



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

EMERSON NETO DA SILVA

**HIDROCLIMATOLOGIA E MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA IÔ GRANDE, SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE**

ACARAPE

2018

EMERSON NETO DA SILVA

**HIDROCLIMATOLOGIA E MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA IÔ GRANDE, SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

ACARAPE – CE

2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Emerson Neto da.

S578h

Hidroclimatologia e Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica
Iô Grande, São Tomé e Príncipe / Emerson Neto da Silva. - Redenção,
2018.

52f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia De
Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável,
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-
Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa.

1. Secas. 2. SPI. 3. SMAP. I. Título

CE/UF/BSCL

CDD 363.34

EMERSON NETO DA SILVA

**HIDROCLIMATOLOGIA E MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA IÔ GRANDE, SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em 29 / 05 / 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. George Leite Mamede

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

*A Deus,
A minha mãe, Leonilde Neto*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as coisas boas e más que me aconteceram. Cada uma delas, ao seu modo, me fizeram chegar aonde eu cheguei, enfrentando dificuldades e superando barreiras, que foram decisivos para minha formação pessoal e profissional.

Em especial a minha mãe Leonilde Neto, por ter acreditado em mim, e ter concebido toda a força, o incentivo, dedicação e o sacrifício nesses últimos cinco anos para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

Aos meus irmãos Ibraimo, Quilson, Dedeca, Edymilza e Izanilde, pelo apoio, carinho e força. Aos meus amigos, Mauro, Fernando, Luís Carlos, Sandro, Shakil, Aluisio, Dêlcio, Julito e Claudio Cambambi que sempre caminhamos nessa jornada juntos, sem vocês também não teria chegado até aqui. Agradeço por todo o compartilhamento de conhecimentos, foram anos de muita amizade, muita luta e sofrimento, mas também de muitas vitórias. Amizades, que levarei para vida toda.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa, que sempre me incentivou, acreditou no meu potencial e pela disponibilidade do seu tempo para fazer presente em cada etapa da minha monografia. Ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), pela organização do curso de Engenharia de Energias e empenho para que o mesmo tenha conceito de excelência. A Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, por proporcionar a estrutura necessária para o funcionamento de todas as atividades do curso de Engenharia de Energias. A Divisão de Saúde Segurança e Qualidade de Vida no Trabalho pela oportunidade de estágio concebido.

A todas as pessoas que não foram citadas, mas que fazem parte da minha vida e tiveram grande importância no sucesso da minha formação profissional e pessoal, fica o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

A República Democrática de São Tomé e Príncipe (STP) é um arquipélago constituído por duas ilhas e vários ilhéus, situados próximo da linha do equador, no golfo da Guiné. Sendo um dos menores países da África, está sujeito aos efeitos da variabilidade e mudanças climáticas sendo necessário um planejamento sustentável para que o país possa atingir o desenvolvimento. As mudanças climáticas podem ser responsáveis pelas alterações no comportamento de precipitação, trazendo consequências sobre o sistema hidrológico, influenciando no regime de vazões em uma bacia hidrográfica. Sendo assim, uma maneira de determinar a relação entre mudanças climáticas e alterações nas vazões é a utilização de modelos hidrológicos, definindo as entradas meteorológicas e estimando as mudanças sobre estas vazões. Neste estudo, foi feita a identificação e caracterização de secas meteorológicas e hidrológicas que envolvem a maior bacia hidrográfica do país (bacia do rio Iô Grande) através dos métodos SPI e SFI, e foi utilizado o modelo SMAP, como ferramenta na simulação do regime hidrológico sobre o escoamento na bacia do rio Iô Grande. Foram calculados alguns coeficientes de eficiência, coeficiente de Nash-Sutcliff por exemplo, como forma de avaliar a eficiência do modelo hidrológico utilizado, e além disso efetuou-se o teste de tendência para algumas séries de dados hidroclimatológicos, como objetivo de identificar se tais séries possuíam tendências de diminuir ou aumentar. Os resultados obtidos com a utilização do modelo hidrológico não se mostraram promissor com coeficiente de Nash-Sutcliff de -1,16 para etapa de calibração e -1,20 para a etapa de validação. Com os resultados obtidos na análise de tendência das séries, constatou-se haver uma tendência de diminuição da vazão na bacia, como consequência da diminuição da precipitação e o aumento da temperatura, sendo este extremamente preocupante para as entidades hidroclimatológicas, implicando no desenvolvimento de um mecanismo que diminua os efeitos das secas que têm repercussão negativa nas principais atividades socioeconômicas na sociedade.

Palavras chave: Mudanças climáticas, Seca, SPI, SFI, SMAP, Bacia do rio Iô Grande, Vazão, Precipitação.

ABSTRACT

The Democratic Republic of São Tomé and Príncipe (STP) is an archipelago made up of two islands and several islanders, located near the equator in the Gulf of Guinea. Being one of the smallest countries in Africa, it is subject to the effects of variability and climate change, and sustainable planning is necessary for the country to achieve development. Climate change may be responsible for changes in precipitation behaviour, with brings consequences on the hydrological system, influencing the flow regime in a river basin. Thus, one way to determine the relationship between climate changes and changes in flows is the use of hydrological models, defining the meteorological inputs and estimating changes in these flows. In this study, the identification and characterization of meteorological and hydrological droughts involving the largest hydrographic basin of the country (Iô Grande river basin) were done through the SPI and SFI methods, and the SMAP model was used as a tool in the simulation of the hydrological regime on the flow in the Iô Grande river basin. Some coefficients of efficiency, Nash-Sutcliff coefficient were calculated, for example, as a way of evaluating the efficiency of the hydrological model used, and in addition the tendency test was carried out for some series of hydroclimatological data, in order to identify if such series tended to decrease or increase. The results obtained with the hydrological model were not promising with a Nash-Sutcliff coefficient of -1.16 for the calibration step and -1.20 for the validation step. With the results obtained in the trend analysis of the series, there was a tendency to decrease the flow in the basin, as a consequence of the decrease of the precipitation and the increase of the temperature, being this extremely worrying for the hydroclimatological entities, implying in the development of a mechanism that diminishes the effects of the droughts that have negative repercussion in the main socioeconomic activities in the society.

Keywords: Climate Change, Drought, SPI, SFI, SMAP, Iô Grande River Basin, Flow, Precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização de São Tomé	1
Figura 2- Precipitação da ilha de São Tomé.....	5
Figura 3 - Principais bacias hidrográficas de São Tomé e Príncipe	6
Figura 4- Relevo da ilha de São Tomé	7
Figura 7- Estrutura do modelo SMAP.....	10
Figura 5- Mapa de uso e ocupação de solo	13
Figura 6- Mapa de tipo de solo.....	14
Figura 8- Variação de Precipitação e Evapotranspiração para a Bacia do Rio Iô Grande	19
Figura 9- Teste de Mann-Kendall Sen para precipitação.	20
Figura 10- Teste de Mann-Kendall Sen para temperatura.....	21
Figura 11- Variação da Vazão anual na bacia do Rio Iô Grande	23
Figura 12- gráfico de coeficiente escoamento superficial e precipitação anual	24
Figura 13- gráfico de diagrama de caixa de precipitação, Evapotranspiração Potencial e Vazão para a bacia do Rio Iô Grande.....	26
Figura 14 - gráficos de diagrama de caixa para precipitação (a) e evapotranspiração (b).	28
Figura 15- gráfico de diagrama de caixa para vazão mensal.....	29
Figura 16- gráficos de diagrama de caixas para temperatura e umidade relativa do ar	30
Figura 17- - gráfico de SPI para bacia do rio Iô Grande	31
Figura 18- gráfico de SFI para bacia do rio Iô Grande	32
Figura 19 - Gráficos dos hidrogramas calculados para o período de calibração e validação do modelo hidrológico SMAP.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Probabilidade de recorrência	9
Tabela 2- Valores referenciais do critério de Nash-Sutcliffe (NS)	12
Tabela 3- Dia Juliano.....	15
Tabela 4 – Períodos de simulação do modelo hidrológico SMAP	18
Tabela 5- Características das secas meteorológicas	34
Tabela 6 - Características das secas hidrológicas	34
Tabela 7 -Resultados da calibração e validação do modelo SMAP para a grande bacia Iô Grande (entre parênteses são apresentados os valores correspondentes ao período de validação do modelo).....	35

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SPI - Índice de Precipitação Padronizado

SFI - Índice de Escoamento Padrão

SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure

NS - Nash e Sutcliffe

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Problematização	1
1.2.	Justificativa	2
1.3.	Objetivos	3
1.4.	Estrutura da monografia	3
2.	Revisão da literatura	4
2.1.	Caracterização das ilhas de São Tomé e Príncipe	4
2.2.	Descrição do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e Índice de Escoamento Padrão (SFI)...	8
2.3.	Descrição do modelo chuva-vazão SMAP	9
3.	Material e Métodos	12
3.1.	Contextualização da área de estudo	12
3.1.1.	Classificação geoambiental da bacia Iô Grande	12
3.2.	Dados de Precipitação e Vazão	14
3.3.	Dados de Temperatura e Evapotranspiração Potencial	15
3.4.	Coeficiente de <i>Runoff</i>	16
3.5.	SPI e SFI	16
3.6.	Teste de Mann-Kendall Sen	17
3.7.	Aplicação do Modelo chuva-vazão SMAP	17
4.	Resultados e Discussão	19
4.1.	Análise das Séries Temporais: Precipitação, Evapotranspiração Potencial e Escoamento Superficial	19
4.1.1.	Sazonalidade	27
5.	Conclusões	38
	REFERÊNCIAS	40

1. Introdução

1.1. Problematização

A República Democrática de São Tomé e Príncipe, é um arquipélago composto por duas ilhas principais, respectivamente a ilha São Tomé e a ilha do Príncipe, e vários ilhéus situados no Golfo da Guiné a 350 km da costa oeste da África. O país é um dos menores países da África com uma dimensão territorial de 1001 km² e um tamanho populacional de 201.528 habitantes, com um clima tropical onde o inverno tem muito mais pluviosidade que o verão, apresentando uma média anual de 1285 mm e uma temperatura média anual de 25,4 °C. Dado seu pequeno tamanho, o isolamento, a susceptibilidade à desastres naturais e a capacidade limitada na gestão administrativa para alcançar o desenvolvimento sustentável, São Tomé e Príncipe é altamente vulnerável aos efeitos da variabilidade e mudanças climáticas (Hydroconseil, 2011).

Figura 1- Mapa de localização de São Tomé



Fonte: Adaptado de Afonso (2016).

Na sequência da seleção e priorização de opções, as medidas de adaptação para São Tomé e Príncipe têm como objetivo a melhoria da vida das populações mais vulneráveis do país, dotando a capacidade de minimizar os efeitos desastrosos das alterações climáticas e da redução da pobreza. O país possui recursos consideráveis de água superficial, distribuídos em um padrão irregular em todo o território, mas com predomínio na zona sul que é a menos habitada. As temperaturas são igualmente influenciadas pelo relevo, embora tenha sido reconhecido que existe

variações importantes no seu aumento das áreas mais altas para as mais baixas. A umidade também é muito alta, podendo atingir valores de 92% durante quase todo o ano, e sendo menor nas áreas de menor altitude, variando entre 70 e 80% ao longo do ano (São Tomé and Príncipe, 2013).

O pequeno arquipélago de São Tomé e Príncipe (STP) é particularmente vulnerável à riscos relacionados com o clima e a hidrologia, como inundações, inundações na costa ou nas margens dos rios, tempestades e episódios de seca, e os seus impactos em setores como a agricultura, pescas e infraestruturas (maioritariamente localizadas na zona costeira). Sendo um país em desenvolvimento, e aliado ao fato de que a agricultura é a maior fonte de renda das famílias rurais, gerando 70% do emprego rural e cerca de 80% das receitas de exportação, torna a maioria da população de STP extremamente vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas. Estudos apontam, por exemplo, que a duração das estações secas provavelmente aumentará em STP (São Tomé and Príncipe, 2013).

1.2. Justificativa

Diante disso, faz-se imprescindível um estudo hidroclimatológico da maior bacia hidrográfica do país, de modo a traçar estratégias de gerenciamento de recursos hídricos que atenda a demanda de toda a população, particularmente em períodos em que há um déficit nas taxas de precipitações compreendidos entre junho até meados de setembro.

Além disso, o presente trabalho visa o fortalecimento da capacidade das entidades nacionais e subnacionais para monitorar a variabilidade hidroclimática, gerando informações e conhecimento hidroclimatológico confiáveis, além de disponibilizar ferramenta para previsões hidrológicas. Os resultados deste trabalho poderão ser combinados com outros dados ambientais e socioeconômicos para aperfeiçoar o processo de tomada de decisão baseada em respostas de aviso prévio à desastres naturais e de adaptação às mudanças climáticas.

1.3. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo hidroclimatológico da bacia hidrográfica do Rio Yô Grande situada em São Tomé e Príncipe.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Classificação geoambiental da bacia hidrográfica;
- Caracterização das variáveis hidrometeorológicas;
- Realização de teste de tendência (Mann-Kendall) para as variáveis hidrometeorológicas.
- Quantificação e análises de secas meteorológicas e hidrológicas na bacia hidrográfica;
- Calibração manual do modelo hidrológico SMAP para respectiva bacia;

1.4. Estrutura da monografia

Além deste primeiro capítulo de introdução, que aborda as características das regiões de São Tomé e a importância do seu estudo hidroclimático, seguido da justificativa e dos objetivos a serem atingidos, esta monografia está estruturada em mais quatro capítulos. O segundo apresenta a revisão da literatura sobre a caracterização de São Tomé e Príncipe abordando os conceitos de precipitação, drenagem e relevo da Ilha de São Tomé, seguido da classificação geoambiental da nossa bacia de interesse onde são abordados os aspectos de relevo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, sendo feito posteriormente uma descrição do índice padronizado de precipitação (SPI), e no último tópico é apresentado uma descrição do processo de calibração manual da bacia utilizando o modelo hidrológico SMAP . No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são apresentados os resultados deste estudo, por meio de análises gráficas com base nos dados processados, além da discussão do mesmo. Por último, o quinto capítulo apresenta as conclusões e as recomendações acerca deste trabalho.

2. Revisão da literatura

2.1. Caracterização das ilhas de São Tomé e Príncipe

Segundo Afonso (2016), o arquipélago é um conjunto de microclimas definidos, principalmente, em função da pluviosidade, da temperatura e da sua localização geográfica.

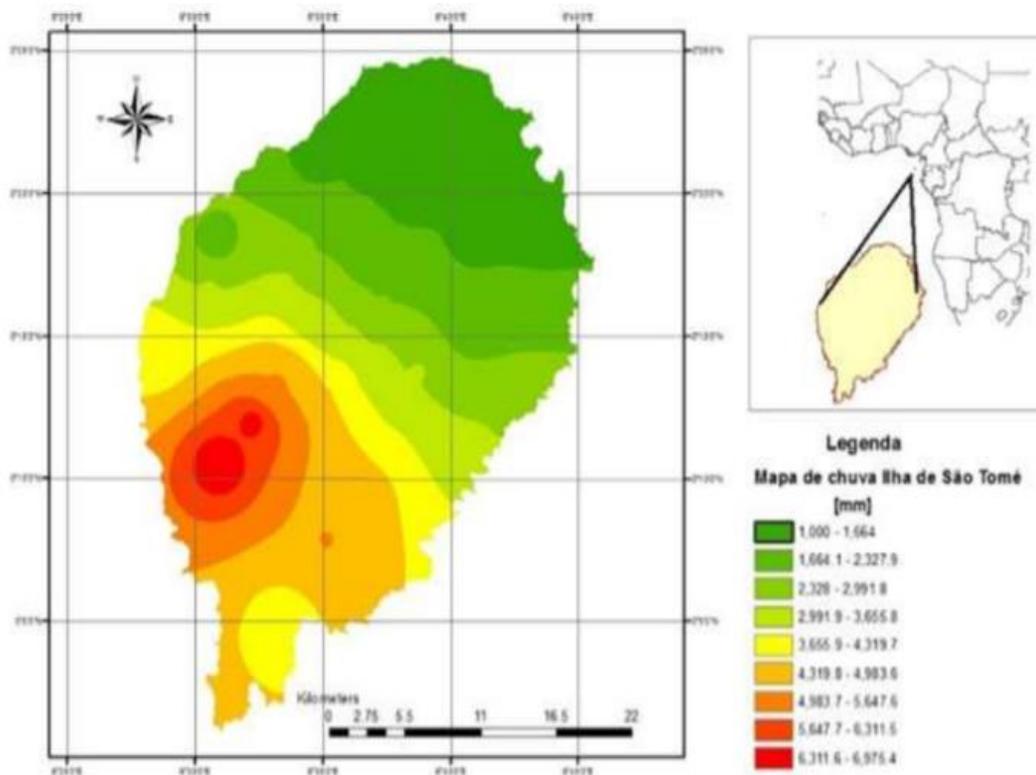
O regime de chuvas em São Tomé e Príncipe é do tipo intertropical úmido, onde as precipitações dependem muito da passagem da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que segue diretamente o trajeto do sol (Hydroconseil, 2011).

Dentre as estações existentes no país em termos de pluviometria destacam-se 4 estações.

Gravana que é a grande estação seca que dura de meados do mês de junho até meados de setembro, onde as precipitações são muito escassas e o caudal dos cursos de água atinge o mínimo anual devido à falta de chuva, implicando também em maior necessidade de irrigação. A estação de chuvas que dura desde meados de setembro até o fim de dezembro, caracterizada ainda por violentos temporais, que provocam cheias muito fortes e rápidas. Existe também a pequena estação seca (“Gravanita”), entre janeiro e fevereiro, claramente menos intensa que a gravana; o caudal dos cursos de água diminui ligeiramente, porém sem atingir os níveis mais baixos observados durante a Gravana. Além disso, existe uma segunda estação de chuvas, de março até meados de junho, com violentas tempestades que provocam cheias extremamente fortes e rápidas (Hydroconseil, 2011).

No que se refere à influência das altitudes, a quantidade das precipitações aumenta substancialmente com a altitude. As precipitações são muito fortes nas encostas Sul e Oeste tanto na ilha de São Tomé como na de Príncipe (3000 a 5000 mm/ano) e claramente menos elevadas nas encostas Norte e Leste (1000 a 2000 mm/ano), sendo particularmente importante a necessidade de irrigação nessas regiões localizadas abaixo de 500 m de altitude (Hydroconseil, 2011).

Figura 2- Precipitação da ilha de São Tomé

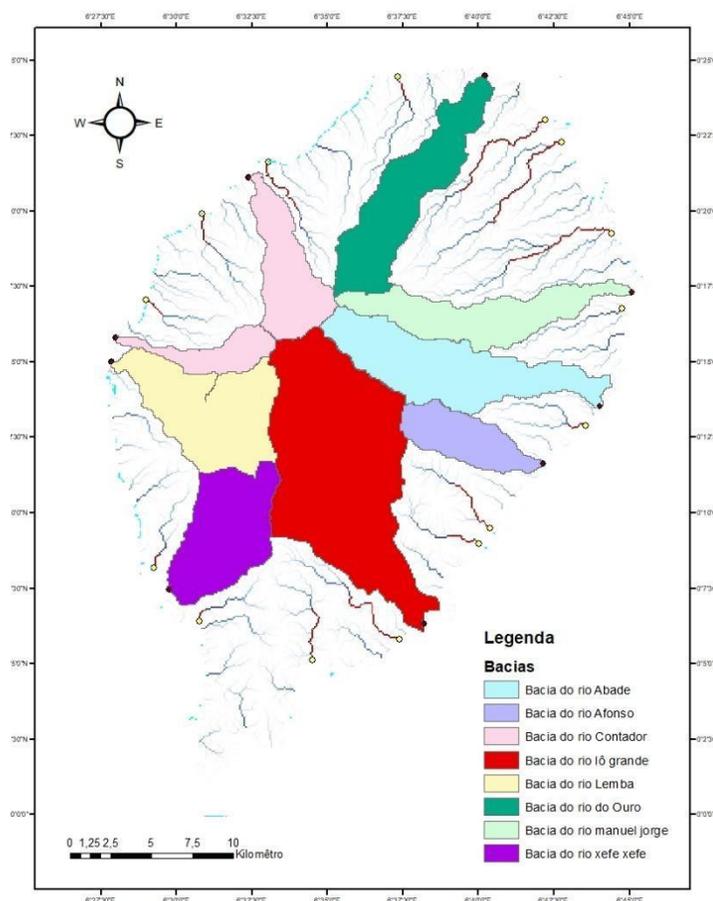


Fonte: Adaptado de Torrent (2011)

No que se refere a hidrografia do país, Oliveira (2009) afirma que São Tomé possui um modelo radial de drenagem onde passam os principais rios (rio Iô grande, rio Abade, rio Afonso, rio Contador, rio Lembá, rio do Ouro, rio Manuel Jorge, rio xufe xufe), nos vales profundos, cobertos com vegetação tropical densa e com terras costeiras de planície, que, em muitos casos, são inundadas durante as cheias (Figura 3).

Ainda de acordo com o Oliveira (2009), o país possui aproximadamente 50 bacias hidrográficas e 223 cursos d'água, sendo que a bacia do Rio Yô Grande, situada na parte sudeste do país é a maior do arquipélago, ocupando cerca de 13% da área da Ilha de São Tomé (Hidrorumo Projecto e Gestão, 1996).

Figura 3 - Principais bacias hidrográficas de São Tomé e Príncipe



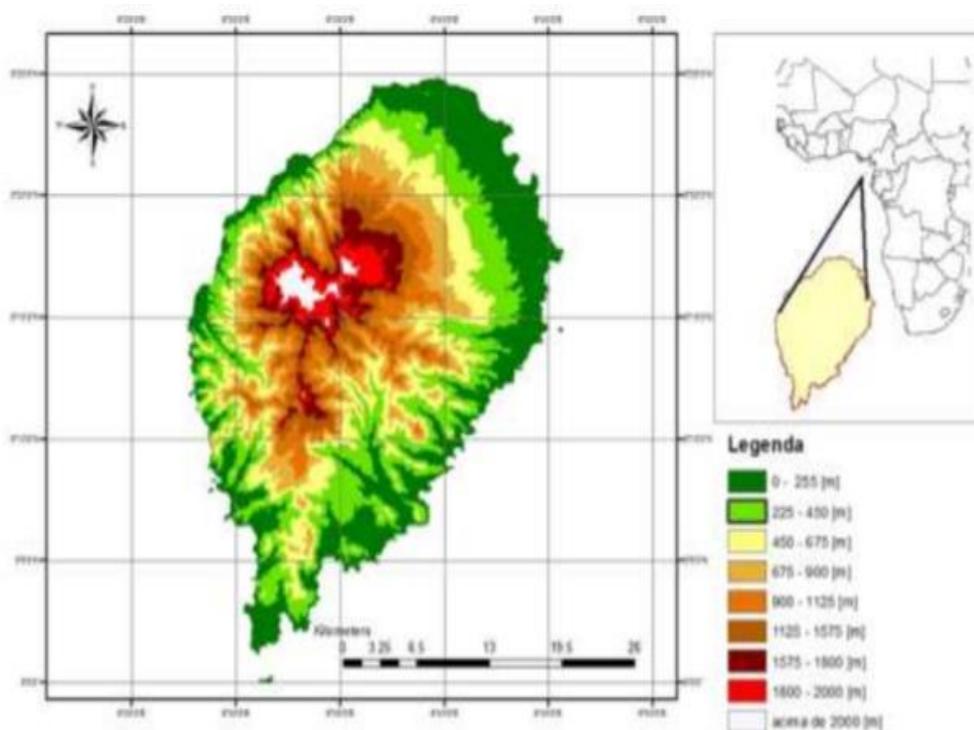
Fonte: Autor (2018)

Como as vazões dos rios são em função do regime das precipitações, existe uma diferença nos valores de vazões medidas por unidade de área nas regiões onde apresentam maiores precipitações, localizadas a sul e oeste e as regiões com menores precipitações localizadas no norte e leste. Devido às altas declividades das bacias e os comprimentos dos rios serem relativamente pequenos, ocorrem entre 10 a 30 cheias por ano, entretanto, o tempo de duração dessas mesmas cheias são de apenas algumas horas, pois o tempo de concentração da água é baixo (Hydroconseil, 2011).

No que diz respeito à gestão dos recursos hídricos disponíveis no país, cerca de 4,93% é usado na agricultura, 2,98% em geração hidroelétrica e 0,45% em abastecimento de água para a população. Os 91,64% restantes não possuem aplicação prática (República Democrática de São Tomé e Príncipe, 2011).

Segundo Afonso (2016), a parte sul da ilha é caracterizada como sendo terra relativamente plana, enquanto que nas altitudes superiores nascem os principais rios do país nomeadamente rio do Ouro, rio Manuel Jorge, Abade e Yô Grande que deságuam na costa ocidental da Ilha de São Tomé (Figura 4).

Figura 4- Relevo da ilha de São Tomé



Fonte: Adaptado de Afonso (2016).

O conhecimento das características hidroclimatológicas da maior bacia hidrográfica de um país é fundamental para o gerenciamento de recursos hídricos, visando o atendimento das necessidades da sociedade. Sendo a bacia hidrográfica do rio Iô Grande a maior bacia hidrográfica de São Tomé e Príncipe, é feito abaixo uma classificação geoambiental da mesma como forma de ajudar na caracterização das variáveis climáticas e hidrometeorológicas, bem como na quantificação e categorização de secas na presente bacia.

2.2. Descrição do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e Índice de Escoamento Padrão (SFI)

O índice padronizado de precipitação (SPI) desenvolvido pelos cientistas americanos McKee, Doesken e Kleist em 1993, é um método que pode ser aplicado por meio de um software gratuito concebido para quantificar o déficit de precipitação para vários calendários, refletindo o impacto de seca sobre a disponibilidade dos diferentes recursos hídricos, condições de umidade de solo para responder a anomalias de precipitação numa escala curta, e para as águas subterrâneas, de escoamento e armazenamento de reservatório numa escala mais longa (MCKEE et al., 1993).

No que se refere ao cálculo do SPI para qualquer localização, o mesmo se baseia na distribuição de probabilidade de precipitação de longo prazo durante o período desejado, que é transformado em uma distribuição normal para que o SPI significativo para o local e período desejado seja zero (Edwards e McKee, 1997). Com isso, valores SPI positivos indicam valores maior do que a precipitação média e valores negativos indicam valores menor que precipitação média.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2012), uma vez que o SPI é normalizado, climas mais úmidos e secos podem ser representados e comparados por meio do SPI, permitindo também que o usuário compare com confiança secas históricas e atuais entre diferentes locais climáticos e geográficos ao avaliar o quão raro, ou frequente, um determinado evento de seca é (Tabela 1).

Tabela 1- Probabilidade de recorrência

SPI	Categoria	Nº de Vezes em 100 anos	Gravidade do Evento
0 a -0,99	Seca Fraca	33	1 em cada 3 anos
-1 a -1,49	Seca Moderada	10	1 em cada 10 anos
-1,5 a -1,99	Seca Severa	5	1 em cada 20 anos
$\leq - 2,0$	Seca Extrema	2,5	1 em cada 60 anos

Fonte: Organização Meteorológica Mundial (2012)

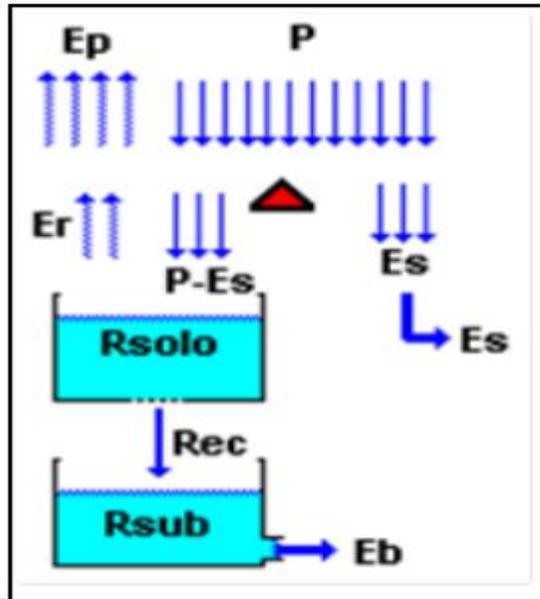
Porém, segundo Wilhite e Glantz (1985), não existe uma definição única de seca, mas que podemos agrupá-las em secas meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas. Não havendo, dessa forma, um único índice de seca que atenda aos requisitos de todas as aplicações. Entretanto, no que se refere a secas hidrológicas, é utilizado um outro índice denominado índice de escoamento padrão (SFI), o qual segue a mesma metodologia do SPI.

Em suma, o cálculo do SPI e SFI se tornam vantajosos quando comparados com outros métodos de avaliação de secas por trabalhar em várias escalas do tempo permitindo a flexibilidade temporal na avaliação das condições de precipitação em relação ao abastecimento de água.

2.3. Descrição do modelo chuva-vazão SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP (Lopes et al., 1981) é um modelo concentrado que tem uma estrutura relativamente simples, cujos parâmetros podem ser relacionados com as características físicas da bacia (e.g. cobertura do solo, profundidade dos solos, existência de fluxo subterrâneo regional). Neste modelo, o número de parâmetros que dependem de calibração é reduzido ao máximo, o que permite a determinação dos valores ótimos globais com maior facilidade permitindo a regionalização dos mesmos.

Figura 5- Estrutura do modelo SMAP



Fonte: Adaptado de López (2017).

O SMAP utiliza como variáveis de entrada a precipitação mensal (P) em mm e a evapotranspiração potencial (EP) mensal em mm. Deve se entrar também com a área da bacia hidrográfica em km², a saturação inicial do solo em mm e a vazão básica inicial (Ebin) (m³/s). O modelo SMAP, em sua versão mensal, é composto por dois reservatórios que matematicamente suas variáveis de estado são atualizadas a cada mês da seguinte maneira:

$$R_{\text{solo}}(i + 1) = R_{\text{solo}}(i) + P - \acute{E} - E_r - \text{Rec} \quad (1)$$

$$R_{\text{sub}}(i + 1) = R_{\text{sub}}(i) + \text{Rec} - E_b \quad (2)$$

Onde:

Rsolo: reservatório de solo (mm)

P: precipitação (chuva)

É: escoamento superficial

Er: evapotranspiração atual

Rec: recarga subterrânea (percolação)

Rsub: reservatório subterrâneo de aquífero (mm)

Eb: escoamento básico (também conhecido como fluxo de retorno)

Portanto o fluxo de água na bacia dado em m^3/s , resulta da soma entre o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo que passa pela área da bacia por unidade de tempo.

$$Q = (Es + Eb) * \text{Área} / 2630 \quad (3)$$

Para o modelo SMAP, os parâmetros a serem ajustados no processo de calibração do modelo são: Str referente a capacidade de saturação do solo (mm), Pes referente ao parâmetro de escoamento superficial (adimensional), Crec referente a coeficiente de recarga do reservatório subterrâneo (%), Kk que se refere a constante de recessão do escoamento de base (meses) e a taxa de deplecionamento (K) que gera o escoamento de base variando de 1 a 6.

A otimização para estimativa de parâmetros, uma das partes fundamentais é o estabelecimento da função objetivo. Na simulação hidrológica, o produto da simulação é um hidrograma calculado pelo modelo que é comparado com aquele observado. O objetivo é aproximar o máximo possível os dois hidrogramas. A função objetivo busca medir a discrepância entre estes valores para que possa ser minimizada.

As funções objetivo para calibração do modelo (otimização dos coeficientes) se baseou na maximização da função objetivo, na qual foi construída a partir da métrica NS.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) apresenta valores sempre inferiores à unidade, podendo variar na faixa de valores compreendidos entre $-\infty$ e 1. Valores elevados do coeficiente de eficiência (próximos à unidade) indicam elevada associação entre os dados observados e calculados, representando um bom ajuste do modelo aos dados de campo. A obtenção de um coeficiente de NS igual à unidade representaria o ajuste perfeito (ou seja, a coincidência perfeita) entre as vazões observadas e calculadas.

Tabela 2- Valores referenciais do critério de Nash-Sutcliffe (NS)

NS	Ajuste
<0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfatório
0,4 - 0,6	Bom
0,6 - 0,8	Muito bom
>0,8	Excelente

Fonte: Adaptado de López (2017).

3. Material e Métodos

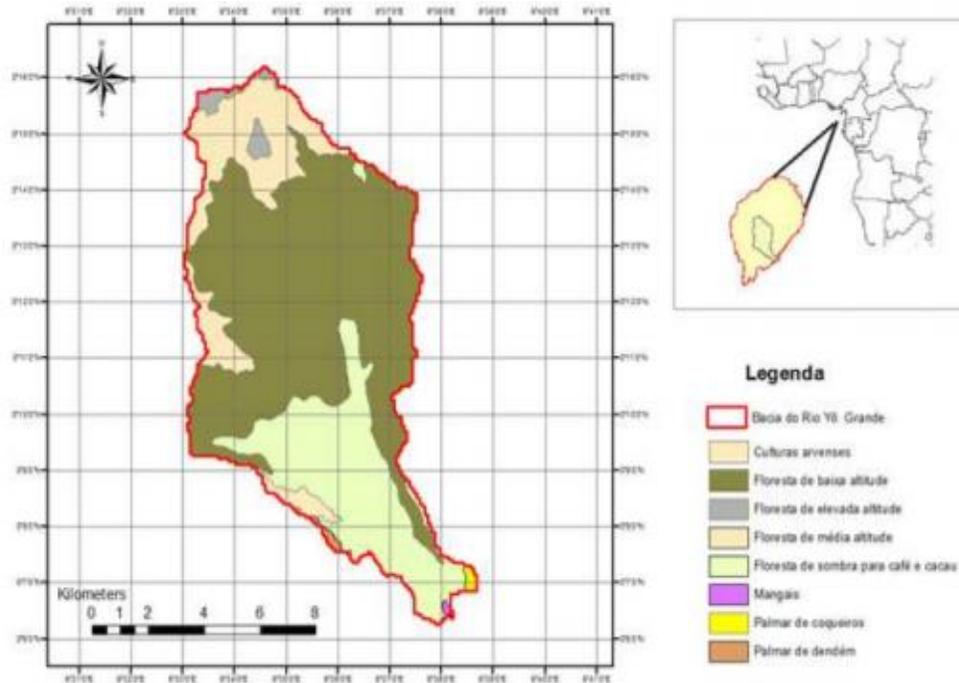
3.1. Contextualização da área de estudo

3.1.1. Classificação geoambiental da bacia Iô Grande

A bacia do rio Iô Grande situada na região menos populosa do país, é a maior bacia do país, localizada na parte sudeste da Ilha com uma área total de 105,7 km². No que se refere ao relevo, o rio Iô Grande nasce na cota de 1400 metros ao sul do pico do Calvário contando com a contribuição de seus principais afluentes nomeadamente rios Ubugu, Miranda, Guedes, João Nunes, Ana Chaves, Campos, Musso e Rita (Hydroconseil, 2011).

Quanto ao uso e ocupação do solo, da área total da bacia hidrográfica, 78 km² corresponde a florestas, onde 25,47 km² corresponde sobretudo a floresta de sombra para café e cacau, 1,46 km² de culturas arvenses, 0,42 km² de palmeiras, 0,32 km² de plantação de coqueiros e 0,11 km² de produção de manga (Figura 5).

Figura 6- Mapa de uso e ocupação de solo

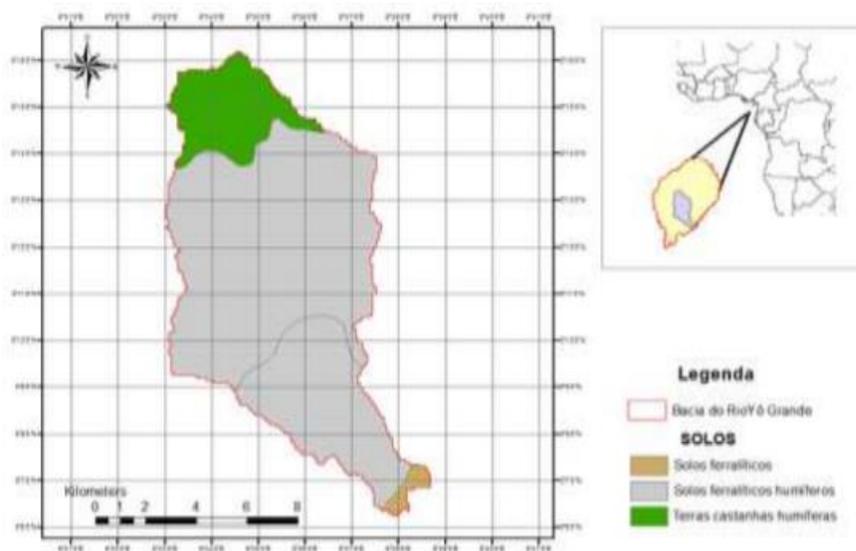


Fonte: Adaptado de República Democrática de São Tomé e Príncipe (2017).

No que diz respeito aos tipos de solos existentes na bacia, é possível observar através do mapa do tipo de solo três tipos de solos, nomeadamente solos ferralíticos húmíferos presentes em aproximadamente 85% da bacia Iô grande, possuindo na cabeceira da bacia o solo denominado terras castanhas húmíferas e por último predominando na sua foz os solos feralíssimos (Figura 6). Os solos ferralíticos húmíferos que ocupam praticamente toda a área da bacia, são solos espessos com horizonte superficial geralmente de cor castanha e com camadas sub-superficiais um pouco mais clara, castanhas ou pardo-amareladas, que se encontram predominantemente em clima super-úmido, mas por vezes em clima úmido e possuem elevado teor de matéria orgânica (Castro, 2010). Em geral, em São Tomé e Príncipe predominam rochas Basálticas de vários tipos de composição traquítica e fenolítica, que dão origem à maioria dos solos existente na ilha, e aparecem em camadas de espessuras muito variável. Sedimentos de diversos tipos intercalam e campeiam as rochas vulcânicas em muitos locais da ilha. Ao longo dos rios, verifica-se a presença essencialmente de calhaus rolados de origem basáltica de diferentes tamanhos ou granulometria, onde o basalto mais comum é compacto, denso e maciço. Eles têm um pH ligeiramente ácido (quase neutro) boa quantidade potássio e fósforo, boa capacidade de troca

catiônica e retenção de água, fazendo com que a condutividade oscila geralmente entre 30 e 150 microS/cm;

Figura 7- Mapa de tipo de solo



Fonte: Adaptado de República Democrática de São Tomé e Príncipe (2017).

3.2. Dados de Precipitação e Vazão

Existe pouca informação sobre a hidroclimatologia da bacia do Rio Iô Grande, devido basicamente ao não investimento em equipamentos de medição.

Pelo facto da inexistência de dados de meteorológicos medidos na bacia em estudo, foram adotados os dados da estação meteorológica mais próxima, a estação do aeroporto nacional de São Tomé a uma distância de 30 km do centróide da bacia.

A série temporal de precipitação mensal e anual cobre o período de 1951 a 2010.

Relativamente aos dados de vazão, a bacia hidrográfica do rio Iô Grande possui uma estação fluviométrica denominada Manuel Caroça, onde estão disponibilizados dados de vazão para o período de 1959 a 1983. Utilizando o software python plotou-se gráficos de precipitação e de vazão, e se procedeu também a elaboração de gráficos de diagramas de caixa mensal e anual com o intuito de analisar como essas duas variáveis se relacionam entre si.

3.3. Dados de Temperatura e Evapotranspiração Potencial

Devido à inexistência de dados históricos de evapotranspiração potencial medidos diretamente na bacia, e possuindo valores de temperatura referentes ao período de 1951 a 2010 obtidos da estação de aeroporto, procedeu-se a determinação do cálculo de evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves-Samani expresso como:

$$ET_0 = 0.0023(T_{\text{méd}} + 17.8).(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5}.Ra \quad (4)$$

Onde $T_{\text{méd}}$, T_{max} e T_{min} correspondem respectivamente a temperatura média, máxima e mínima, e o parâmetro Ra refere-se à radiação extraterrestre expressa por:

$$Ra = 15.34 d_r .(\omega.\text{sen}\omega.\text{sen}\delta + \text{cos}\omega.\text{cos}\delta.\text{sen}\omega) \quad (5)$$

Onde:

d_r - distância relativa da terra ao sol;

ω - ângulo solar (rad);

ϕ - latitude (rad);

δ - declinação solar.

Para a determinação dos parâmetros d_r e δ adotou-se a tabela com os dias julianos variando de 1 a 365, onde geralmente o meio do mês é contado como o dia primeiro, ou seja, para janeiro o dia juliano é 15, para fevereiro é 46 e assim por diante como é mostrado na tabela (3) abaixo.

Tabela 3- Dia Juliano

Ordem	Mês	Dia juliano - J(dias)
1	janeiro	15
2	fevereiro	46
3	março	74
4	abril	105
5	maio	135
6	junho	166
7	julho	196
8	agosto	227
9	setembro	258
10	outubro	288
11	novembro	319
12	dezembro	349

Fonte: Tomaz, 2008

Referente aos dados de temperatura, para correção de algumas falhas optou-se por fazer uma ponderação das médias das temperaturas medidas noutros meses uma vez que não ocorre grande variação da mesma em São tomé e Príncipe. Já para os valores de umidade relativa do ar, não foi preciso proceder a nenhum método de correção de falhas, pois a estação meteorológica de aeroporto possuía série histórica completa de umidade relativa do ar para o período de 1951 a 2010.

Os gráficos diagramas-de-caixa referentes à temperatura e à umidade relativa do ar foram plotados por meio do software Python, com intuito de observar e analisar como essas variáveis influenciam no processo de evapotranspiração potenciais.

3.4. Coeficiente de *Runoff*

O volume de água de chuva que pode ser aproveitado não é o mesmo que o precipitado. Para isto, usa-se um coeficiente de escoamento superficial chamado de coeficiente de *runoff* que é o quociente entre a água que escoam superficialmente pelo total da água precipitada.

Procedeu-se a determinação dos coeficientes de escoamento anuais, considerando o período de 1959 a 1983, uma vez que os dados de vazão são referentes apenas a esse período, implicando na utilização de dados de precipitação para esse mesmo período.

Com os dados obtidos, utilizando o software Python já acima mencionado plotou-se o gráfico para o coeficiente de escoamento anual e sua sazonalidade. Por último, o escoamento superficial foi comparado com a precipitação e a evapotranspiração potencial.

3.5. SPI e SFI

Possuindo os valores de precipitação e vazão, procedeu-se ao cálculo de SPI e SFI para 12 meses por meio de um programa desenvolvido por (MCKEE et al., 1993). Sendo que uma Seca, de acordo com o SPI (ou SFI), inicia-se quando o valor do SPI é igual ou inferior a -1,0 e termina quando o valor se torna positivo, procedeu-se a determinação da categoria das secas baseado nos valores dos SPI's médios, e posteriormente ao cálculo da magnitude das secas que é definida pela soma absoluta dos valores de SPI (ou SFI) para todos os meses de seca (MCKEE et al., 1993).

Após o cálculo do SPI e SFI, e a determinação de suas respectivas categorias, bem como a sua magnitude, elaborou-se uma tabela com as características das secas meteorológicas e hidrológicas, e através do Software Python foram gerados gráficos com os valores de SPI e SFI obtidos, com intuito de analisar a variabilidade da precipitação, bem como a variabilidade da vazão e estabelecer uma comparação entre ambas.

3.6. Teste de Mann-Kendall Sen

Procedeu-se também ao Teste de Mann-Kendall Sen (Mann, 1945; Kendall, 1975) que se refere a um método robusto, sequencial e não paramétrico utilizado para determinar se uma série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa.

O método baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula, de que não exista tendência na série de dados, adotando-se um nível de significância alfa, que pode ser interpretado como a probabilidade de cometer-se o erro de rejeitar a hipótese nula quando esta for verdadeira (Salviano, 2015). Para tal, aplicou-se o teste para os dados de precipitação e temperatura considerando de 1951 a 2010, e para os dados de vazão considerando o período de 1959 a 1983, com o intuito de analisar a tendência dessas determinadas séries e propor alternativas que visam a melhor gestão de recursos hídricos.

3.7. Aplicação do Modelo chuva-vazão SMAP

A aplicação do modelo SMAP, no presente estudo, se deu através da utilização do software Excel. Sendo que se tem disponível dados de vazão apenas para o período de 1959 a 1983, para a avaliação do modelo hidrológico utilizou-se também os dados de precipitação e evapotranspiração potencial referentes a esse período para o efeito de calibração e validação, o que equivale a 25 anos.

Efetou-se uma análise dos valores médios mensais das séries, no período de dados disponíveis (1951 a 1983), e observou-se que o período de estiagem acontece durante os meses de junho até meados de setembro. O modelo SMAP, foi iniciado no período anterior em que há dados de precipitação e não de vazão, isto é, de 1951 a 1958, com chutes iniciais de Ebin e saturação inicial do reservatório solo.

Procedeu-se então a definição do intervalo temporal de aquecimento, calibração e validação do modelo, e posteriormente ao ajuste dos parâmetros do modelo (Str, Pes, Crec Kk e K), e analisou-se os resultados obtidos. Para a etapa de calibração dos parâmetros do modelo, considerou-se o período de dados compreendido entre os anos 1959 a 1972. Os anos de 1951 a 1958, no entanto, não foram utilizados no cálculo das métricas de avaliação do desempenho do modelo (função objetiva), servindo para “aquecimento” do modelo, evitando assim quaisquer ruídos oriundos da inicialização do modelo no processo de ajuste das variáveis de estado. Optou-se por simular um período longo de dados buscando simular uma maior variedade de eventos e condições hidrológicas, bem como garantir a continuidade de longo termo e capacidade de transição entre diversas situações hidrológicas.

Tabela 4 – Períodos de simulação do modelo hidrológico SMAP

Aquecimento (anos)	Calibração (anos)	Validação (anos)
1951 - 1958	1959 – 1972	1973-1983

Fonte: Autor, 2018

Após o ajuste dos coeficientes inerentes à física do modelo (Str, Pes, Crec, Kk e K), procedeu-se ao cálculo do critério de eficiência do modelo (NS) através das equações (6), e os resultados foram registrados e analisados.

$$NS = 1 - [\Sigma (Q_{sim,i} - Q_{o,i})^2] / [\Sigma(Q_{o,i} - Q_{arit})^2] \quad (6)$$

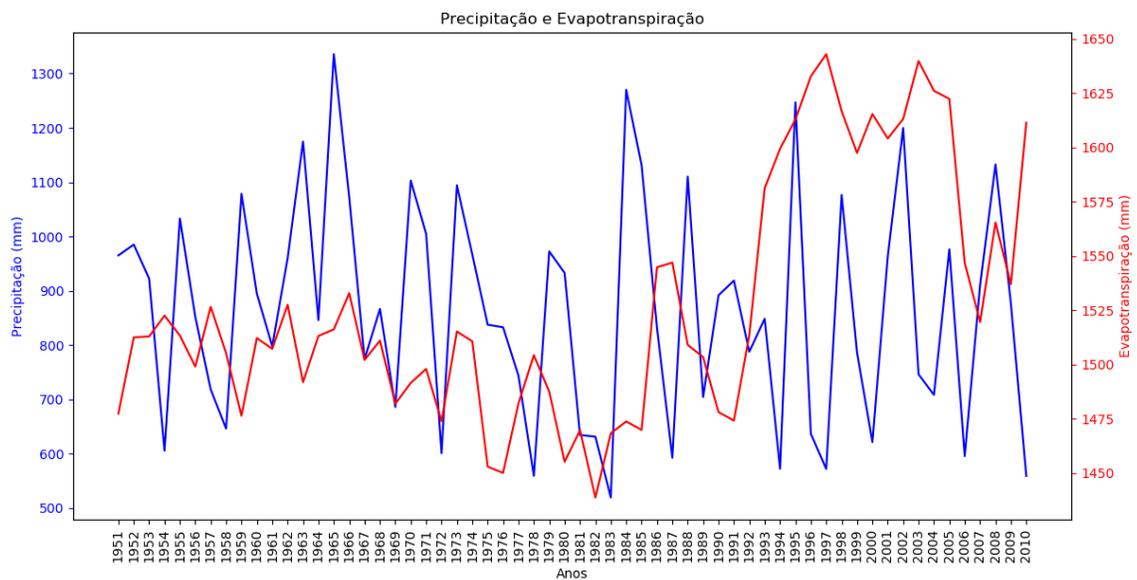
Onde Q sim é o fluxo simulado no período " i " e Q_{o,i} é o fluxo observado para o mesmo período. Q_{arit} é a vazão aritmética média observada para o período de calibração ou validação conforme apropriado e N refere-se ao tamanho da amostra.

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise das Séries Temporais: Precipitação, Evapotranspiração Potencial e Escoamento Superficial

O gráfico da figura 8 mostra a evolução anual da precipitação e da evapotranspiração potencial para o período de 1951 a 2010.

Figura 8- Variação de Precipitação e Evapotranspiração para a Bacia do Rio Iô Grande



Fonte: Autor, 2018.

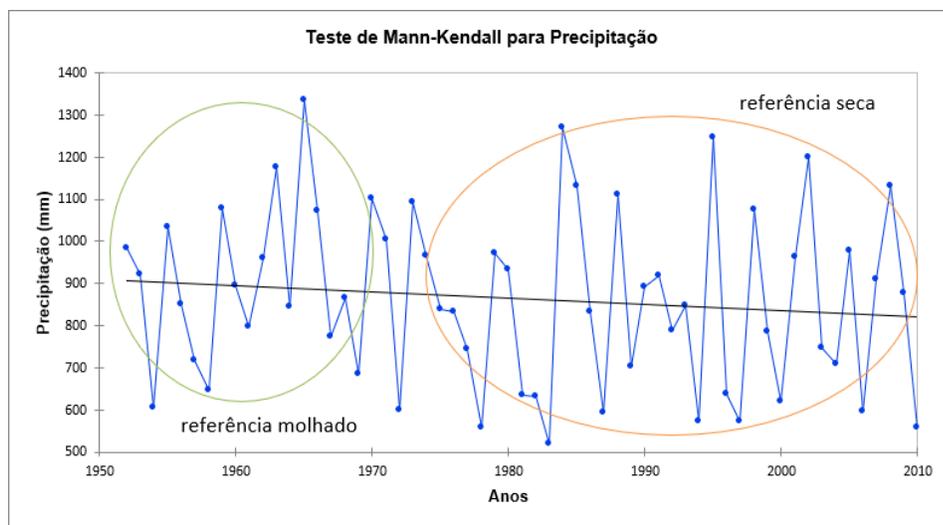
Observa-se ao longo deste período, que os valores de precipitação não apresentam tendência na sua variação contrariamente aos valores de evapotranspiração potencial, sendo constatado este fato através da realização do teste de Mann-Kendall.

Relativamente a precipitação, realizado o teste de Mann-Kendall para 965 variáveis, comparou-se um parâmetro designado de valor p com um nível de significância α , ambos parâmetros do teste, a fim de determinar se a presente série de dados possui ou não tendência. O valor p (bicaudal) foi calculado usando um método exato, onde se obteve um valor de 0,25.

Como o valor de p computado é maior que o nível de significância α igual à 0,05, então rejeita-se a hipótese de que há tendência na série de precipitação, mas no entanto, a probabilidade de ocorrer tendência na série é de 24,98%.

Observa-se dois grandes picos nos valores de precipitação referente ao ano de 1965 e 1984, pelo que em 1983 foi o ano com o menor índice de precipitação. O aumento drástico da precipitação em 1984 fez com que ocorressem danificações de cultura de grão, como o milho, em algumas regiões (República Democrática de São Tomé e Príncipe, 2004).

Figura 9- Teste de Mann-Kendall Sen para precipitação.

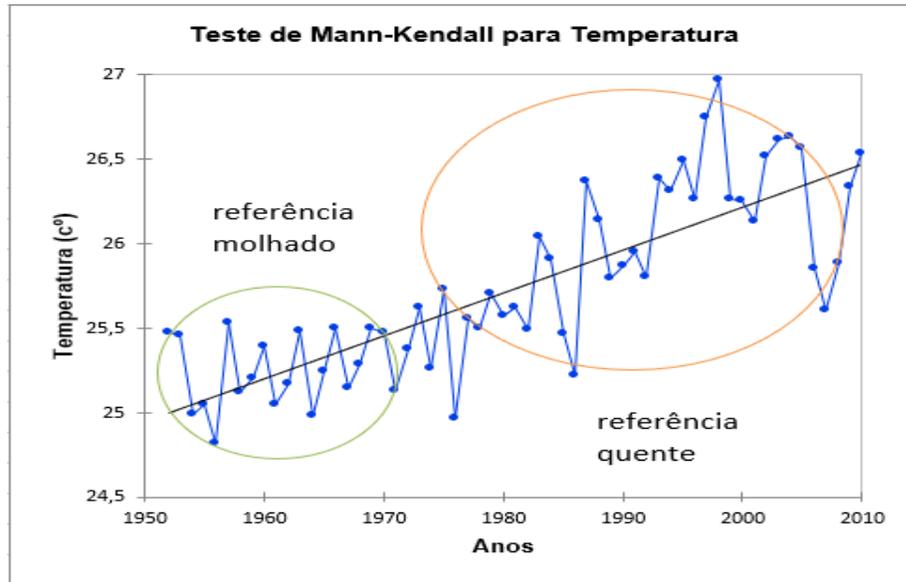


Fonte: Autor, 2018

Nota-se que a evapotranspiração potencial possui valores não muito variados devido ao fato de não ocorrer muita variação nos valores de temperatura no país e conseqüentemente na bacia, porém devido às alterações climáticas e conseqüente aumento da temperatura, o valor da evapotranspiração potencial tem aumentado consideravelmente após o ano de 1983. Devido a esse aumento significativo, procedeu-se também a aplicação do teste de tendência para a série histórica de temperatura para o período de 1959 a 2010, com objetivo de perceber se existe tendência no aumento ou diminuição de temperatura com o passar dos anos. Para isso, determinou-se o valor p (bicaudal) e verificou-se que o mesmo é menor que 0,0001, e como o valor de p computado é menor que o nível de significância α igual a 0,05, pode-se afirmar que existe uma tendência na série de temperatura e a probabilidade de não existir tendência na série é de 0,01%.

Fatores como desmatamento para obtenção de lenha e produção de biocombustível nomeadamente carvão, é umas das causas do aumento de temperatura em São Tomé e Príncipe, uma vez que o país faz muito uso desse combustível.

Figura 10- Teste de Mann-Kendall Sen para temperatura.



Fonte: Autor, 2018

No que se refere ao plano temporal, existe uma elevada variabilidade interanual nos valores de precipitação, variando de 100 a 200 mm de um ano para outro, onde esta variabilidade muitas vezes toma a forma de uma sucessão de períodos que tendem a húmido e seco, embora devido o estudo limitado não permite afirmar uma verdadeira periodicidade climáticas (República Democrática de São Tomé e Príncipe, 2004).

É possível identificar através da figura 9 e 10, aproximadamente, dois conjuntos que se assemelham períodos homogêneos.

- Um período antes de 1970, marcado por um clima de umidade relativa com uma alta prevalência de altas precipitações e baixas temperaturas.
- Um segundo período subsequente a essa data, marcado por baixa precipitação e contínuo aumento das temperaturas.

Este segundo período, que parece continuar hoje, pode ser considerado um período relativamente seco e quente para as condições climáticas do país, e esta evolução climática no sentido de uma seca relativa, afeta rapidamente o nordeste (onde existe maior densidade

populacional) e o sudoeste da ilha, e a longo prazo podendo afetar todo o país (República Democrática de São Tomé e Príncipe, 2004). As referências húmidas (1951-1970) e secas (1961-1990) assim identificadas mostram que o país não está imune a possíveis perturbações climáticas, e o aumento da temperatura com o declínio na precipitação mostrada nos gráficos acima, confirmam a tese da mudança climática profunda no país.

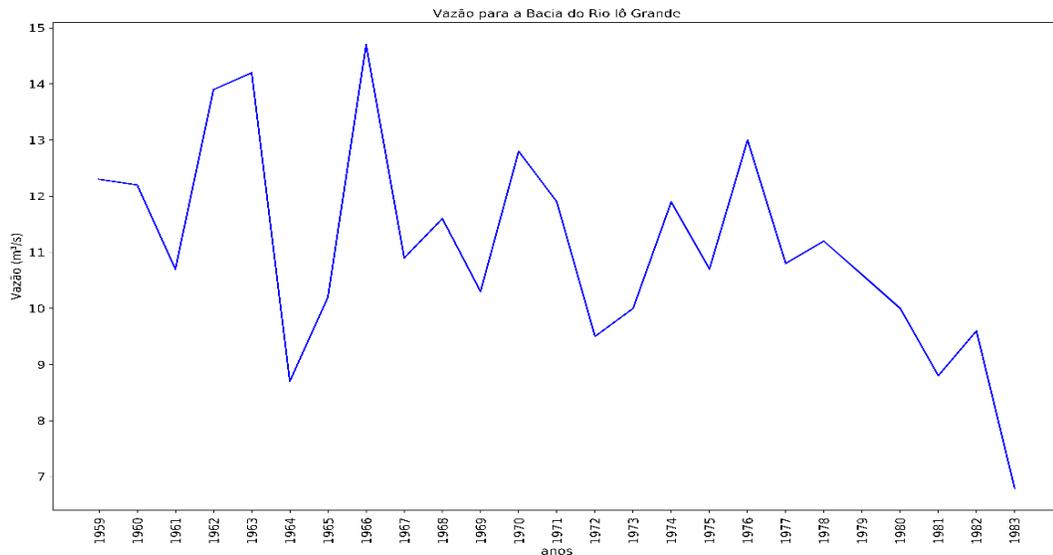
Após a elaboração e análise de tendência para os dados de precipitação e temperatura foi aplicado o teste para a série histórica de vazão, considerando o período de 1959 a 1983, com intuito de verificar como a precipitação e temperatura influenciam na vazão da bacia do rio Iô Grande.

Para tal, utilizando também um método exato para o cálculo do parâmetro p-valor (bicaudal) pôde-se observar que o mesmo foi de 0,021, e como o valor de p computado é menor que o nível de significância alfa igual à 0,05, pode-se afirmar que existe uma tendência na série de vazão e a probabilidade de não ocorrer tendência na série é 2,11%.

O gráfico da figura 11 ilustra o comportamento decrescente da vazão, que é influenciada pelo aumento da temperatura e diminuição da precipitação, o que gera uma grande preocupação para as companhias de abastecimento de água que não estão preparadas para lidar com a captação de água num nível baixo, o que aumentaria o custo para essas mesmas companhias fazendo com que aumentasse também o custo da fatura de água para a sociedade (HYDROCONSEIL, 2011).

A bacia Iô Grande possui grande potencial hidrelétrico, capaz de produzir por ano cerca de 82 GWh de energia, e sendo a maior bacia do país, faz-se necessário a elaboração de um plano que visa o melhor gerenciamento de recursos hídricos na respectiva bacia, com o intuito de suprir a demanda da sociedade nos diversos aspectos caso ocorra um déficit de água. São Tomé e Príncipe tende a enfrentar uma diminuição gradual no fluxo de seus rios, e tal fenômeno representará grandes dificuldades económicas no país.

Figura 11- Variação da Vazão anual na bacia do Rio Iô Grande



Fonte: Autor, 2018

Sendo que o alto coeficiente de escoamento superficial ocorre quando a intensidade da precipitação é maior que a capacidade de infiltração no solo e os espaços nas superfícies retentoras tenham sido ocupados, a intensidade e a duração da precipitação, tem relação direta com o escoamento uma vez que, quanto maior for a intensidade e a duração da chuva, maior será a velocidade de escoamento.

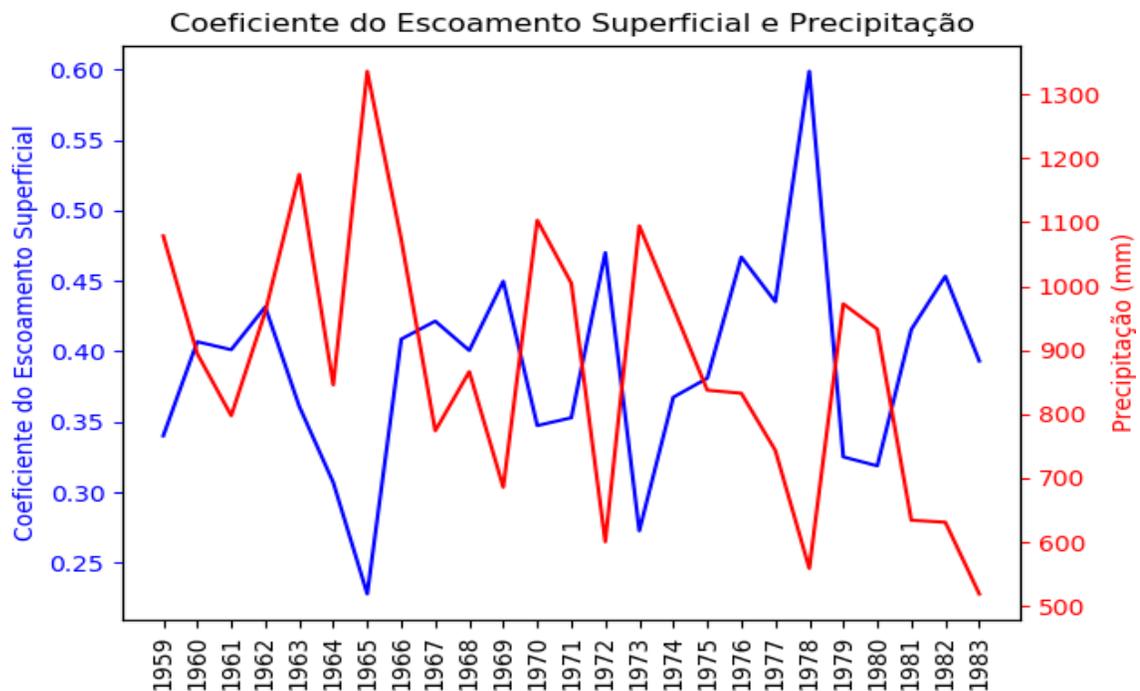
Sendo que o coeficiente de escoamento superficial é dado em função da vazão que esco superficialmente pelo total da água precipitada, e possuindo série histórica de vazão apenas para o período de 1959 a 1983, adotou-se o mesmo período para a série histórica de precipitação.

É possível observar através da figura 9 que mesmo para anos em que a taxa de precipitação é baixa, aproximadamente 45% da água que cai é convertida em escoamento superficial. Ressalta-se ainda que quando há ocorrência de precipitações antecedentes, uma vez que, o solo já se encontra úmido devido a chuvas anteriores, é possível observar que há aumento na porção escoada. Entretanto verifica-se anos com alto índice de precipitação mais com baixa taxa de escoamento, fator esse que pode estar associado ao aumento parcial da temperatura e as características do solo na bacia. São Tomé e Príncipe por estar situado na zona equatorial possui uma floresta densa.

As bacias hidrográficas são vulneráveis a alterações da vegetação, pois estas interferem nas propriedades do solo, o que se vai refletir nas propriedades da água dos rios, e consequentemente no ciclo hidrológico. A cobertura florestal, através de um processo denominado de interceptação, influencia a redistribuição da água da chuva, formando as copas das árvores um sistema de amortecimento, encaminhamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o processo de infiltração (Barros, 2011).

A floresta propicia uma diminuição na evaporação do solo, conserva e aumenta a capacidade de infiltração, contém e reduz a erosão e o depósito de sedimentos nos canais fluviais e aumenta a capacidade de retenção de água no solo pela manutenção e aumento da porosidade (Barros, 2011). Em geral, embora a evapotranspiração apresenta valores elevados (figura 8), esta perda é compensada pela melhor economia do restante da água que segue o ciclo hidrológico.

Figura 12- gráfico de coeficiente escoamento superficial e precipitação anual

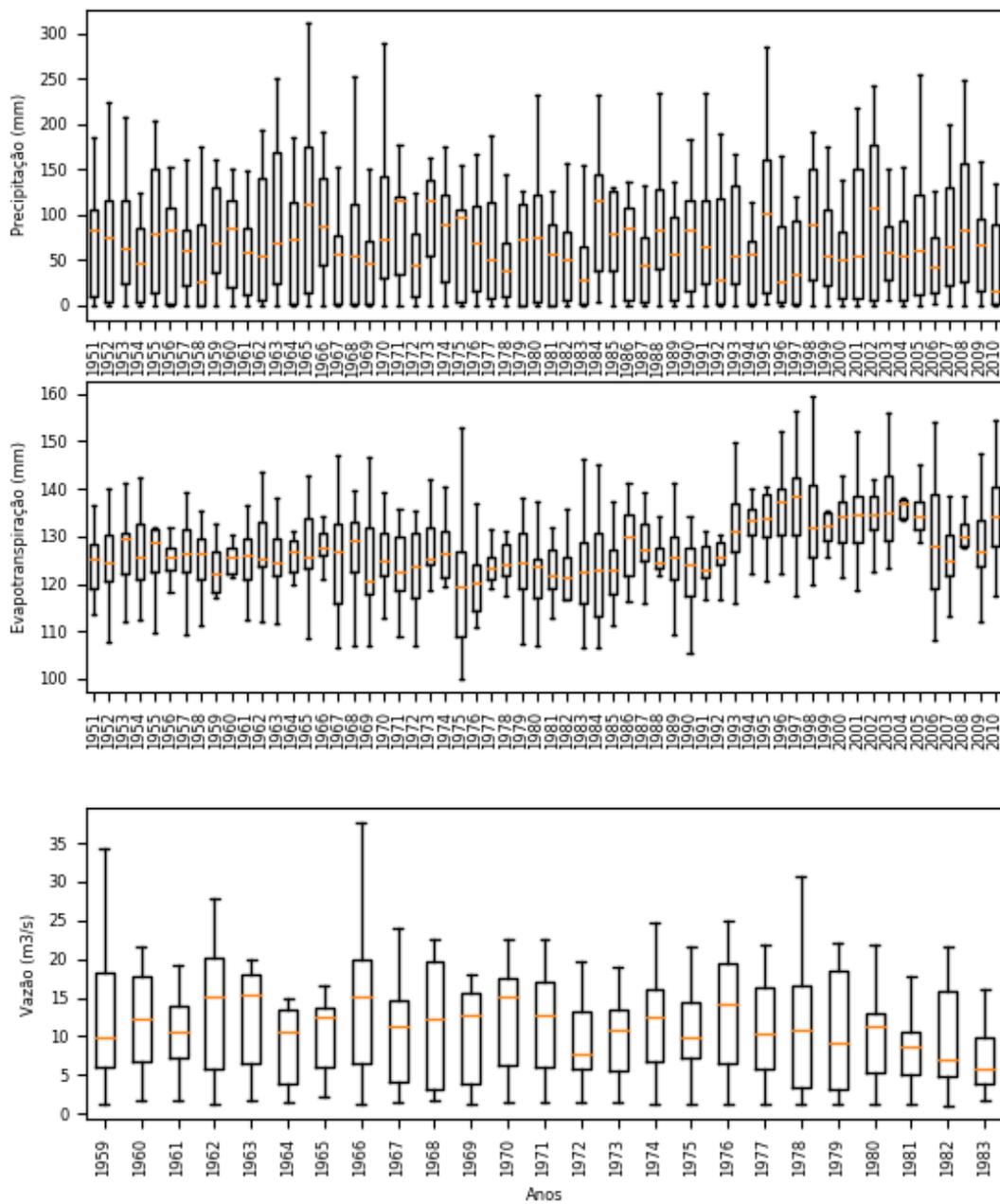


Fonte: Autor, 2018.

Em São Tomé, o verão é com precipitação e de céu encoberto, o inverno é curto, seco, de ventos fortes e de céu quase encoberto. Ao longo do ano, em geral, a temperatura varia de 24 °C a 28 °C e raramente é inferior a 23°C ou superior a 29°C.

O gráfico da figura 13 mostra os diagramas de caixa para as séries de precipitação, evapotranspiração e vazão respectivamente, onde é possível observar que a precipitação tem diminuído parcialmente e a evapotranspiração aumentando, não corroborando com o que é esperado para este tipo de clima. Evidencia-se que por volta dos anos 70 em diante a máxima das precipitações têm diminuído, fazendo com que houvesse período durante os anos em que o valor das chuvas mediana rondasse a faixa de 50mm. Já é possível observar que o valor da evapotranspiração máxima ao longo dos anos vem aumentando, consequência do aumento da temperatura, fazendo com que no ano exista meses em que a evapotranspiração atinja valores superiores a 150 mm. Avaliando no gráfico de precipitação e evapotranspiração o período de 1959 a 1983, período este o qual temos a série de vazão observada na bacia do Rio Iô Grande, percebe-se que existe uma diminuição nos valores máximos de precipitação, enquanto que não se verifica a influência imediata da evapotranspiração potencial, embora exista para esse período um aumento da temperatura como foi anteriormente mostrado na figura 9. Com isso percebe-se através do diagrama de caixa referente a vazão também uma diminuição nas máximas de vazões anuais o que é extremamente preocupante.

Figura 13- gráfico de diagrama de caixa de precipitação, Evapotranspiração Potencial e Vazão para a bacia do Rio Iô Grande

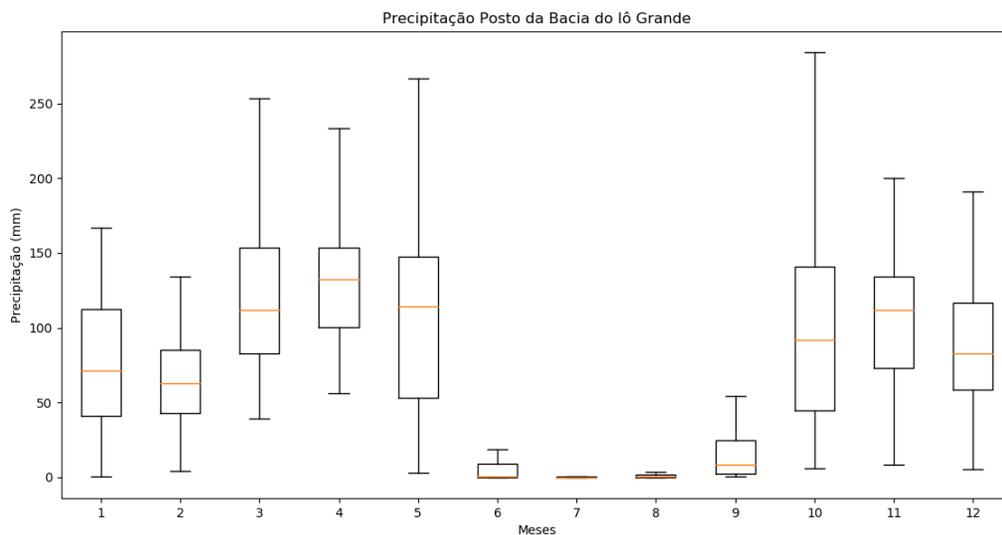


Fonte: Autor, 2018

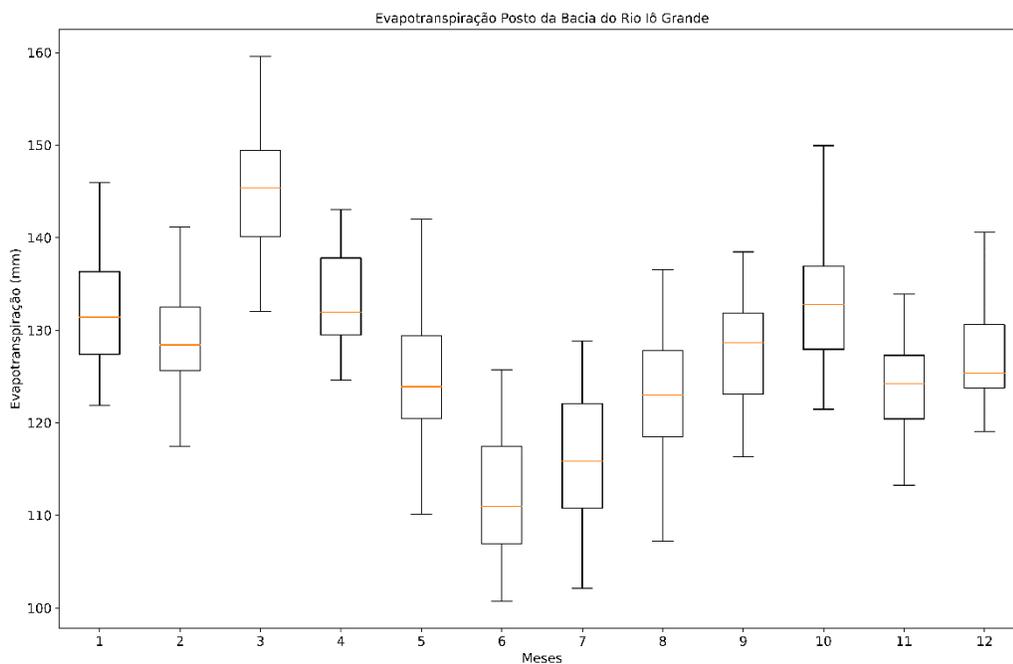
4.1.1. Sazonalidade

Com o objetivo de perceber como ocorre a variação da precipitação, vazão e evapotranspiração em diferentes épocas do ano, e tendo gerado gráficos de diagramas de caixa relativos a precipitação e a evapotranspiração, é possível observar através do gráfico da figura 13 que as taxas de precipitações, bem as de evapotranspiração potencial são baixas nos meses de janeiro e fevereiro período referente a gravanita, a curta estação seca, com precipitações médias de aproximadamente 70 mm e evapotranspiração média na faixa de 130 mm, fazendo com que caudal dos cursos de água diminua ligeiramente (figura 14), sem no entanto atingir os níveis observados durante a Gravana, situando-se na faixa de aproximadamente 15 m³/s. Os meses de março até meados de junho, são correspondentes a segunda estação de chuvas com violentas tempestades, com precipitações médias de aproximadamente 130 mm, e evapotranspiração potencial de 140 mm. Dado ao grande aumento da precipitação, apresentando apenas um ligeiro aumento na evapotranspiração potencial, verifica-se o aumento da vazão, estando esta na média de 20 m³/s. Em seguida prossegue a estação seca (Gravana) mais extensa, com precipitações baixas nos meses de junho, julho, agosto e meados de setembro, não ultrapassando 50 mm, onde se verifica também a descida nos valores da evapotranspiração ficando na faixa de 120 mm. Pelo fato dessa drástica diminuição na taxa de precipitação e descida não tão significativa da evapotranspiração potencial, há uma grande diminuição na taxa de vazão, atingindo valores inferiores a 5 m³/s. E por último a estação que vai de meados de setembro até o fim de dezembro, onde se verifica o aumento de precipitação ultrapassando 50 mm e o aumento da evapotranspiração potencial estando na faixa média de 130 mm fazendo com que ocorra um grande aumento na vazão.

Figura 14 - gráficos de diagrama de caixa para precipitação (a) e evapotranspiração (b).



(a)



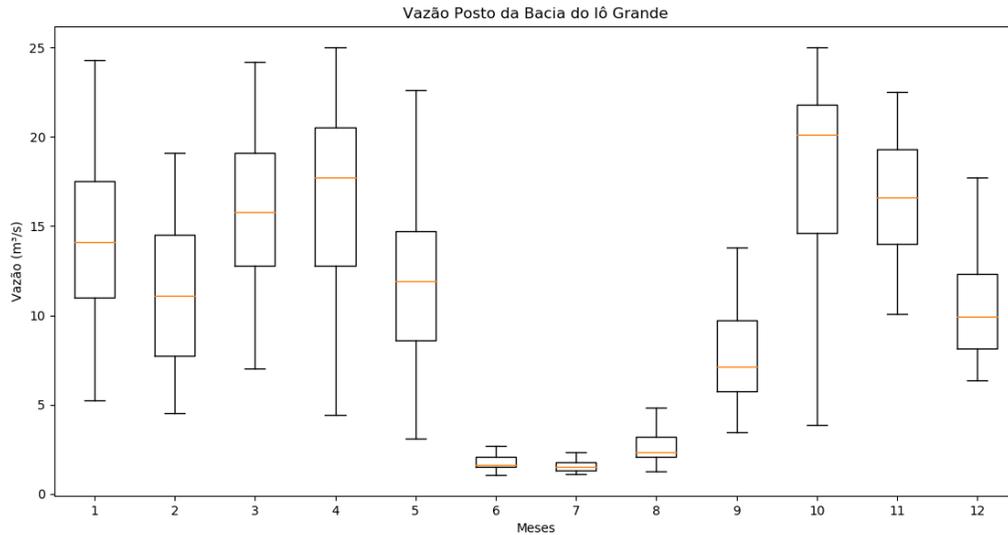
(b)

Fonte: Autor, 2018.

Como consequência do baixo índice de precipitação durante o período correspondente a gravana, existe também a diminuição de vazão do rio para este período (figura 14). Nesse sentido faz-se necessário traçar uma estratégia de gerenciamento de água durante o ano, com intuito de

suprir a demanda de água no período de gravana, pois para os restantes meses do ano não existe esse déficit de chuva e consequentemente de vazão.

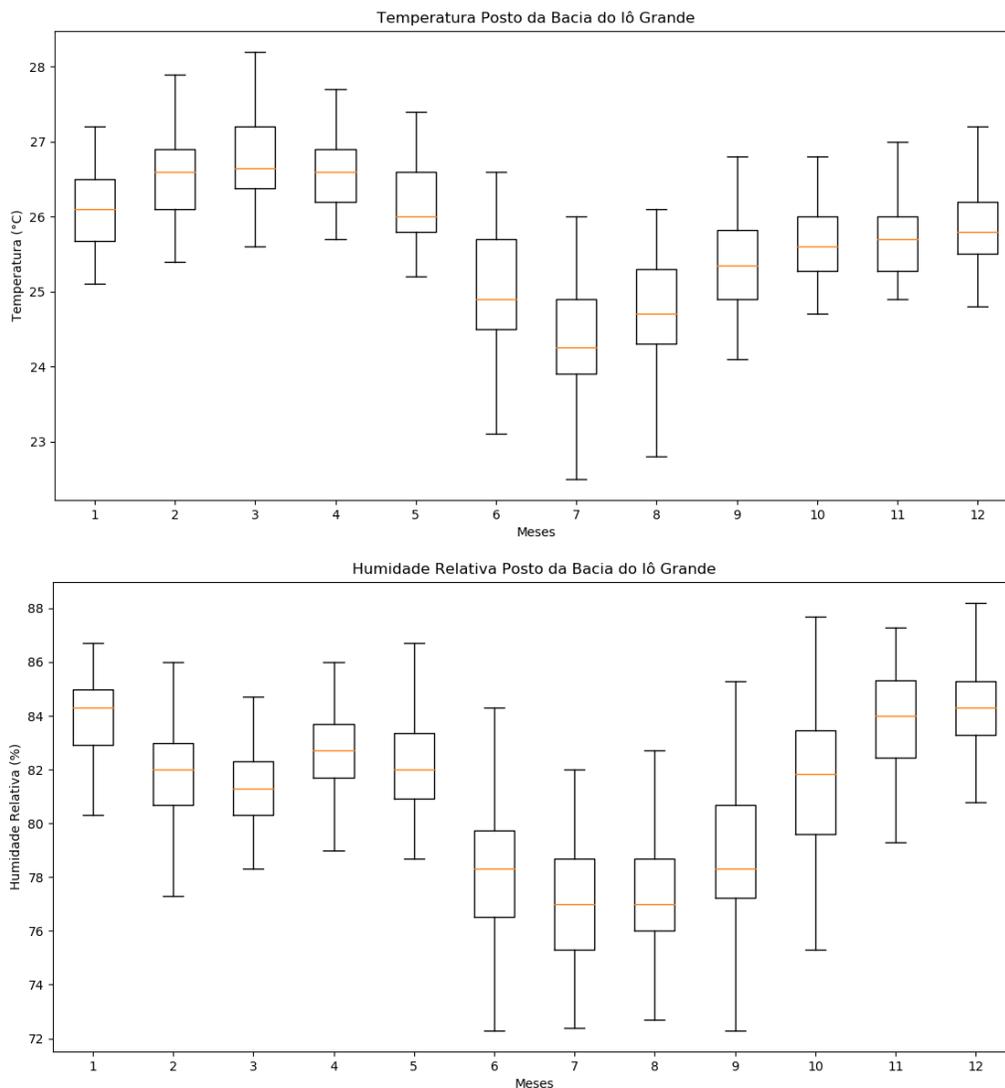
Figura 15- gráfico de diagrama de caixa para vazão mensal



Fonte: Autor, 2018.

Os gráficos de diagrama de caixas abaixo mostram a variação da temperatura, bem como da umidade relativa do ar para a bacia hidrográfica em estudo, sendo que os parâmetros como temperatura e umidade relativa do ar têm influência direta no processo de evapotranspiração determinando as condições do solo, o que impacta diretamente no processo de escoamento. É possível verificar que nos meses de janeiro e fevereiro referente a gravanita, a temperatura atinge valor médio de aproximadamente 26,5 °C, enquanto que a taxa média de umidade relativa é de aproximadamente 83%. Já nos meses de março, abril e maio, não há uma variação significativa da temperatura, porém acontece uma diminuição na taxa de umidade relativa do ar ficando esta na faixa de 81%. Na estação de gravana (junho a meados de setembro) há diminuição tanto nos valores de temperatura, como nos valores de umidade relativa do ar. A temperatura média estando na faixa de 25°C e a umidade relativa na faixa de 75%. Mesmo ocorrendo diminuição nesses valores, devido à baixa taxa de precipitação que cai nesse período verifica-se a diminuição de vazão. Os gráficos abaixo mostram esse comportamento.

Figura 16- gráficos de diagrama de caixas para temperatura e umidade relativa do ar



Fonte: Autor, 2018

4.2. Secas meteorológicas e hidrológicas

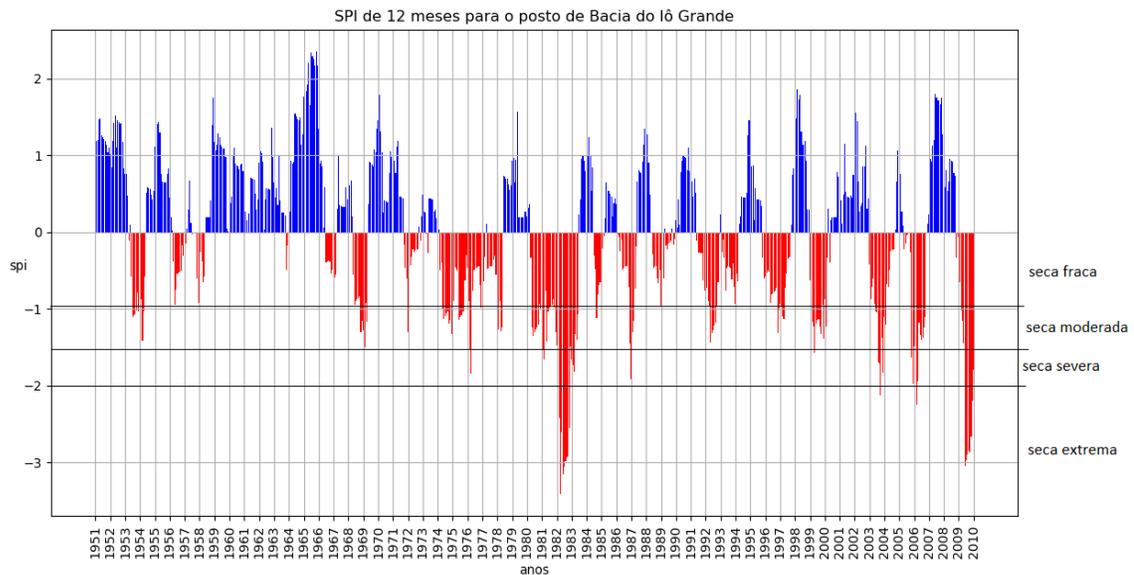
O gráfico da figura 17 é referente ao índice de precipitação padronizado (SPI), onde o SPI calculado representa o quanto a precipitação desviou da normal, representando uma diminuição ou aumento de valores de chuva. Uma vez que se possui dados de precipitação para o período de 1951 a 2010, plotou-se o gráfico SPI para esse mesmo período. Percebe-se através do gráfico que a partir do período de 1970 em diante o número de acontecimentos de secas meteorológicas têm aumentado.

Através do gráfico de SPI, nota-se que no período de aproximadamente 1981 à 1984 ocorreu uma seca meteorológica de categoria severa como é descrita na tabela abaixo, porém observou-se em 1983 um ano excepcional, com uma Gravana mais longa e poucas precipitações, onde a escassez da chuva teve impactos desastrosos na produção alimentar e o país se viu forçado a recorrer à ajuda alimentar internacional (HYDROCONSEIL, 2011). Percebe-se através do gráfico que devido a magnitude da seca apresentada na tabela 5 nesse mesmo ano, fez com que a seca passasse por uma categoria mais crítica com valores extremos inferiores a -2 o que caracteriza a categoria de seca extrema.

Tal fenômeno é raro (ocorreu apenas uma vez no século), mas é provável que aconteça novamente, e para tal os meios de prevenção são extremamente limitados, salvo o aumento das superfícies destinadas às culturas alimentares nas zonas mais elevadas, onde a Gravana é menos intensa (HYDROCONSEIL, 2011).

Nota-se também um período de seca meteorológica no ano de 1974 a 1978, marcado pela baixa taxa de precipitação atingindo o valor de aproximadamente 800 mm anual.

Figura 17- - gráfico de SPI para bacia do rio Iô Grande

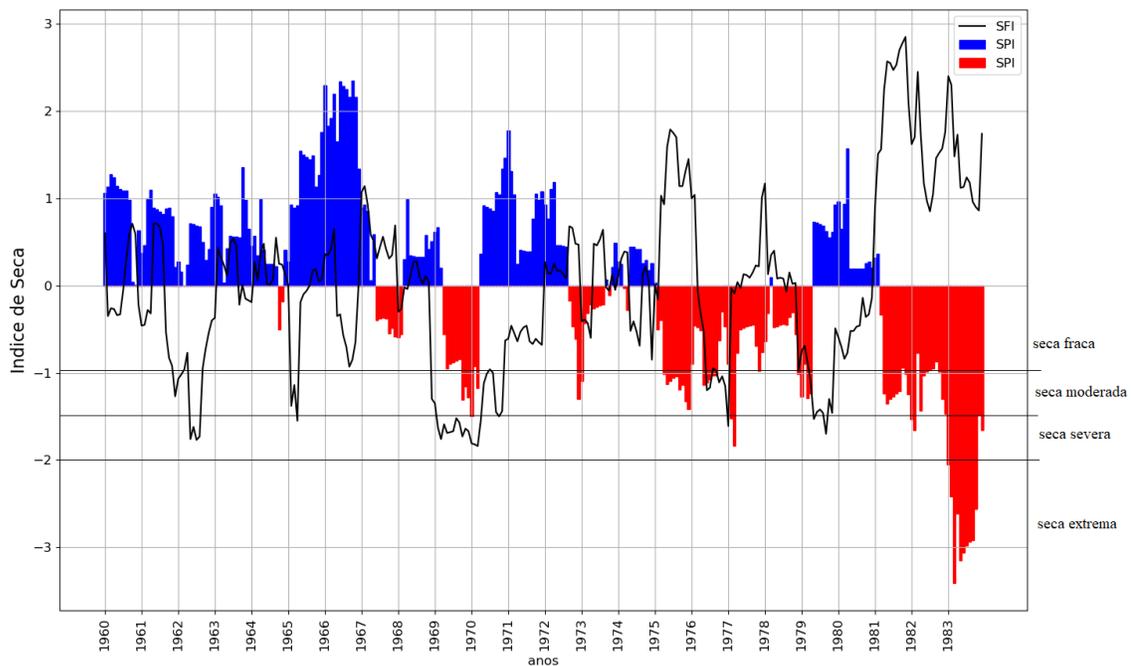


Fonte: Autor, 2018

Sendo que se possui apenas dados de vazão para o período de 1959 a 1983, desconsiderou-se o ano de 1959, uma vez que para este ano só se obteve o SFI para o mês de dezembro não sendo possível calcular para os restantes meses. Com isso adotou-se para o estudo e análise o ano de 1960 como sendo o ano inicial. Considerando os dados de precipitação para

este mesmo período é possível fazer uma comparação entre as secas meteorológicas (referentes ao SPI) e secas hidrológicas (referentes ao SFI), onde o SFI calculado mostra a escassez ou não de água.

Figura 18- gráfico de SFI para bacia do rio Iô Grande



Fonte: Autor, 2018.

É possível observar que, quando a seca meteorológica é de categoria fraca e curta duração, esta pode não ser percebida na seca hidrológica, todavia, a seca hidrológica de categoria fraca e moderada pode ser percebida mesmo quando não se verifica secas meteorológicas.

No que se refere ao SFI, percebe-se através da tabela 6 que há ocorrência de uma seca de categoria severa referente ao período de 1981 a 1983, período este em que houve grande déficit de precipitação como visto no gráfico de SPI, e percebe-se a ocorrência de duas secas de categoria moderada, onde através do gráfico constata-se que essas mesmas secas não passaram por categorias mais críticas, porém é possível observar no gráfico acima que algumas secas de categorias fracas descritas na tabela 6 passaram por uma categoria mais críticas com valores inferiores a -1, o que caracteriza as secas do tipo moderada.

Possuindo períodos históricos distintos, no que diz respeito a número de secas meteorológicas e hidrológicas, é possível observar através da tabela de secas meteorológicas ocorrência de 3 secas de categoria moderada, 2 secas de categoria severa sendo as demais caracterizadas como secas fracas, e através da tabela de secas hidrológicas a ocorrência de duas secas de categoria moderada, uma seca de categoria severa e as demais de categoria fraca.

Percebe-se que quando há ocorrência de seca meteorológica de categoria moderada e severa, na maioria das vezes a mesma se propaga na seca hidrológica, como pode-se observar no ano de 1069 a 1970, ocorrendo em alguns casos a propagação da seca hidrológica (até dezembro de 1971) mesmo após o término da seca meteorológica, impactando no déficit de água na bacia.

Entretanto o duplo efeito da seca de categoria moderada ou severa tanto meteorológica, quanto hidrológica, implica graves consequência no ramo da agricultura relativamente à questão de irrigação, afetando, dessa forma, a indústria alimentar, como também impacta na questão de abastecimento e suprimento de água para a sociedade através das companhias fornecedoras, que não estão preparadas para lidar com esse tipo de evento.

Tabela 5- Características das secas meteorológicas

Quant.	Início	Fim	Duração (meses)	SPI médio (meses)	Magnitude	Categoria
1	março de 1954	março de 1954	1	-0,110	0,110	seca fraca
2	maio de 1954	abril de 1955	12	-1,001	12,010	seca fraca
3	março de 1957	janeiro de 1958	11	-0,455	5,000	seca fraca
4	junho de 1958	abril de 1959	11	-0,367	4,040	seca fraca
5	outubro de 1964	novembro de 1964	2	-0,340	0,680	seca fraca
6	junho de 1967	fevereiro de 1968	9	-0,478	4,300	seca fraca
7	abril de 1969	março de 1970	12	-1,028	12,330	seca moderada
8	setembro de 1972	agosto de 1973	12	-0,463	5,560	seca fraca
9	outubro de 1973	outubro de 1973	1	-0,110	0,110	seca fraca
10	março de 1974	abril de 1974	2	-0,155	0,310	seca fraca
11	fevereiro de 1975	fevereiro de 1978	36	-0,844	31,240	seca fraca
12	abril de 1978	abril de 1979	12	-0,710	9,230	seca fraca
13	março de 1981	maio de 1984	39	-1,633	63,700	seca severa
14	junho de 1985	fevereiro de 1986	9	-0,504	4,540	seca fraca
15	janeiro de 1987	abril de 1988	16	-0,639	10,220	seca fraca
16	abril de 1989	fevereiro de 1990	11	-0,505	5,560	seca fraca
17	abril de 1990	novembro de 1990	8	-0,128	1,020	seca fraca
18	maio de 1992	novembro de 1993	19	-0,752	14,290	seca fraca
19	janeiro de 1994	fevereiro de 1995	14	-0,511	7,160	seca fraca
20	outubro de 1996	agosto de 1998	23	-0,723	16,620	seca fraca
21	dezembro de 1999	fevereiro de 2001	15	-1,065	15,980	seca moderada
22	abril de 2001	abril de 2001	1	-0,400	0,400	seca fraca
23	dezembro de 2003	agosto de 2005	21	-0,931	19,560	seca fraca
24	abril de 2006	julho de 2006	4	-0,113	0,450	seca fraca
25	setembro de 2006	outubro de 2007	14	-1,373	19,220	seca moderada
26	outubro de 2009	dezembro de 2010	39	-1,751	26,270	seca severa

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 6 - Características das secas hidrológicas

Quant.	Início	Fim	Duração (meses)	SFI médio (meses)	Magnitude	Categoria
1	fevereiro de 1960	julho de 1960	6	-0,267	1,600	seca fraca
2	dezembro de 1960	abril de 1961	5	-0,346	1,730	seca fraca
3	setembro de 1961	janeiro de 1963	17	-1,014	17,240	seca moderada
4	setembro de 1963	setembro de 1963	1	-0,220	0,220	seca fraca
5	novembro de 1963	janeiro de 1964	3	-0,170	0,510	seca fraca
6	fevereiro de 1965	julho de 1965	6	-0,737	4,420	seca fraca
7	maio de 1966	novembro de 1966	7	-0,626	4,380	seca fraca
8	janeiro de 1968	abril de 1968	4	-0,158	0,630	seca fraca
9	dezembro de 1968	dezembro de 1971	37	-1,187	43,910	seca moderada
10	janeiro de 1973	abril de 1973	4	-0,458	1,830	seca fraca
11	setembro de 1973	outubro de 1973	2	-0,040	0,080	seca fraca
12	dezembro de 1973	dezembro de 1973	1	-0,050	0,050	seca fraca
13	maio de 1974	agosto de 1974	4	-0,538	2,150	seca fraca
14	dezembro de 1974	dezembro de 1974	1	-0,850	0,850	seca fraca
15	fevereiro de 1975	fevereiro de 1975	1	-0,160	0,160	seca fraca
16	março de 1976	março de 1977	13	-0,788	10,250	seca fraca
17	maio de 1977	maio de 1977	1	-0,030	0,030	seca fraca
18	agosto de 1978	agosto de 1978	1	-0,070	0,070	seca fraca
19	abril de 1981	dezembro de 1983	25	-1,575	51,960	seca severa

Fonte: Autor, 2018.

4.3. Calibração do modelo chuva-vazão SMAP

Mediante a metodologia acima descrita, com os períodos de aquecimento, calibração e validação definidos, procedeu-se a inserção dos parâmetros físicos da bacia como mostra a tabela 7, e posteriormente ao processo de calibração e validação do modelo sendo registrados as métricas que nos remete o quão eficiente foi a calibração e validação do nosso modelo.

Tabela 7 -Resultados da calibração e validação do modelo SMAP para a grande bacia Iô Grande (entre parênteses são apresentados os valores correspondentes ao período de validação do modelo).

Bacia do Rio	Parâmetros				Métricas
Rio Iô Grande	Pes	Crec (%)	STR (mm)	Kk (meses)	NS
	0,2	0,5	7000	1	-1,16
					(-1,20)

Fonte: Autor, 2018

Os resultados encontrados no decorrer da aplicação feita na bacia do Rio Iô Grande não foram satisfatórios, permitindo dizer que o método proposto não pode ser empregado para estimar séries de vazões mensais em bacias sem dados, no interior da região estudada. Como esperado, verificou-se que os parâmetros do modelo SMAP são mais correlacionados com as características do solo e subsolo do que com as características físicas e geomorfológicas da bacia.

Esse fato fica evidenciado pelas relações regionais mostradas nas equações (1) e (2).

Avaliando-se as equações regionais encontradas verificou-se que as mesmas oferecem estimativas razoáveis para os parâmetros do modelo SMAP. Além disso, foi verificado que o modelo é pouco sensível à variação dos parâmetros, o que o torna particularmente robusto no que se refere à estimativa de séries sintéticas de vazões médias mensais em locais desprovidos de registros fluviométricos. Por outro lado, deve-se ter cautela ao utilizar as equações regionais, uma vez que as mesmas foram obtidas a partir de somente 1 posto fluviométrico. Assim, recomenda-se que em futuras pesquisas mais postos sejam adicionados ao modelo, referendando os resultados aqui encontrados.

Além disso, a aplicação não foi favorecida pela indisponibilidade de dados hidrogeológicos. Em locais com escassez de tais dados, a utilização do método pode se tornar complicada e dispendiosa, uma vez que deve ser precedida de estudos e levantamentos de campo.

No que se refere à melhoria dos resultados obtidos e futuros desenvolvimentos, recomenda-se:

- Fazer o estudo em uma área com maior disponibilidade de dados (mais estações fluviométricas) e em bacias com maior variabilidade climática, geológica, pedológica e hidrológica.

- Avaliar as incertezas inerentes ao método proposto. Sobretudo as incertezas relativas à representação concentrada do modelo SMAP, à variabilidade das propriedades físicas das bacias estudadas, à variabilidade dos dados de entrada e às correlações entre os parâmetros;

- Estender o estudo para pequenas bacias (área de drenagem inferior a 100 km²) conhecendo-se detalhadamente a área de estudo, fazendo-se levantamentos de campo de uso do solo, e avaliar o efeito da alteração dessa variável no comportamento hidrológico da bacia. Por fim, verifica-se a necessidade de que novas pesquisas sejam endereçadas no sentido de incluírem no modelo regional os erros de amostragem e modelagem chuva-vazão, bem como na obtenção de dados característicos do solo e subsolo em locais diferentes daqueles aqui estudados.

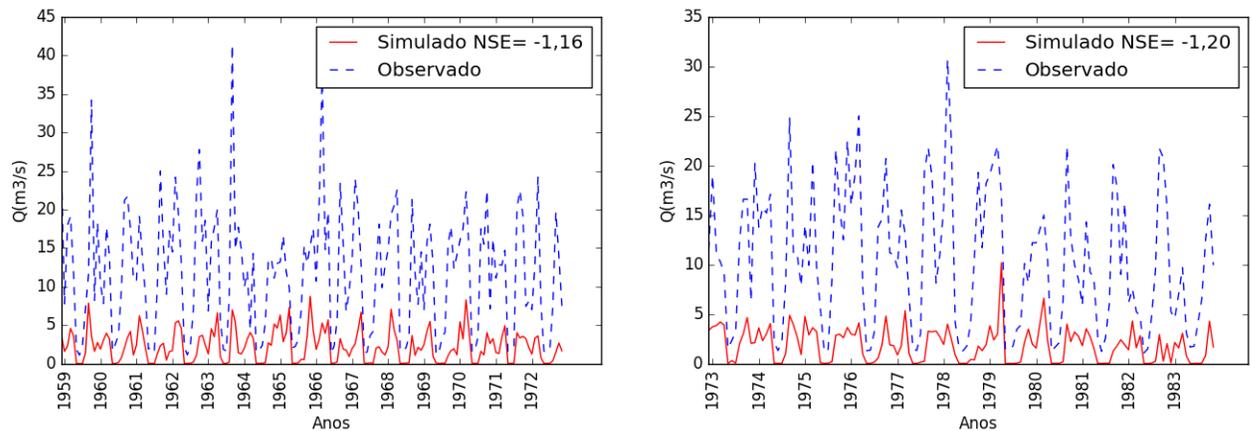
Ao analisar os resultados obtidos para os parâmetros do modelo SMAP, observa-se um valor do coeficiente de recarga do reservatório subterrâneo maior que a zero, indicando que há recarga a partir do reservatório do solo, percebeu-se que ao diminuir do parâmetro de escoamento superficial aproximando de zero, aumentava a eficiência do modelo. Este fato pode estar relacionado a boa capacidade de infiltração do solo. Já o parâmetro K_k correspondente a constante de recessão do escoamento de base.

Não tendo acesso aos parâmetros físicos da bacia do rio Iô Grande, analisando os valores dos parâmetros empregados para calibração das bacias na literatura, fez-se algumas considerações adotando valores nessas faixas, variando esses mesmos parâmetros com o intuito de aproximar a curva da vazão simulada da curva de vazão observada. É possível observar que tanto na etapa de calibração quanto na de validação, a vazão simulada segue o comportamento da vazão observada, ocorrendo picos na vazão simulada apenas quando acontece na vazão observada. Todavia, os resultados da calibração e validação obtidos não foram satisfatórios, obtendo tanto para calibração como para validação valores de Nash negativos mostrando a não

eficiência do modelo para a determinada bacia. O não ajuste total das duas curvas de vazão plotadas, pode estar associado ao fato da vazão simulada pelo SMAP ser calculada com base na precipitação e evapotranspiração da estação meteorológica do aeroporto, que embora estando numa distância relativamente curta possui uma taxa de precipitação inferior quando comparado com a precipitação que cai na respectiva bacia em estudo (figura 2). Portanto nota-se, que os valores das vazões observadas são maiores do que as vazões simuladas.

Entretanto, embora não tendo conhecimento dos valores exatos dos parâmetros físicos da bacia, os resultados obtidos deixa as entidades responsáveis pela questão de gestão de recursos hídricos no país, cientes do comportamento e da relação existente entre a vazão simulada no modelo com a vazão observada na bacia, sendo possível estudar e traçar estratégias de forma a calcular as vazões para a bacia em estudo, para os períodos em que não se possui dados de vazões da bacia por falta de equipamentos e registros das mesmas.

Figura 19 - Gráficos dos hidrogramas calculados para o período de calibração e validação do modelo hidrológico SMAP



Fonte: Autor, 2018.

5. Conclusões

Em suma, através do estudo desenvolvido percebe-se que São Tomé e Príncipe por ser um país pequeno e exposto às alterações climáticas, anomalias nas precipitações podem afetar o regime da vazão da bacia do rio Iô Grande, e sendo esta a maior bacia do país se faz muito importante o entendimento das características hidroclimáticas da bacia.

A utilização dos índices SPI e SFI, foram indispensáveis para a percepção da influência das secas meteorológicas e hidrológicas na bacia Iô Grande, bem como para o entendimento das relações existentes entre a precipitação e vazão na respectiva bacia.

Além disso os diagramas de caixa elaborados, ajudam a quantificar as variáveis climáticas, e mostram como o aumento e diminuição nos valores dessas variáveis impactam no regime das vazões da presente bacia.

Devido a limitada acessibilidade dos dados hidrológicos, possuindo dados de vazão para a respectiva bacia, apenas para um determinado período, com a utilização do modelo hidrológico SMAP e os dados de precipitação e evapotranspiração potencial do posto do aeroporto foi possível representar o comportamento da vazão da bacia do rio Iô Grande para o mesmo período, e com isso entender a relação existente entre as vazões observadas na bacia com a vazão simulada pelo modelo de acordo com os parâmetros do modelo. A curta série de dados interferem no processo de calibração e validação do modelo hidrológico. Devido à alta permeabilidade do solo presente na bacia, constatou-se a necessidade de minimização do parâmetro de escoamento superficial da bacia fazendo com que ocorra altas contribuições dos reservatórios subterrâneos para o leito do rio.

Embora o modelo seja robusto, e os critérios de eficiência utilizados para a determinação da calibração do modelo hidrológico mostraram-se satisfatório o que implica dizer que o mesmo pode ser utilizado como uma ferramenta principal para tomadas de decisões.

Com os parâmetros ajustados é possível a estimativa de vazões para a bacia do rio Iô grande para um maior período de dados disponíveis.

Mediante as análises todas desenvolvidas, e preocupado com a questão de mudança climática, com o teste de tendências elaborado para as séries de precipitação, temperatura e vazão, foi possível entender o comportamento na mudança dessas mesmas séries verificando se

as mesmas têm tendências em diminuir ou aumentar, e com isso traçar estratégias que visam o seu controle.

Entretanto, as informações obtidas neste trabalho possibilitam que ações de planejamento para a respectiva bacia, auxiliem na melhor gestão dos seus recursos hídricos, tendo em vista os impactos que as mudanças climáticas podem causar na precipitação e consequentemente no regime de vazões, contribuindo assim, em um manejo adequado, voltado para a sustentabilidade dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Maria da Conceição Neves. Planeamento dos Recursos Hídricos e Ordenamento do Território em São Tomé e Príncipe - Região Autónoma do Príncipe. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

TORRENT, Xavier Muñoz. Atlas de São Tomé e Príncipe: Cartas, diagramas, informação Geográficas. São Tomé: Associação Caué, 2011. 186 p.

REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE. INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. São Tomé e Príncipe Portal Digital. 2017. Disponível em: <<http://saotome.opendataforafrica.org/>> acesso em 18 de mar. 2018.

REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE (República Democrática de São Tomé e Príncipe) (Org.). Segunda Comunicação Nacional Sobre Mudanças Climáticas. 2. ed. São Tomé, 2011. 143 p.

HYDROCONSEIL (República Democrática de São Tomé e Príncipe). Departamento de Recursos Naturais e Energia. Actualização do Plano Director de Água e Saneamento do País Elaborado em 1996. São Tomé, 2011. 55 p.

Organização Meteorológica Mundial, 2012: Índice Padronizado de Precipitação Usuário Guia (M. Svoboda, M. Hayes e D. Wood). (WMO-No. 1090), em Genebra.

Salviano, M. F. (2015). Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia (RBMET.org)*, 1-10.

Evapotranspiração. (2008). Em P. Tomaz, *Evapotranspiração* (pp. 7-4). (sem nome): (sem editora). Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_evapotranspiracao/capitulo07.pdf> , acesso em: 9 de abril de 2018.

Alexandre, Alan Michell B. REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS. disponível em:<http://www.funceme.br/produtos/manual/acudes_e_rios/Regionalizacao/textos/RegSMAP_Paper_ABRH.pdf> acesso em: 9 de maio de 2018.

Aproveitamento de Água de Chuva. (2009). Em *Aproveitamento de Água de Chuva* (pp. 5-5). (sem nome): (sem editora). Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/Livro_aprov._aguadechuva/Capitulo%2005.pdf> acesso em: 9 de abril de 2018.

São Tome and Principe. Climate Change Adaptation [online] disponível em: <<http://www.adaptation-undp.org/explore/middle-africa/sao-tome-and-principe>> acesso em: 10 de abril de 2018.

Castro, A.F.C. Determinação dos Índices de Sensibilidade Ambiental ao derramamento de Óleo de Óleo do Litoral da Ilha de São Tomé. 2010.13-16 p. Dissertação(Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE.(2004).Première Communication Nationale Sur les Changements Climatiques[online] Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/natc/stpnc1.pdf>> acesso em: 15 de abril de 2018.

Barros, Paula Luís Neto Lima - A organização da vegetação na paisagem para a conservação da água e do solo em S. Tomé e Príncipe. Lisboa: ISA, 2011. Mestrado em Arquitectura Paisagista - Instituto Superior de Agronomia Disponível em: <<https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/4155>> acesso em 16 de maio de 2018.