUETTI, M.; PINTO, J. d. A. **Hidrologia estatística**. [S.1.]: Ernesto von Sperling e José Márcio Henriques Soares, Belo Horizonte, 2007.
- OLIVEIRA, P. T. S. DE et al. **Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010.
- PINHEIRO, V.; NAGHETTINI, M. **Calibração de um Modelo Chuva-Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico a partir de Curvas de Permanência Sintéticas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, n. 2, p. 143–156, 2010.

SANTOS, C. A. DOS et al. **Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio pardo.** HOLOS, v. 7, p. 179, 12 nov. 2016.

SERGIPE. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH. **Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe.** Aracaju. 2016. 26 p.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 5–23, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 4ª. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2015.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 678 p. 2005.