



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRESSA DE OLIVEIRA CÂMARA

**RELAÇÃO ENTRE A DESERTIFICAÇÃO E UM MODELO HIDROLÓGICO NO
ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA-PB**

JOÃO PESSOA - PB

JUNHO/2017

ANDRESSA DE OLIVEIRA CÂMARA

**RELAÇÃO ENTRE A DESERTIFICAÇÃO E UM MODELO HIDROLÓGICO NO
ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA-PB**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como pré-requisito para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental pela
Universidade Federal da Paraíba.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof^o. Dr^o. Bartolomeu Israel de
Souza

JOÃO PESSOA - PB

JUNHO/2017

C172r Câmara, Andressa de Oliveira

Relação entre a desertificação e um modelo hidrológico no alto curso do Rio Paraíba-PB./ Andressa de Oliveira Câmara. – João Pessoa, 2017.

60f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Desertificação 2. Modelo Hidrológico 3. SMAP I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 551.577.38 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANDRESSA DE OLIVEIRA CÂMARA

**RELAÇÃO ENTRE A DESERTIFICAÇÃO E UM MODELO HIDROLÓGICO NO
ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 01/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Bartolomeu I. de Souza

Bartolomeu Israel de Souza
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADA

Hamilcar José Almeida Filgueira

Hamilcar José Almeida Filgueira
UFPB

Aprovada

Elloise Rackel Costa Lourenço

Elloise Rackel Costa Lourenço
UFPB

Aprovada

Adriano Rolim da Paz

Prof. Adriano Rolim da Paz
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que sempre esteve ao meu lado proporcionando muitas graças e bênçãos em minha vida.

À minha mãe Nilza Câmara, que nunca mediu esforços e investimentos em minha educação, e é a maior entusiasta das minhas conquistas.

Ao meu Pai Joel Câmara, por sempre fazer por mim o que estiver a seu alcance.

À minha irmã Amanda Câmara, a quem me espelho por sua garra e determinação, e que é sempre alguém com quem posso contar.

Ao meu orientador Bartolomeu Souza, pela oportunidade concedida, pelos grandiosos ensinamentos, pela paciência e por toda confiança depositada.

Ao professor Dr. Hamilcar Filgueira, por ser um importante apoio em minha caminhada acadêmica, me orientando em projetos, artigos e estágios.

Aos meus amigos do TMN, Carolina de Queiroz, Daniel Magno, Daniel Vidal, Gabriela Dias, Gustavo César, Ícaro Santiago, Maurício Timótheo e Paloma Flain, que me proporcionaram o maior presente que conquistei na Universidade, a amizade deles, na qual compartilhei muitas conquistas, frustrações, momentos felizes, tristes e únicos, e são pessoas que quero levar por toda a minha vida.

Às minhas amigas Erika Lima, Luanny Dantas, Natalia Costa e Thaís Cordeiro, que me acompanharam em muitas atividades acadêmicas, e foram um grande apoio em meu aprendizado.

À Virgínia Insfran (*in memoriam*), em que tive a oportunidade de conhecer durante o curso e deixou muitas saudades.

Aos demais alunos do curso de Engenharia Ambiental, no qual tive a oportunidade de compartilhar muitos momentos em minha graduação.

Ao Dr. Laudízio Diniz, pela disponibilidade e valiosas contribuições, e por ceder gentilmente dados necessários para a construção dos resultados do trabalho.

Aos meus colegas de estágio, Daniel Magno, Itaberaba Júnior, Jéssika Nelles e Paulo Coutinho, e à minha chefe Nahya Cajú, pelos ensinamentos passados, aprendizados mútuos e pela compreensão da minha ausência que se fez necessária para a dedicação deste trabalho.

À Rony Lopes e aos demais integrantes do GESA, que de alguma forma me ajudaram na construção deste trabalho.

Ao colégio Lourdinas, que em 14 anos me proporcionou ensinamentos que levei para a graduação e para a vida.

À todos os professores e professoras do curso pelo conhecimento compartilhado.

À SUDEMA pela oportunidade de estágio.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida e pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa no campo da engenharia.

À Universidade Federal da Paraíba, pela valiosa oportunidade de crescimento intelectual e moral.

Àqueles que porventura não foram citados e de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Além de sofrer com marcas indelévels como a variabilidade do clima e a escassez hídrica, o semiárido nordestino também sofre com o processo de desertificação, um fenômeno decorrente dos efeitos climáticos e antrópicos, desde os rigores relacionados à precipitação pluvial até o padrão de vida e a pressão das populações humanas. Portanto, este trabalho analisou de que forma esse fenômeno interfere no sistema hidrológico de uma bacia hidrográfica, baseado na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Caraúbas. Utilizando um modelo previamente calibrado, constatou-se uma aplicabilidade satisfatória do modelo com parâmetros considerados bastante sensíveis, o que permitiu ter-se a dimensão de como o ambiente é frágil frente a submissão de alterações. Foi observado também que as alterações provocadas nos parâmetros pelo processo de desertificação irão tender ao aumento de vazão da bacia hidrográfica, porém, o solo exposto junto ao intenso escoamento superficial, causa o carregamento de sedimentos, provocando a erosão e assoreando os cursos d'água. Quando assoreado, os açudes têm a tendência em ampliar seus espelhos d'água, que por sua vez facilitará na perda de água por evaporação, comprometendo o abastecimento de uma população que já sofre com a escassez hídrica. Por fim, concluiu-se que o fenômeno em questão é sim capaz de interferir nos parâmetros do modelo, e que a evolução dos seus impactos, pode distanciar ainda mais o modelo da realidade da bacia, descalibrando-o.

Palavras-chave: Desertificação, Modelo Hidrológico, SMAP.

ABSTRACT

Besides suffering with permanent marks such as climate variability and water scarcity, Brazilian northeast semi-arid region also suffers from the desertification process, a phenomenon due to climatic and anthropogenic effects, from the rigors related to rainfall to the standard of living and pressure of human populations. Therefore, this paper analyzed how this phenomenon interferes in the hydrological system of a hydrographic basin, based on Caraúbas' fluviometric station. Using a previously calibrated model, a satisfactory applicability of the model was verified with parameters considered quite sensitive, which allowed to have the dimension of how fragile the environment is before the submission of changes. It was also observed that the changes caused in the parameters by the desertification process will tend to increase the flow of the hydrographic basin, however, the exposed soil along with the intense surface runoff, causes sediment loading, causing erosion and silting the watercourses. When silted, the reservoirs tend to enlarge their water mirrors, which will facilitate the loss of water by evaporation, compromising the supply of a population that already suffers from a water shortage. Finally, it was concluded that the phenomenon in question is rather capable of interfering with the parameters of the model, and that the evolution of its impacts can further distract the model from the reality of the basin, unbalancing it.

Key-words: Desertification Process, Hydrological Model, SMAP.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: BACIA HIDROGRÁFICA DO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE CARAÚBAS.....	15
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA E SIMPLIFICADA DO CICLO HIDROLÓGICO	18
FIGURA 3: CHUVA SENDO INTERCEPTADA E CONDUZIDA PELA VEGETAÇÃO	20
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA	22
FIGURA 5: DESENHO ESQUEMÁTICO DO MODELO SMAP	35
FIGURA 6: GRÁFICO DO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA.....	46
FIGURA 7: SÉRIE DE VAZÕES MENSAS OBSERVADAS E GERADAS PELO MODELO SMAP.....	47
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES DO MODELO DE ACORDO COM AS PERTURBAÇÕES FEITAS NO PARÂMETRO STR.....	48
FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES DO MODELO DE ACORDO COM AS PERTURBAÇÕES FEITAS NO PARÂMETRO E1	49
FIGURA 10: REPRESENTAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES DO MODELO DE ACORDO COM AS PERTURBAÇÕES FEITAS NO PARÂMETRO E2.....	50
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES DO MODELO DE ACORDO COM AS PERTURBAÇÕES FEITAS NO PARÂMETRO CINF	51

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS.....	39
QUADRO 2: LOCALIDADES COM EVAPOTRANSPIRAÇÕES POTENCIAIS REPRESENTATIVAS.	39
QUADRO 3: PARÂMETROS DO MODELO SMAP	40
QUADRO 4: PARÂMETROS DE PROCEDIMENTOS	42
QUADRO 5: PARÂMETROS DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	42
QUADRO 6: ATRIBUTOS SELECIONADOS ATRAVÉS DO ALGORITMO CFS.....	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: POSTO FLUVIOMÉTRICO SELECIONADO PARA O ESTUDO: CARAÚBAS, PB.	37
TABELA 2: RESULTADOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - MÉTODO HARGREAVES – SAMANI.....	45
TABELA 3: PARÂMETROS DE INICIALIZAÇÃO DO MODELO SMAP	46
TABELA 4: PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO SMAP	46
TABELA 5: PORCENTAGENS DE ALTERAÇÃO NO ESCOAMENTO TOTAL DE ACORDO COM AS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Definição do tema e do problema	12
1.2. Justificativa	14
1.3. Caracterização da área de estudo	15
1.4. Hipóteses.....	16
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Objetivo geral.....	17
1.5.2. Objetivos específicos.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. Conceitos hidrológicos	17
2.1.1. Ciclo hidrológico.....	17
2.1.2. A interferência da vegetação no balanço hídrico	19
2.1.3. Bacia hidrográfica	21
2.2. Condições da vegetação no semiárido	23
2.2.1. A caatinga.....	23
2.2.2. Degradação da caatinga.....	25
2.2.3. A desertificação.....	26
2.3. Modelagem matemática.....	29
2.3.1. Modelos Hidrológicos.....	31
2.3.2. Modelo chuva-vazão	33
2.3.3. Modelo SMAP	34
3. METODOLOGIA.....	36
3.1. Coleta e processamento dos dados hidrometeorológicos.....	37
3.1.1. Fluviometria	37
3.1.2. Precipitação	38
3.1.3. Evapotranspiração	39
3.2. Modelo chuva-vazão SMAP.....	39
3.3. Análise da sensibilidade.....	43
3.4. Análise da possível interferência das consequências da desertificação na dinâmica do modelo	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44

4.1. Elaboração do modelo SMAP.....	44
4.2. Análise de sensibilidade dos parâmetros	47
4.3. Análise da dinâmica do modelo e a interpretação das possíveis interferências sofridas pelo processo de desertificação.....	52
4.3.1. Dados de entrada	52
4.3.2. Parâmetros	52
4.3.3. Variáveis.....	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

1.1. Definição do tema e do problema

Um progressivo processo de degradação ambiental, decorrentes da atuação antrópica, vem ocorrendo em terras de clima seco em todo o mundo. Esse processo passou a ser conhecido internacionalmente, principalmente a partir da década de 1970, como desertificação.

Segundo Nascimento (2013), na literatura há muitas conceituações sobre esse processo, algumas ambíguas, outras generalistas, mas a conceituação oficial, dada pela Convenção das Nações Unidas de Combate à desertificação, define como: “A desertificação deve ser entendida como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, resultante de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas” (CCD, 1995).

Os dados conhecidos sobre a desertificação revelam a gravidade desse problema já que, entre outras características (ROXO, 2006):

- Afeta direta e indiretamente mais de 1 bilhão de pessoas;
- Mais de 100 países sofrem com esse processo;
- São perdidos cerca de seis milhões de hectares de terra arável e produtiva todos os anos em função desse tipo de degradação;
- Cerca de ¼ da superfície terrestre sofre de degradação e erosão dos solos advindas da desertificação;
- O solo arável por pessoa diminuiu de 0,32ha, em 1961-1962, para 0,21ha em 1997-1999, esperando que diminua para 0,16ha em 2030.

No Brasil restringe-se, portanto, à porção semiárida e sub-úmida seca de seu território. Potencialmente, abrange todos os Estados nordestinos, à exceção do Maranhão, e incluindo também a porção norte do Estado de Minas Gerais. Concentrando-se nos limites do Polígono das Secas, que ocupa cerca de 950.000 km², abrange mais de 1.000 municípios e é ocupada por mais de vinte milhões de habitantes (KHAN; CAMPOS, 1995).

Segundo Oliveira-Galvão e Salto (2003), o semiárido nordestino é caracterizado pela ocorrência de diversas variáveis que se associam à desertificação, dentre as quais destacam-

se: os baixos índices pluviométricos, a irregularidade das precipitações no tempo e no espaço; a ocorrência de ventos quentes e secos; a intermitência sazonal das drenagens; a forte incidência de radiação solar; a baixa capacidade de retenção de água; a antiga e intensa ocupação da terra; a utilização de técnicas rudimentares de uso do solo; e a marginalidade cultural, política e econômica de sua população.

De acordo com algumas características supracitadas, percebe-se que o semiárido nordestino também configura um cenário crítico no que se refere à disponibilidade hídrica. O clima semiárido é caracterizado pela insuficiência de precipitações com extrema irregularidade quanto à sua distribuição temporal, concentradas em uma estação de 3 a 5 meses de duração e uma variação em torno de 30% dos totais pluviométricos anuais, chegando a 50% em pontos mais críticos (IICA, 2002 apud FONTES, 2003).

A água é o insumo básico da sobrevivência de todas as espécies e indicador do desenvolvimento de uma região, sendo necessária atenção especial no seu manejo visando sua conservação em qualidade e quantidade. Isso é alcançado por meio da gestão dos recursos hídricos, que se refere aos procedimentos relativos a tentativa de equacionar e resolver as questões da água e otimizar o seu uso (ANEEL, p.60, 2001).

Como um dos problemas mais cruciais de todos os problemas sociais brasileiros, o drama das secas no Nordeste, especialmente na zona hidrológica semiárida, tem sido objeto, desde o início do século, de importantes estudos e pesquisas sobre o comportamento da água e do solo nas bacias hidrográficas, e tal comportamento faz parte e interfere diretamente no processo do ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, e seus diversos processos observados em uma bacia hidrográfica influenciam a geração de vazões. O intercâmbio entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera ocorre em dois sentidos: partindo da atmosfera até a superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico e no sentido superfície terrestre para a atmosfera, ocorrendo principalmente na forma de vapor por evapotranspiração (TUCCI, 1993). A quantidade de água e a velocidade com que ela circula nas diferentes fases do ciclo hidrológico são influenciadas por diversos fatores como, por exemplo, a cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia.

Com a finalidade de contribuir para o conhecimento e entendimento referente ao comportamento, às características do ciclo hidrológico e à disponibilidade hídrica, um modelo hidrológico é capaz de representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever saídas para diferentes condições, possibilitando antecipar cenários, tais como impactos da

urbanização de uma bacia ou de eventos extremos, subsidiando a adoção de medidas preventivas. Os modelos utilizam parâmetros que visam representar o ambiente real da bacia hidrográfica em estudo, que podem ser estimados a partir de medições de campo obtendo as características físicas da bacia ou, devido ao grau de abstração considerado, sendo feito por ajustes tendo como base os dados de entrada e saída do modelo.

Dessa forma, diante da problemática da desertificação e das variáveis que constituem o ciclo hidrológico, com o auxílio da modelagem hidrológica é possível fazer uma análise sobre de que forma o fenômeno da desertificação pode interferir na vazão de água que abastece os barramentos utilizados para o abastecimento da população, que tanto sofre com a escassez hídrica.

1.2. Justificativa

Os recursos naturais, como água e solo, nos trópicos semiáridos estão sob pressão e inclinados à degradação por conta do ambiente severo e dos solos rasos, em regiões ecologicamente sensíveis a ação antropogênica. Esses ambientes sensíveis estão muitas vezes sob alta pressão demográfica, com uma agricultura de subsistência, e ausência ou falta de suporte institucional. Dessa forma, existe um crescente interesse no que se refere à conservação de solo e água em função das necessidades atuais e da melhora da produtividade e resiliência para demandas futuras (LAL, 1994).

A água é um tema estratégico para o desenvolvimento do Nordeste e, pela importância dessa região, para o desenvolvimento brasileiro. De um lado, trata-se de um fator escasso, limitante para o desenvolvimento econômico. De outro, a água tem uma dimensão social que é muito importante, especialmente numa região tão desprovida economicamente de recursos como o semiárido nordestino. Dessa maneira, um manejo visando sua conservação em qualidade e quantidade deverá ser alcançado por meio da gestão dos recursos hídricos.

Assim, de acordo com Fontes (2003), como a gestão da água deve partir do conhecimento do percurso que esse recurso traça no meio ambiente, o conhecimento detalhado das variáveis que compõem o ciclo hidrológico é o subsídio de uma gestão eficiente. Cabe observar que o comportamento desse ciclo se diferencia entre as várias regiões e o uso racional da água deve ocorrer com base nas suas características peculiares.

Além de sofrer com marcas indeléveis como a variabilidade do clima e a escassez hídrica, o semiárido nordestino também sofre com o processo de desertificação, um fenômeno decorrente dos efeitos climáticos e humanos, desde os rigores climáticos relacionados à

precipitação pluvial até o padrão de vida e a pressão das populações humanas. Então, com base nessa realidade, a utilização de procedimentos de modelagem hidrológica torna-se instrumento de suporte para implantação de uma gestão visando as políticas de prevenção à degradação e às secas.

O principal meio de disponibilização de água para a população nordestina, devido a intermitência dos seus rios, é por meio da construção de açudes que barram os cursos d'água. Portanto, este trabalho procurou entender como a desertificação pode interferir na contribuição de vazão de uma bacia hidrográfica para esses açudes, e por conseguinte, contribuir na gestão dos recursos hídricos em uma região que sofre pela escassez de água.

1.3. Caracterização da área de estudo

A Figura 1 mostra a bacia hidrográfica do Alto Curso do rio Paraíba, sua localização espacial no Estado da Paraíba, e o posto fluviométrico (código: 38830000) em Caraúbas, localizado nas coordenadas geográficas $07^{\circ} 42'42''$ de latitude Sul e de $36^{\circ} 30'30''$ de longitude Oeste.

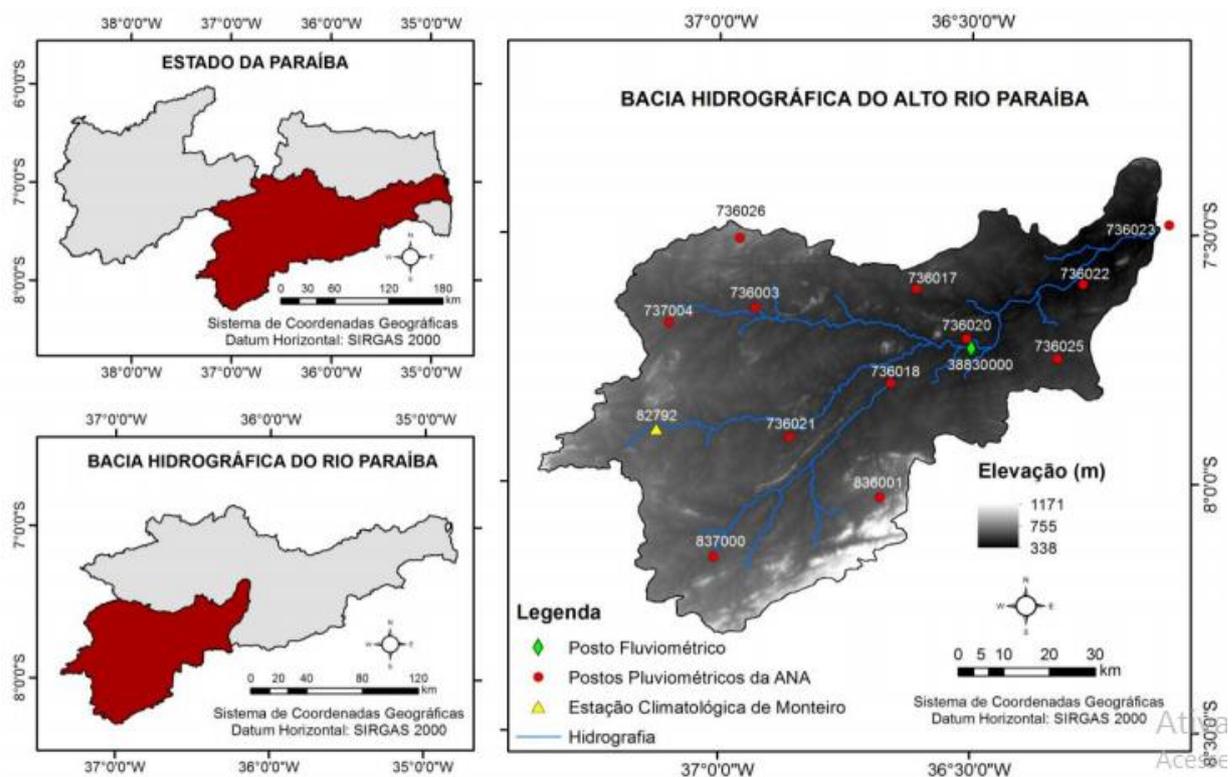


Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. Fonte: Dantas, 2015

Essa bacia contribui de forma significativa para a formação do volume de água armazenado em seu principal reservatório, o açude Epiácio Pessoa, responsável pelo abastecimento de água da cidade de 17 municípios. São eles:

- Pelo sistema adutor de Campina Grande abastece: Campina Grande, Pocinhos, Lagoa Seca e Matinhas;
- Sistema adutor de Cariri abastece: Boqueirão, Cabaceiras, Boa Vista, Soledade, Juazeirinho, Cubati, Olivedos, Pedra Lavrada, Seridó;
- Outros Sistema: Queimadas, Caturité, Barra de Santana e Riacho de Santo Antônio.

A bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba compreende uma área de aproximadamente 6.650 km² e está inserida inteiramente no Estado da Paraíba, entre as coordenadas 36°10'0"W, 37°25'0"W e 7°15'0"S, 8°20'0"S. De acordo com a classificação climática de Köeppen, esta região possui clima do tipo BSwh', ou seja, semiárido quente, com precipitação pluvial média anual variando de 400 a 600 mm e com estação seca de 8 a 10 meses.

O relevo do Alto Curso do Rio Paraíba é ondulado a fortemente ondulado, com variações hipsométricas que atingem a cotas acima de 1.000 metros. É formada por rochas do período pré-cambriano e o tipo de solo predominante é do tipo Bruno não Cálcico de pouca espessura, que cobre todo cristalino, com a presença de solos Litólicos, Regossolos e Cambissolos.

A vegetação predominante do Alto Curso do Rio Paraíba é a caatinga *hiperxerófila*, *hipoxerófila*, floresta *caducifólia* e *subcaducifólia*. Em alguns trechos a caatinga apresenta-se densa, com vegetação rasteira constituída por herbáceos espinhosos e arbustos densos, em outros setores mais secos, a vegetação perde totalmente as folhas no verão.

A caracterização física desta área de estudo foi elaborada a partir dos dados cedidos pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PERH/PB).

1.4. Hipóteses

- O modelo chuva-vazão SMAP é aplicável na área de estudo;
- A desertificação interfere no modelo chuva-vazão aplicado;
- A interferência da desertificação no modelo compromete a vazão de água fornecida por uma bacia hidrográfica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo geral

Analisar de que forma a desertificação interfere nas características de uma bacia hidrográfica, culminando na alteração das contribuições de vazão hídrica.

1.5.2. Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do modelo SMAP, adequando sua estrutura de acordo com a bacia hidrográfica que contém o posto fluviométrico de Caraúbas;
- Calibrar o modelo chuva-vazão;
- Analisar a sensibilidade dos parâmetros;
- Ponderar sobre de que forma a desertificação pode interferir na dinâmica do modelo;
- Averiguar a alteração de vazão do modelo de acordo com as mudanças feitas com base nas conclusões do objetivo específico supracitado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos hidrológicos

2.1.1. Ciclo hidrológico

A água é um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, interferindo na fauna e flora, e interagindo com os demais elementos da natureza e seu meio. A parcela de água doce acessível à humanidade no estágio tecnológico atual e a custos compatíveis com seus diversos usos é o que se denomina “recursos hídricos”. Para Silveira e Tucci (1997), o estudo dos recursos hídricos implica em conhecimento do ciclo hidrológico, seus componentes e as relações entre eles.

O ciclo hidrológico e seus diversos processos observados em uma bacia hidrográfica influenciam a geração de vazões, como pode ser visto na representação esquemática apresentada na Figura 2. O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. O intercâmbio entre as circulações da

superfície terrestre e da atmosfera, fechando o ciclo hidrológico, ocorre em dois sentidos: a) no sentido superfície-atmosfera, onde o fluxo de água ocorre fundamentalmente na forma de vapor, como decorrência dos fenômenos de evaporação e de transpiração, este último um fenômeno biológico; b) no sentido atmosfera-superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, sendo mais significativas, em termos mundiais, as precipitações de chuva e neve (TUCCI, 2007).



Figura 2: Representação esquemática e simplificada do ciclo hidrológico. Fonte: USGS - United States Geological Survey.

A umidade presente na atmosfera, majoritariamente transferida em forma de precipitação, atinge tanto oceanos quanto continentes. O processo de escoamento superficial perfaz, de maneira simplificada, o excedente da taxa de água que incide sobre uma superfície. Parte da precipitação é interceptada pela vegetação, infiltrada no solo ou escoada superficialmente conforme ação gravitacional seguindo as depressões do solo e, então, envolve-se em vários e complicados processos hidrológicos, como, por exemplo: precipitação, interceptação da água pela vegetação, infiltração pelo perfil do solo, percolação, evaporação da água do solo, absorção por raízes e evapotranspiração pela vegetação, que constituem parte do ciclo hidrológico (MIRANDA, 2016).

Entre os fatores que contribuem para que haja uma grande variabilidade de manifestações do ciclo hidrológico, pode-se destacar: a desuniformidade com que a energia solar atinge os diversos locais, o diferente comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos, a quantidade de vapor de água, gás carbônico (CO₂) e ozônio na atmosfera, a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais, e a influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica (TUCCI, 2007).

A interceptação do volume precipitado é um papel importante da vegetação no balanço hídrico, diminuindo o total de chuva que chega à superfície do solo. A vegetação exerce importância significativa no processo de interceptação e redistribuição da chuva, que consiste no gotejamento ao solo, escoamento pelo tronco e evapotranspiração direta. Contudo, o efeito de diminuição da transpiração, gerado pelo corte e redução de vegetação, pode acarretar modificações no microclima da região e efeitos locais sobre a hidrologia (LIMA, 1996).

Logo, após o processo de interceptação da vegetação, de infiltração, e de saturação do solo, ocorre o escoamento superficial que, ao atingir o limite de armazenamento das irregularidades do solo, segue para rios, lagos e oceanos, governado pela gravidade. Assim, as características fisiográficas combinadas aos processos hidrológicos e características climatológicas são responsáveis pela forma do escoamento em uma bacia até atingir seu exutório.

2.1.2. A interferência da vegetação no balanço hídrico

A vegetação é fundamental para um adequado e equilibrado funcionamento dos ecossistemas e para a manutenção da diversidade biológica. Ela também exerce funções significativas no controle da erosão, da desertificação, da qualidade da água e do sequestro do carbono atmosférico e do solo, além de constitui espaço para desenvolvimento de atividades sociais, ambientais e econômicos.

Uma das principais influências da floresta ocorre com o recebimento das chuvas pelas copas das árvores, quando se dá o primeiro fracionamento da água, onde uma parte é temporariamente retida pela massa vegetal e em seguida evaporada para a atmosfera, processo denominado de interceptação (ARCOVA et al., 2003). A interceptação é a retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo, podendo ocorrer devido à vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento.

A cobertura florestal, por meio da interceptação, influencia a redistribuição da água da chuva, em que as copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o

processo de infiltração. Desse modo, o abastecimento das águas é favorecido e a variação de vazão ao longo do ano, reduzida, além do retardamento dos picos de cheia. Alguns pesquisadores afirmam que a floresta nativa, entre os ecossistemas vegetais, atua no ciclo hidrológico de maneira mais significativa, pois proporciona melhores condições de infiltração da água da chuva (OLIVEIRA JUNIOR; DIAS, 2005).

Após a interceptação, a vegetação capta, recebe e conduz a água interceptada da chuva para dentro do solo. A água captada pela mata se infiltra e vai mantendo abastecidos os lençóis de água subterrâneos que por sua vez abastecem as nascentes, riachos e rios, mantendo-os vivos mesmo quando a chuva termina (Figura 3).

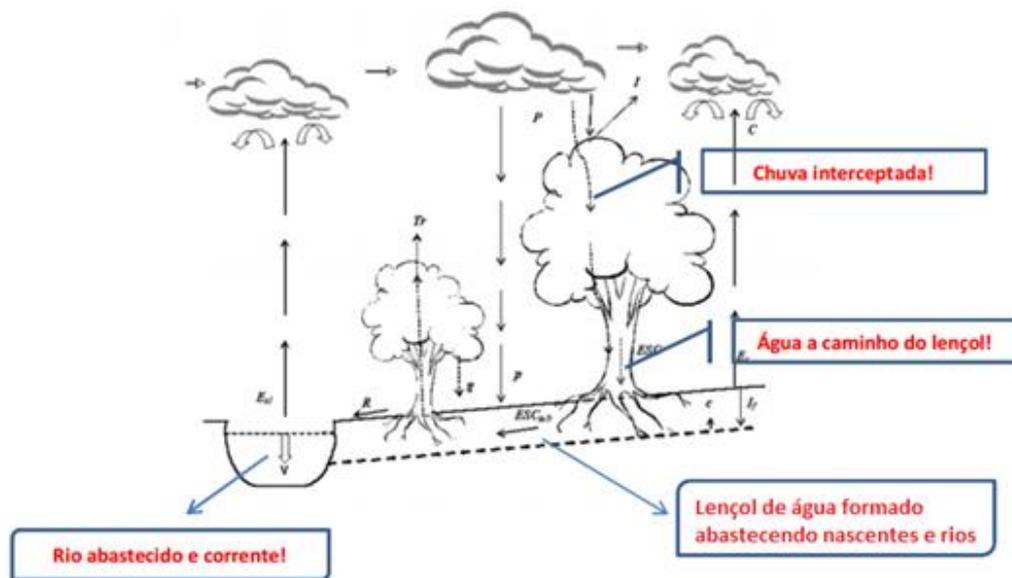


Figura 3: Chuva sendo interceptada e conduzida pela vegetação. Fonte: Barros Jr. et al., 2015.

Além de formarem um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, a presença da floresta protege a superfície do solo dos efeitos da radiação solar e do vento e aumenta a superfície ativa, reduzindo dessa forma, a evaporação direta pelo piso florestal. No caso das áreas florestadas, a evaporação da água ocorre pelo processo da transpiração. A evaporação da água do solo e a transpiração das plantas, determinam o processo chamado evapotranspiração.

Evapotranspiração é definida pelo conjunto de processos físicos (evaporação) e fisiológicos (transpiração) responsáveis pela transformação em vapor atmosférico a água precipitada na superfície terrestre (TUCCI; BELTRAME, 2000). A evapotranspiração é a componente mais importante do ciclo hidrológico, pois sua magnitude normalmente supera em muito a de outros componentes, como recarga, escoamento superficial e variação da umidade do solo (BEST et al., 2003), representando grande diferença na produção de água pela bacia.

Diante do que foi elucidado, a presença ou não da vegetação tem grande influência na distribuição da água em um manancial e na conservação do solo, sendo de fundamental importância para a sustentabilidade do ambiente. Tais características podem ser empregadas no manejo de bacias hidrográficas, que são tão vulneráveis a alterações da vegetação.

2.1.3. Bacia hidrográfica

O conceito de Bacia Hidrográfica (BH) tem sido cada vez mais expandido e utilizado como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental. Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de BH envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes. Embora tecnicamente o conceito implícito no termo seja preciso, podem existir variações no foco principal, conforme a percepção dos técnicos que o utilizam em seus estudos (SCHIAVETTI, 2002).

Guerra (1997, p. 184) definiu bacia hidrográfica como “um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes”. Barrella (2001) acrescenta que as bacias hidrográficas são originadas nas áreas mais elevadas do relevo, onde as águas das chuvas percorrem caminhos distintos: escoando superficialmente das partes mais altas para as mais baixas do relevo, originando os rios e riachos, ou se infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático.

Tucci (2007) considera bacia hidrográfica como sendo um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, como mostra a Figura 4, determinando como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados no solo. Em um evento isolado pode-se desconsiderar estas perdas e analisar a transformação de chuva em vazão feita pela bacia com a ajuda do hietograma (chuva) e do hidrograma (vazão).

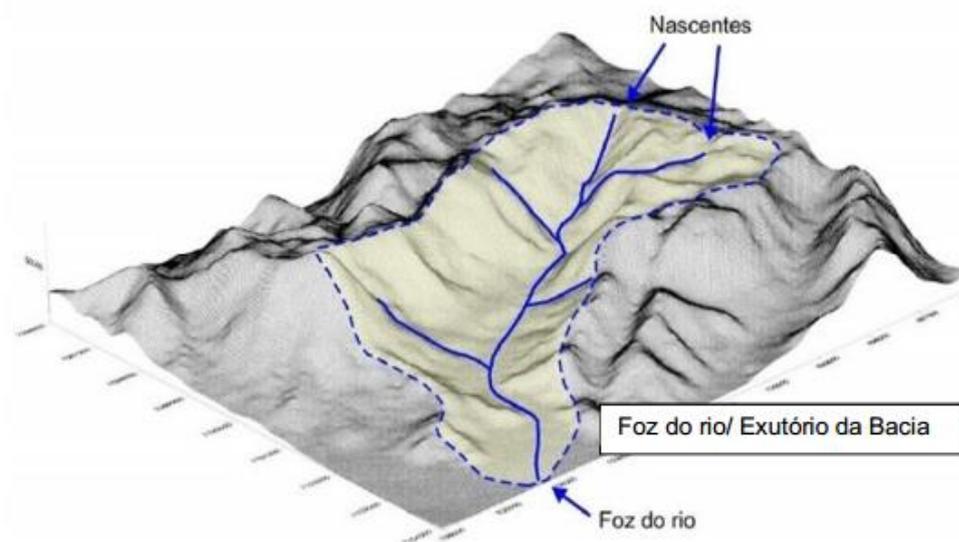


Figura 4: Representação de uma bacia hidrográfica. Fonte: Gonçalves (2007).

As características físicas primárias de uma bacia hidrográfica são morfologia (área, forma, elevação, declividade, orientação e rede de drenagem), tipos de solos, capacidade de armazenar água e cobertura vegetal. O efeito de cada uma dessas características sobre o comportamento hidrológico da bacia é óbvio, porém sua quantificação é em geral de difícil avaliação, principalmente porque tais efeitos se sobrepõem. O efeito combinado de todos os fatores define o tamanho da bacia hidrográfica (RAUDKIVI, 1979).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica depende do tipo de vegetação existente em sua área e de suas características físicas, como: forma, relevo, geologia, solo, área e rede de drenagem (LIMA, 1976). Para sua caracterização é preciso considerar além destes, fatores como clima, tipo de ocupação, regime pluviométrico e fluviométrico, disponibilidade hídrica e as características fisiográficas, além disso, o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica também é afetado por ações antrópicas, esta intervenção promove influencias nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

O balanço hídrico é um método de avaliação determinado pela diferença entre a entrada e saída de água em uma bacia. Partindo-se do suprimento natural de água para o solo, simbolizado pelas chuvas e da demanda atmosfera, simbolizada pela evapotranspiração potencial e, com um armazenamento máximo apropriado para a planta cultivada, o balanço hídrico fornece estimativas do armazenamento de água no solo, evapotranspiração real, da deficiência hídrica e do excedente hídrico em diversas escalas de tempo.

Para definir quantitativamente esse balanço, a utilização de modelos matemáticos torna-se uma opção viável. A representação dos processos hidrológicos por meio de modelos é a forma encontrada para estudar os diferentes componentes do ciclo hidrológico e as interações antrópicas. Existem várias formas para modelar a realidade como o protótipo amostral de um espaço físico real, a visão teórica qualitativa dos processos e a formulação matemática de como se processam os diferentes fenômenos.

2.2. Condições da vegetação no semiárido

2.2.1. A caatinga

Uma das principais características da região Nordeste do Brasil, que ocupa 1.554.257 km² de área, é a heterogeneidade nos aspectos edafoclimáticos, apresentando ampla variedade de fisionomias de vegetação (IBGE, 2010). Em boa parte dessa região do Brasil, encontra-se a região semiárida cuja formação se estende por uma área de 969.589,4 km² ou 11% do território nacional e se caracteriza por elevadas médias anuais de temperatura (27°C) e evaporação (2.000 mm). As precipitações pluviométricas são inferiores a 800 mm ao ano e concentram-se durante três a cinco meses, sendo irregularmente distribuídas no tempo e no espaço (LIMA et al., 2011).

O clima dessa região destaca-se como fator responsável pela variação dos outros elementos que compõem as paisagens. Ao clima estão adaptados a vegetação e os processos de formação do relevo, com predomínio de um processo sobre outro e de acordo com a época do ano (período seco ou chuvoso); os solos são, em geral, pouco desenvolvidos em função das condições de escassez das chuvas, tornando os processos químicos mitigados (ARAÚJO, 2011). Os aspectos de relevo definem alguns locais com maiores altitudes e, conseqüentemente, microclimas específicos. Acrescente-se a isso o fato de que a proximidade com o oceano, em alguns locais, resulta na influência das frentes frias e maiores índices pluviométricos.

O Nordeste do Brasil tem a maior parte de seu território ocupado por uma vegetação xerófila, de fisionomia e florística variada, denominada “caatinga”, que representa cerca de 800.000 km², o que corresponde a 70% dessa região. Fitogeograficamente, a caatinga ocupa cerca de 11% do território nacional, abrangendo os estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Minas Gerais. A Caatinga é considerada pelo Ministério do Meio Ambiente como um dos grandes biomas brasileiros, abrangendo 734 mil km² (IBGE, 2010).

Assim, ao se falar na formação florestal nativa caatinga se reporta automaticamente no Bioma também denominado Caatinga. Dentre os ativos ambientais contidos nos diferentes Biomas brasileiros, as florestas nativas, inclusive a caatinga, cumprem a função estratégica de funcionar como barreiras naturais à desertificação, à erosão genética, à perda de recursos biológicos, à fragmentação de ecossistemas e às catástrofes naturais (PEREIRA, 2006).

A vegetação de caatinga é constituída, especialmente, de espécies lenhosas e herbáceas, de pequeno porte, geralmente dotadas de espinhos, sendo, geralmente, caducifólias, perdendo suas folhas no início da estação seca, e de cactáceas e bromeliáceas. Fitossociologicamente, a densidade, frequência e dominância das espécies são determinadas pelas variações topográficas, tipo de solo e pluviosidade. Sua paisagem é formada por árvores de troncos tortuosos, recobertos por cortiça e espinhos. As raízes cobrem a superfície do solo, para capturar o máximo de água durante as chuvas leves. Algumas das espécies mais comuns são: a umburana, a aroeira, o umbu, a baraúna (braúna), a maniçoba, a macambira, o mandacaru, o xiquexique, o faceiro e juazeiro (DRUMMOND et al, 2000).

A composição florística das caatingas não é uniforme e varia de acordo com o volume das precipitações, da qualidade dos solos, da rede hidrológica e da atividade de seus habitantes. O xerofitismo, característica dessa vegetação, é básico para a morfologia das espécies componentes. As folhas, em sua maioria pequenas, desaparecem durante as estiagens. Essa característica constitui em um dos meios mais eficazes de autoproteção das plantas na falta de umidade do solo.

Dentre os biomas brasileiros, a Caatinga é o menos conhecido botanicamente. As famílias com maior número de espécies endêmicas são Leguminosae (80) e Cactaceae (41). Dessas, várias estão em perigo de extinção (MMA, 2003).

O estudo e a conservação da diversidade biológica da Caatinga é um desafio da ciência brasileira. Há vários motivos para isto. Primeiro, a Caatinga é a única grande região natural brasileira cujos limites estão inteiramente restritos ao 16 território nacional. Segundo Leal et al (2005), esse Bioma é proporcionalmente o menos estudado entre as regiões naturais

brasileiras, com grande parte do esforço científico estando concentrado em alguns poucos pontos em torno das principais cidades da região. Terceiro, a Caatinga é a região natural brasileira menos protegida, pois as unidades de conservação cobrem menos de 2% do seu território. Quarto, a Caatinga continua passando por um extenso processo de alteração e deterioração ambiental provocado pelo uso insustentável dos seus recursos naturais, o que está levando à rápida perda de espécies únicas, à eliminação de processos ecológicos chaves e à formação de extensos núcleos de desertificação em vários setores da região (BERNARDES, 1999; LEAL et al., 2005).

Dessa forma, o bioma Caatinga sofre com o aumento da pressão antrópica sobre seus recursos naturais, cujo resultado incide diretamente numa insustentabilidade econômica, social e ambiental.

2.2.2. Degradação da caatinga

Do ponto de vista das alterações nessa formação vegetal, a caatinga tem sido uma das mais afetadas pelas atividades humanas em todo o Brasil, sendo considerada, enquanto Bioma, o terceiro mais degradado do país, perdendo apenas para a Floresta Atlântica e o Cerrado (MYERS et al., 2000 apud SOUZA, 2015). As causas dessa degradação estão relacionadas, principalmente, ao sistema agropastoril e também ao extrativismo, atividades que tem provocado a destruição sistemática de muitas espécies ou a processos que levam a uma descaracterização avançada (ZANETTI, 1994 apud SOUZA, 2015).

A intervenção humana nas caatingas vem acelerando a degradação do seu potencial florestal e dos seus solos e, por conseguinte, provocando desequilíbrios ecológicos de gravidade variável. As tradições exercem uma forte influência na utilização atual da caatinga, e, de certa maneira, do seu uso futuro. A utilização ainda se fundamenta em processos meramente extrativistas para a produção de produtos de origem pastoril, agrícola ou madeireira. A retirada da cobertura vegetal desse bioma, relacionada a práticas agropecuárias, familiar ou industrial, coloca em risco toda a biodiversidade existente na região, pois, além de interferir nas condições físicas, afeta o desenvolvimento e a manutenção de atividades ligadas ao social, econômico e cultural. Enfim, ocasiona impactos em outras áreas que estão direta ou indiretamente relacionadas à boa manutenção desse bioma (BRASILEIRO, 2009).

A agricultura é uma atividade que gera impactos ao meio ambiente, seja em grande ou pequena escala, porém, a potencialidade dessa intervenção irá depender das técnicas e práticas que forem utilizadas para cultivar a terra. Segundo Brasileiro (2009), em muitas localidades do semiárido, a degradação do ambiente tem início com práticas agrícolas ineficientes que

retiram a cobertura vegetal original do solo, deixando-o vulnerável aos processos erosivos. Além disso o desenvolvimento contínuo de retirada de produtos sem a reposição de nutrientes, acarreta a perda da fertilidade da terra. Levando em consideração o tipo de solo da região, isso pode intensificar os processos de degradação do bioma. A agricultura irrigada, realizada sem levar em conta as características físicas da localidade, também pode acarretar sérios problemas, como salinização, erosão e lixiviação de nutrientes. O uso de máquinas também pode interferir na boa conservação do solo, pois poderá ocasionar processo de compactação, entre outros.

Além dos impactos ocasionados pela agricultura, há também as consequências geradas pela pecuária. A expansão da pecuária, ampliou as áreas de pastagem por meio do corte das árvores e do fogo, para que pudessem crescer gramíneas novas. A prática da devastação de grandes espaços da caatinga, pelas queimadas, fez realmente aumentar as áreas de pastagem, mas provocou transformações irreversíveis nesse ecossistema. O superpastoreio de caprinos, ovinos e bovinos tem modificado a composição florística não só do estrato herbáceo, mas também do extrato arbóreo-arbustivo, pela pressão do pastejo (MELO, 1998).

A utilização da caatinga como pastagem extensiva vem causando degradações fortes e por vezes irreversíveis do ecossistema. Já são encontradas extensas áreas cuja vegetação já se encontra muito empobrecida, tendo perdido a diversificação florística que lhe é peculiar, a exemplo da área periférica das cidades do sertão e no entorno das vilas, povoados e fazendas da região (ALVES, 2008).

Como consequência das profundas alterações pelas quais vêm passando, a Caatinga apresenta grandes extensões onde a desertificação já se encontra instalada, existindo uma relação estreita entre este tipo de degradação, a vegetação e os solos, sendo o seu desenvolvimento iniciado com as modificações que venham a diminuir a presença da cobertura vegetal por períodos prolongados, aumentando os processos erosivos e deteriorando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (CCD, 1995).

2.2.3. A desertificação

Historicamente a problemática da desertificação é um fenômeno antigo, embora somente no último século tenha ganhado destaque. Registros antigos mostram que, a mais de sete mil anos atrás, onde hoje está localizado o deserto do Saara (África), havia uma vegetação de savanas e forte atividade pastoril com gado bovino (BLOCH, 1999). Platão, quatro séculos antes de Cristo, já descrevia o desaparecimento dos bosques, as inundações e a

perda de solo pela ação das águas na Grécia antiga, responsabilizando a ação humana por essa degradação na zona mediterrânea (LOPEZ-BERMUDEZ, 1988).

Aubreville em 1949 utilizou o termo desertificação pioneiramente para caracterizar as áreas da África tropical que vinham sendo degradadas, em razão da intensa utilização dos recursos naturais e da falta de compreensão desta importante dinâmica ambiental. Tal autor associou desde então a desertificação com a ideia de ação antropogênica (AUBREVILLE, 1949).

Mesmo sendo um tipo de degradação muito antigo, a desertificação só passou efetivamente a ser alvo de discussões internacionais a partir da década de 1970, quando uma grande seca atingiu o Sahel africano, provocando forte impacto econômico, social e ambiental (SOUZA, 2008). Segundo Rubio (1995), a desertificação em Sahel provocou conflitos sociais e políticos, cuja base está no violento aumento da pressão demográfica sobre o uso da terra.

Há na bibliografia técnica e científica diferentes conceitos sobre desertificação, formulados por diversos autores. Rapp (1974) baseia-se na classificação de regiões áridas e semiáridas para afirmar que a desertificação trata-se da propagação das condições ambientais dessas regiões, devido às ações humanas ou pelas mudanças climáticas.

Para Rochette (1989) a desertificação é a grave degradação do “capital” ecológico demonstrado na diminuição da quantidade e capacidade produtiva dos recursos em água, solo, vegetação, fauna que os homens exploram para viver, valendo ressaltar que, deve-se compreender este processo complexo a partir de duas sequências de fatores: os agro-bio-climáticos e os humanos.

Goudie (1990) define o processo de desertificação como uma alteração na biomassa com deterioração acelerada do solo, responsabilizando como principais agentes de modificação, as atividades humanas e o fator climático. Em seus argumentos, o autor define que o excesso de monocultura, o superpastoreio, a salinização e o desmatamento são causas associadas à ocorrência do processo de desertificação.

Mainquet (1995) enfoca a desertificação a partir de reflexões e observações para avaliar que, mesmo sendo um processo que tem uma amplitude espacial, as causas humanas determinantes são locais. Já Conti (1997), baseando-se em critérios de distribuição da população, crescimento populacional e heterogeneidade das características naturais nas baixas latitudes, define a desertificação como “perda progressiva da produtividade dos ecossistemas, afetando parcelas muito expressivas dos domínios subúmidos e semiáridos em todas as regiões quentes do mundo”.

Por fim, tem-se a definição oficial dada no documento intitulado Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (CCD, 1995), como um fenômeno provocado pela degradação dos solos nas áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de diversos fatores, indo estes das variações climáticas as atividades humanas.

Analisando as conceituações, evidencia-se que estão inseridas na questão da escala (temporal e espacial), onde são considerados os critérios do ponto de vista climático, social, botânico, pedológico, entre outros.

De forma geral, pode-se associar a desertificação a uma degradação do ambiente, especificamente do solo, nas áreas áridas e semiáridas. A qualidade do solo é baseada em atributos e depende do equilíbrio entre degradação e processos de recuperação. Os processos de degradação dos solos no semiárido nordestino, muitas vezes, estão pautados na utilização pelos agricultores de modelos agrícolas sem planejamento e gerenciamento adequados, que tanto em perímetros irrigados quanto em áreas de cultivo, acaba condicionando o processo de salinização, tornando grandes áreas de solo inutilizadas para o cultivo.

Lal (1993) expõe que o aumento da pressão demográfica e a escassez mundial de terras agrícolas aptas para o cultivo, refletem no esgotamento de nutrientes e consequentes desequilíbrios como a perda da fertilidade, redução da biodiversidade, deterioração da estrutura do solo e perturbações no ciclo hidrológico.

Assim, esse quadro climático extremo e as atividades humanas, se conjugam criando um ambiente favorável ao processo de desertificação, estabelecendo-se um círculo vicioso de degradação, onde a erosão causa a diminuição da capacidade de retenção de água pelos solos, perda de biomassa e nutrientes. Com a cobertura vegetal mais empobrecida, a radiação desseca ainda mais o solo e a erosão se acelera, promovendo a aridez. No desenrolar deste processo a ação antropogênica tem desempenhado papel fundamental, acelerando seu desenvolvimento e agravando as consequências por meio de práticas inadequadas de uso dos recursos naturais (TRAVASSOS, 2011).

Sá et al. (2004) destacam o Estado da Paraíba como aquele que apresenta os mais graves problemas gerados pela desertificação no Brasil, tendo como causa principal as modificações seculares que vem atingindo as comunidades vegetais relacionadas ao bioma Caatinga. Devido ao clima predominantemente seco (semiárido e subúmido seco), mais de 90% do território paraibano apresenta áreas susceptíveis à desertificação (Sertão, Borborema e Agreste), além de possuir o maior percentual de áreas com nível de degradação da terra muito grave (29%), segundo o Programa de Ação Nacional de Combate a Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN-Brasil (BRASIL, 2004).

Na região do Alto Curso do Rio Paraíba, área de estudo deste trabalho, a desertificação já atinge, em diversos graus, cerca de 70% dessas terras (7.354,2 km²), principalmente em função do desmatamento para aproveitamento da lenha como fonte energética doméstica e industrial, produção de carvão vegetal, uso na construção civil, produção de cercas, etc. (SOUZA, 2011; SOUZA et al., 2011 apud SOUZA et al., 2015). Em se tratando de uma região onde a pluviosidade média anual é muito baixa (cerca de 500mm), esse quadro acarreta uma série de consequências negativas, tanto do ponto de vista ambiental, como social e econômico (SOUZA et al., 2011 apud SOUZA et al., 2015).

Com o objetivo de efetuar o mapeamento temporal das áreas em risco de desertificação no Alto Curso do rio Paraíba e na Área de Proteção Ambiental do Cariri – PB/Brasil. Tendo como parâmetro as modificações efetuadas na caatinga, Souza et al. (2015) fizeram análises em imagens de satélite dos anos 1989, 2005 e 2013, e constataram que na área estudada, de forma geral, teve um aumento progressivo da degradação nas caatingas entre as décadas de 1980 à 2013, cujas razões estão relacionadas a forma como se dá o uso dessas terras, o que vem se processando há séculos de ocupação das mesmas, estabelecendo-se uma situação de risco crescente à desertificação.

Diante do que foi abordado, a problemática da desertificação vem sofrendo progressões e acaba ameaçando a qualidade de vida de milhares de pessoas nos mais variados contextos, seja ele ambiental, social e econômico. Por esse motivo, a elaboração de estudos acerca desse fenômeno é de grande importância, para que seja possível explicar uma realidade cada vez mais complexa e auxiliar nas propostas de soluções.

2.3. Modelagem matemática

Modelos consistem em representações que, de forma simplificada, são criadas com intuito de facilitar o entendimento da realidade (RENNÓ, 2003). Podem, portanto, ser entendidos como uma visão abstrata do mundo real, objetivando a compreensão dos fenômenos que o regem. Para isto é necessário que um dado modelo exiba a descrição das características essenciais do mundo real, de forma que o seu comportamento reflita quase ou totalmente aquele do sistema modelado.

Para Saldanha (2007) essas representações do real podem ser solucionadas de duas formas: por meio de modelos físicos ou de modelos matemáticos. Os primeiros geralmente reproduzem, em escala reduzida, modelos conceituais de fenômenos de interesse, denominados protótipos, e os segundos, de acordo com Sodré (2007), são formados por um

conjuntos de equações que representam, quantitativamente, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo, baseadas em um sistema real.

Na área de meio ambiente, a modelagem computacional vem apresentando diversas aplicações, desde previsões sobre impactos a ecossistemas até interações ecológicas entre seres vivos. O estudo de modelos desses fenômenos, de natureza complexa, vem ganhando destaque na literatura (BONGANHA et al., 2007). A aplicação desses instrumentos exige a utilização de técnicas e ferramentas de modelagem e simulação para representar e facilitar tanto a compreensão sobre seu funcionamento como a tomada de decisão sobre sistemas ambientais (SALDANHA, 2007)

Os processos ambientais no mundo real são geralmente bastante complexos e são tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. Tal complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Pode-se haver um entendimento qualitativo de um processo particular, mas o entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complexas, exigindo simplificações para seu uso (STEYAERT, 1993).

Em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como, em aplicações visando à gestão e ao gerenciamento ambiental, a utilização de modelos é cada vez mais presente. Segundo Rosman (2001), a necessidade de utilização da modelagem na gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente de corpos de água naturais. Por meio de modelos calibrados, bem capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fez medições, podem-se interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos para toda a área de interesse, podendo prever situações ao simular cenários futuros.

De acordo com Tucci (1998), os modelos matemáticos como instrumento para o gerenciamento de recursos hídricos podem servir para quantificar os impactos das atividades humanas e das mudanças no uso e ocupação do solo, sobre a qualidade da água e a disponibilidade hídrica, permitindo a elaboração de estratégias de controle e planejamento na utilização e alocação do recurso água. Dessa forma, a representação dos processos hidrológicos com o uso de modelos é a forma encontrada para estudar os diferentes componentes do ciclo hidrológico e as interações antrópicas.

2.3.1. Modelos Hidrológicos

De acordo com Silva (2007), a Hidrologia abrange o estudo dos fenômenos naturais encontrados no ciclo hidrológico. Para compreender melhor o funcionamento desses fenômenos dentro do sistema da bacia hidrográfica, têm-se desenvolvido modelos hidrológicos que simulam a ocorrência dos mesmos.

Os modelos hidrológicos são construídos para representar os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica quais sejam: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, percolação, evaporação, transpiração e retenção superficial. Esses processos são os componentes do ciclo hidrológico e ocorrem de forma diferenciada para cada sistema, considerando que a movimentação hídrica em uma bacia depende de variados fatores como tipo de solo, cobertura vegetal, clima, relevo, características hidrogeológicas, formato e tamanho da bacia, duração e intensidade da chuva, grau de compactação do solo e umidade antecedente do solo (SARAIVA, 2010).

A modelagem hidrológica permite verificar a consistência das informações disponíveis (dados observados), que são em geral muito curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados, permitindo, por exemplo, a geração de séries sintéticas e a utilização dos modelos como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas (SANTOS, 2009).

Segundo Lima (2011), os modelos servem como uma ferramenta de auxílio ao trabalho do engenheiro hidrólogo e demais profissionais envolvidos com o tema, permitindo melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, bem como, possibilitando prever o comportamento da bacia sob condições diversas. A maior parte dos modelos representa apenas alguns dos processos que ocorrem numa bacia hidrográfica, haja vista a grande dificuldade de se representar tais processos por meio de equações.

Para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário à compreensão da estrutura do modelo e suas limitações. Kim e Kaluarachchi (2008) afirmam que, devido à limitação de monitoramento hidrológico, deve-se ter preferência por modelos cujos dados de entrada são mínimos, como temperatura e evapotranspiração potencial e que apresentam um reduzido número de parâmetros a serem estimados. Além desses fatos, deve-se ressaltar que muitos modelos necessitam de calibração para que reproduza o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada

modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos da bacia.

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Comumente, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (MOREIRA, 2005). A conceituação de cada classificação é descrita a seguir:

a) Estocástico ou Determinístico: quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico (TUCCI, 1987);

b) Empíricos ou Conceituais: os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão;

c) Discreto ou Contínuo: um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva a modelagem de períodos isolados da série, na maioria das vezes buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, normalmente, contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Em decorrência disso, esses modelos apresentam estrutura mais detalhada, desenvolvida para simular com maior exatidão todas as fases do ciclo hidrológico;

d) Conceituado ou Distribuído: modelos concentrados são aqueles que não consideram a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo modelado. Nesses modelos, a principal variável é o tempo (FAYAL, 2008). Por outro lado, os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. Nesse caso, as variáveis e parâmetros do modelo dependem do tempo e do espaço (CUNHA, 2004).

Como exemplo de modelos hidrológico tem-se o de transformação precipitação-vazão, ou chuva-vazão, que apresenta diversas aplicações como: previsão de cheias, definição de cheias de projeto, operação de hidrelétricas, estimativa da vazão para navegação, entre outros.

Modelos de escoamento em cursos d'água podem simular a qualidade da água nos rios, estimativa do calado e operação de barragens e determinação de áreas de várzea e de remanso em canais. Modelos de balanço de reservatório podem ser utilizados para regularização de vazões, amortecimento de cheias e operação de hidrelétricas. Modelos estatísticos podem ser utilizados para preenchimento de falhas em séries de dados e determinação de vazões máximas e mínimas (TUCCI, 2005).

2.3.2. Modelo chuva-vazão

Tucci (1998, p. 227) caracterizou os modelos chuva-vazão da seguinte maneira:

Os modelos precipitação-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão. Esses modelos devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, e fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio.

Os modelos de transformação chuva-vazão têm por objetivo estimar o deflúvio em um sistema de drenagem qualquer, gerado por um evento de chuva. Buscam reproduzir as fases do ciclo hidrológico entre a precipitação e o escoamento no ponto de interesse. Os aspectos mais importantes para a escolha do modelo hidrológico a ser utilizado são os objetivos da utilização, as limitações do modelo na representação dos processos e a qualidade e quantidade das informações utilizadas em conjunto com o modelo.

Existe uma enorme variedade de tipos de modelos. Desde modelos bastante simplificados, até modelos com entradas distribuídas, que consideram a variabilidade espacial e temporal do evento chuvoso. Geralmente estes últimos modelos tentam representar a variação das características da bacia hidrográfica no espaço e fazem balanços hídricos localizados, determinando parcelas de evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e subsuperficial para cada unidade em estudo. Define-se um percurso para estes escoamentos até atingir uma calha de drenagem; daí, através de processos hidrodinâmicos, o escoamento é propagado até a seção de interesse.

Os modelos chuva-vazão podem ser, de forma geral, agrupados em duas categorias (REFSGAARD; KNUDSEN, 1996 apud DINIZ, 2008): 1) modelos concentrados, cuja representação espacial dos processos hidrológicos se dá por meio de valores médios calculados na secção de referência da bacia hidrográfica (WOOD, 1995 apud DINIZ, 2008); 2) modelos distribuídos, os quais utilizam equações contínuas que descrevem a variação temporal e espacial dos processos hidrológicos (BEVEN AND O'CONNELL, 1982 apud DINIZ, 2008).

Existem vários modelos concentrados e distribuídos em uso no Brasil e, para o presente

trabalho selecionou-se um modelo concentrado obedecendo a quatro critérios principais: a) aplicabilidade do modelo para a região de estudo; b) o menor número possível de parâmetros a calibrar para diminuir as incertezas dos seus valores; c) intervalo de cálculo compatível com os dados disponíveis na região; e d) apropriado para comprovar as técnicas de regionalização propostas.

Dessa forma, de acordo com o objetivo a ser atingido e considerando a quantidade e qualidade dos dados disponíveis no local, o modelo selecionado foi o modelo chuva-vazão SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) em sua versão mensal, que já foi utilizado por Diniz (2008) na mesma área de objeto deste estudo, determinando que há a viabilidade de aplicação deste modelo.

2.3.3. Modelo SMAP

O modelo utilizado para o estudo foi o modelo concentrado SMAP em sua versão mensal, o qual, de acordo com Lopes et al. (1981), possui uma estrutura relativamente simples e opera com dados de chuva e evapotranspiração potencial em intervalos mensais. E sendo o modelo SMAP bastante conhecido pela comunidade técnica e já aplicado a diversas bacias hidrográficas da região Nordeste do Brasil, o mesmo foi adotado para desenvolvimento e comprovação das técnicas aqui propostas.

O modelo utiliza como dados de entrada as alturas totais de precipitação, evapotranspiração potencial, no intervalo de tempo desejado, a área de drenagem da bacia e as condições iniciais da bacia hidrográfica. O modelo simula o balanço da umidade do solo, continuamente atualizado a partir das condições iniciais fornecidas como dados de entrada, fundamentado em dois reservatórios lineares que representam o solo (camada superior) e o aquífero, conforme ilustrado na Figura 5.

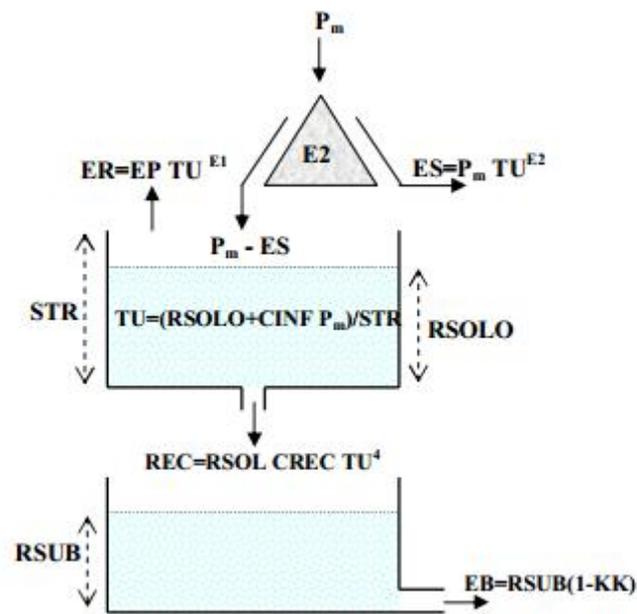


Figura 5: Desenho esquemático do modelo chuva-vazão SMAP. Fonte: Diniz, 2008

A cada evento de precipitação P_m é feito um balanço de massa. Uma fração da precipitação é transformada em escoamento superficial ES , por meio da seguinte equação:

$$ES = P_m \cdot TU^{E2} \quad (1)$$

Onde,

TU = taxa de umidade do solo; e

$E2$ = parâmetro controlador do escoamento superficial.

A lâmina restante, $P_m - ES$, é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste reservatório, a umidade é atualizada ao longo do tempo através de perdas por evapotranspiração real ER , equivalente a seguinte equação:

$$ER = EP \cdot TU^{E1} \quad (2)$$

Onde,

EP = evapotranspiração potencial;

TU = taxa de umidade do solo; e,

$E1$ = parâmetro calibrável do modelo.

A outra saída desse reservatório é a recarga para o reservatório subterrâneo (aquífero). Nesta transferência de água é usado o conceito de capacidade de campo, isto é, se o nível do reservatório, $RSOLO$, for maior que a capacidade de saturação, STR , ocorrerá recarga, REC , para o reservatório subterrâneo na forma:

$$REC = RSOLO \cdot CREC \cdot TU^4 \quad (3)$$

Em que,

$$TU = \frac{RSOLO + (CINF \cdot P)}{STR}$$

$CREC$ = coeficiente de recarga; e,

$CINF$ = coeficiente de infiltração.

A razão do expoente de TU ser igual a quatro é para que em situações de teor de umidade próximas a capacidade de campo ($0,4 < TU < 0,6$) o valor da função seja próximo de zero.

O reservatório subterrâneo é outro reservatório linear onde o nível de água existente $RSUB$ é deplecionado à taxa constante KK resultando o escoamento básico EB , ou seja:

$$EB = RSUB \cdot (1 - KK) \quad (4)$$

Por fim, a soma dos escoamentos direto (superficial) e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia. Seguindo-se o procedimento indicado, o nível de cada reservatório é continuamente atualizado para cada mês.

3. METODOLOGIA

Para desenvolver o presente trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico e revisão teórica sobre os temas tratados. Este levantamento bibliográfico contou com pesquisa em artigos científicos, monografias, sites especializados, livros que tratam sobre o tema, entre outros, que serviram de embasamento para discussão sobre a desertificação e a modelagem hidrológica de chuva-vazão.

Para realização da modelagem, foi utilizado o modelo SMAP em sua versão mensal, um modelo determinístico, conceitual e concentrado de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão.

3.1. Coleta e processamento dos dados hidrometeorológicos

O modelo SMAP aplicado a este trabalho fundamentou-se em totalidade no utilizado e calibrado por Diniz (2008), com a ressalva que a aplicação restringiu-se a apenas um posto fluviométrico, o de Caraúbas. Dessa forma, todos os dados de entrada utilizados na modelagem foram fornecidos pelo referido autor.

Os dados hidrometeorológicos de entrada utilizados nesta pesquisa são: vazão, precipitação e evapotranspiração potencial. Esses dados devem possuir o mesmo período base para possibilitar a simulação hidrológica e não podem ter falhas uma vez que a simulação hidrológica de forma contínua depende das características temporais de cada série.

3.1.1. Fluviometria

Os dados fluviométricos usados neste trabalho são provenientes da rede fluviométrica do extinto Departamento Nacional De Águas e Energia Elétrica (DNAEE), atualmente sob a jurisdição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A Agência Nacional de Águas (ANA) disponibiliza pela Internet o Sistema HIDROWEB de Informações Hidrológicas, a partir do qual pôde-se identificar a existência do posto fluviométrico de Caraúbas, onde nos foi fornecido dados de descarga e cota aptas a serem utilizadas nos estudos hidrológicos aqui almejados, sob a responsabilidade da ANA, que opera este e demais outros postos fluviométricos da Paraíba, pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) por meio do Ministério de Minas e Energia.

Tabela 1: Posto fluviométrico selecionado para o estudo: Caraúbas, PB.

Código	Sub-bacia	Nome do posto	Altitude (m)	Área (km ²)	Latitude			Longitude		
					grau	min	seg	grau	min	seg
38830000	38	Caraúbas	493	5120	-7	43	42	-36	30	9

3.1.2. Precipitação

As séries históricas de precipitação são registradas para um ponto e período específico, sendo necessário estimar a precipitação média para cada bacia. Os métodos mais comuns para essas estimativas são: (a) Polígonos de Thiessen; (b) Isoietas; (c) Geoestatístico (TUCCI, 1998).

Neste trabalho foram utilizadas as séries históricas médias de precipitação estimadas por Diniz (2008) utilizando os polígonos de Thiessen. A técnica consiste em fazer uma ponderação da chuva em cada sub-bacia de acordo com a localização de cada posto pluviométrico. São designados os pesos para cada estação pluviométrica calculando a porcentagem da área de influência de cada posto pluviométrico na área total em que se está trabalhando. Os limites de cada polígono se formam por linhas mediatrizes perpendiculares às linhas que ligam uma estação a outra, as quais, tomadas três a três, formam um triângulo cujo baricentro é o encontro das referidas mediatrizes. Assim, a precipitação média na bacia é definida pela equação 5.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i a_i}{A} \quad (5)$$

Onde:

P_m = precipitação média (mm);

a_i = área de influência do posto i (Km²);

P_i = precipitação no posto i (mm);

A = área da bacia hidrográfica (km²);

n = número de postos que exerce influência na bacia.

O período de determinação das chuvas médias na bacia hidrográfica foi definido em função da disponibilidade de dados de vazões fluviométricas, resultando uma variação entre os anos janeiro/1974 a dezembro/1991. Já os postos pluviométricos selecionados (Quadro 1), foram definidos de acordo a sua localização, estando ao redor ou no interior da própria bacia hidrográfica em estudo. Os dados foram obtidos da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA).

Quadro 1: Postos pluviométricos selecionados para as bacias hidrográficas dos postos fluviométricos.

Bacia Hidrográfica	Posto fluviométrico	Postos pluviométricos selecionados
Rio Paraíba	Caraúbas	Coxixola, São José dos Cordeiros, Caraúbas, Congo, Prata, Santa Maria da Paraíba, São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro, Serra Branca, Bananeiras, Sertânia, Poção, Cimbres, Jabitacá.

3.1.3. Evapotranspiração

Dado a inexistência de estações evaporimétricas com abrangência espacial e temporal adequadas no estado da Paraíba, Diniz (2008) usou os dados de evapotranspiração potencial (ETP) determinados conforme Hargreaves e Samani (1985).

Hargreaves e Samani (1985) desenvolveram uma equação simples que necessita apenas da temperatura do ar, e coeficientes dependentes da latitude do local e época do ano, que estão relacionadas à irradiância solar extraterrestre. Esta equação, conhecida como a equação de Hargreaves-Samani pode ser expressa da seguinte forma:

$$ETP = 0,0023Q_0 \times (Tmax - Tmin)^{0,5} \times (Tmed + 17,8) \quad (6)$$

Em que:

Q_0 = irradiância solar extraterrestre, expressa em mm de evaporação equivalente;

$Tmax$ = temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$);

$Tmin$ = temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$);

$Tmed$ = temperatura média do ar ($^{\circ}C$), no período considerado.

Para cada bacia adotou-se as lâminas médias mensais referentes às médias calculadas entre os municípios localizados dentro e nas imediações da bacia, conforme resumido no quadro 2.

Quadro 2: Localidades com evapotranspirações potenciais representativas.

Bacia hidrográfica	Posto fluviométrico	Localidades
Rio Paraíba	Caraúbas	Sumé, Monteiro, Cabaceiras

3.2. Modelo chuva-vazão SMAP

Para uma aplicabilidade satisfatória, o modelo foi adaptado de acordo com as características da área de estudo, sofrendo adequações como simplificações, inclusão e

supressão de parâmetros. Dessa forma, o modelo SMAP utilizado para o estudo da área foi o trabalhado e calibrado por Diniz (2008), que o aplicou em 41 bacias hidrográficas no âmbito do território paraibano, na região semiárida do Nordeste brasileiro. Uma dessas bacias, também inclui-se a bacia que inclui o posto fluviométrico de Caraúbas, objeto deste trabalho.

O modelo SMAP mensal, de uma forma geral, realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares que representam o solo (camada superior) e o aquífero. Porém, Diniz (2008) afirma que em decorrência das características da área de estudo, predominantemente de solos rasos e assente sobre rochas impermeáveis, há a quase inexistência de recargas para o reservatório subterrâneo, então, o parâmetro CREC, que governa estas transferências, é nulo. Tal situação, identificada também por Alexandre et al (2005), comprometeu o significado do parâmetro de recessão KK, uma vez que sem recargas não haveria escoamentos subterrâneos. Desta forma, os parâmetros CREC e KK foram eliminados do modelo e o processo de calibração se deu apenas sobre os quatro parâmetros que definem a dinâmica do reservatório superficial (STR, CINF, E1 e E2) (Quadro 3) .

Parâmetros do modelo SMAP mensal

STR	=	Capacidade de Saturação do solo (mm)
CINF	=	Coefficiente de Infiltração (adm)
E1	=	Responsável pelo controle das taxas de evapotranspiração na bacia (adm)
E2	=	Controlador do escoamento superficial (adm)

Quadro 3: Parâmetros do modelo SMAP

Com apenas um reservatório, o escoamento foi dividido em duas parcelas: a primeira, chamada de escoamento direto, ocorre por transbordamento do reservatório quando seu nível de água (RSOL) superar a capacidade de armazenamento (STR); a segunda, formada a partir do esvaziamento do reservatório, em forma de escoamento superficial e sub-superficial.

A atualização das variáveis de estado do modelo acontece mensalmente. Programado em planilha de Excel, a modelagem seguiu os procedimentos de cálculo de acordo com Diniz (2008). Como dados de entrada, utilizou-se a série mensal de chuvas, as médias mensais de evapotranspiração potencial e a série de vazões médias mensais, dos anos de 1974 a 1991, da área em estudo.

A inicialização do modelo se dá com a capacidade do reservatório do solo e o cálculo da recarga subterrânea R_{sub} , da seguinte forma:

$$R_{solo} (1) = Tu_{in} \times STR \quad (7)$$

$$SS (1) = \frac{E_{bin}}{(1 - k)} \quad (8)$$

Em que:

Tu_{in} = Teor de umidade inicial (adimensional)

E_{bin} = Vazão básica inicial (m^3/s)

A transferência entre os reservatórios é regida pelas seguintes funções apresentadas abaixo, que relacionam todos os parâmetros dos quadros 4 e 5.

$$R_{solo} (i + 1) = R_{solo}(1) + Prec \times (1 - CINF) \quad (9)$$

$$ED = R_{solo} (i + 1) - STR \quad \text{Se } ED < 0, \text{ então } ED = 0 \quad (10)$$

$$R_{solo3} = R_{solo} (i + 1) - ED \quad (11)$$

$$TU = \frac{R_{solo3}}{STR} \quad (12)$$

$$ES = (1 - CINF) \times Prec \times TU^{E2} \quad \text{Se } ES > R_{solo3}, \text{ então } ES = R_{solo3} \quad (13)$$

$$R_{solo4} = R_{solo3} - ES \quad (14)$$

$$ER = EVTP \times TU^{E1} \quad (15)$$

$$R_{solo5} = R_{solo4} - ER \quad (16)$$

$$REC = R_{solo5} \times CREC \times TU^4 \quad (17)$$

$$SS2 = R_{sub} (1) + REC \quad (18)$$

$$13 - EB = SS2 \times (1 - kk) \quad (19)$$

$$14 - SS3 = SS2 - EB \quad (20)$$

O cálculo da vazão no modelo é dado, finalmente, pela seguinte equação:

$$15 - Q_{cal} = ES + ED \quad (21)$$

Obs: Os parâmetros R_{solo3} , R_{solo4} , R_{solo5} , $SS2$ e $SS3$, consistem na atualização dos valores do reservatório de solo e do escoamento sub-superficial.

Todas essas equações supracitadas foram organizadas no software Excel, respeitando suas inter-relações e estendendo-se por toda série histórica trabalhada nesse estudo.

O produto da simulação hidrológica são valores de vazão e, a partir de um hidrograma, são comparados graficamente com os observados, aferidos em medições na bacia. Para atingir o objetivo de maximizar o máximo possível a semelhança entre os gráficos utiliza-se funções objetivo para medir a discrepância entre os valores. Porém, como o modelo já possuía seus parâmetros calibrados de acordo com Diniz (2008), a função objetivo não foi calculada

Quadro 4: Parâmetros

de procedimentos

Parâmetros de procedimentos – SMAP mensal

R _{solo}	=	Reservatório do solo
SS	=	Escoamento sub-superficial
Prec	=	Precipitação
ED	=	Escoamento direto
ES	=	Escoamento superficial
ER	=	Evapotranspiração Real
EB	=	Escoamento Básico
REC	=	Recarga

Quadro 5: Parâmetros de função de transferência

Parâmetros de função de transferência - SMAP

EVTP	=	Evapotranspiração potencial (mm)
TU	=	Teor de umidade de solo (adm)
STR	=	Capacidade de Saturação do solo (mm)
CINF	=	Representa a parcela da chuva que não alimenta o reservatório superficial (adm)
E1	=	Responsável pelo controle das taxas de evapotranspiração na bacia (adm)
E2	=	Controlador do escoamento superficial (adm)

3.3. Análise da sensibilidade

Após a elaboração do modelo calibrado, executou-se a etapa de análise de sensibilidade dos parâmetros. A análise de sensibilidade é o estudo de como um modelo responde, quantitativa e qualitativamente, a diferentes variações nas informações que o alimenta. Portanto, a análise de sensibilidade estuda as relações entre os fluxos de informações que entram e que saem do modelo. Dessa forma, permite verificar a natureza da relação de dependência entre os resultados simulados e as incertezas existente nos dados de entrada usados na modelagem.

A análise de sensibilidade tem como principal objetivo investigar como um modelo computacional responde a variações nos valores dos parâmetros. A análise de sensibilidade permite identificar os parâmetros que influem significativamente nos resultados, ao tempo em que, torna possível verificar o reflexo das incertezas dos valores dos parâmetros nos resultados simulados.

O método para análise de sensibilidade utilizado neste trabalho foi o proposto por Abdulla e Al-Branih (2000) que o aplicaram para reduzir o número de parâmetros a serem estimados para o modelo conceitual de transformação de chuva em vazão SFB – Surface inFiltration Baseflow. O método proposto é realizado adotando o seguinte procedimento:

1. O modelo é calibrado para todos os parâmetros do modelo;
2. Faz-se uma alteração no valor de apenas um parâmetro mantendo os demais fixos, as porcentagens de alteração são de + 10%, +20%, +30%, +40%, +50%;
3. Calcula-se a variação no volume de escoamento total em porcentagem;

4. Repete-se os passos 1 a 3 para todos os outros parâmetros e analisa-se os parâmetros mais sensíveis de acordo com a porcentagem de variação com que eles interferiram no escoamento.

3.4. Análise da possível interferência das consequências da desertificação na dinâmica do modelo

Após a compreensão de toda a estrutura e sensibilidade dos parâmetros do modelo, partiu-se para a interpretação de como as consequências do processo de desertificação podem comprometer o comportamento do modelo, interferindo nos resultados de vazões.

Foi analisado as variáveis, os parâmetros, os dados de entrada e toda a proposta do modelo, afim de obter respostas conclusivas a respeito das hipóteses impostas nesse trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados referentes às etapas de elaboração do modelo SMAP, de análise da sensibilidade dos parâmetros e da verificação de como as consequências da desertificação podem interferir na dinâmica do modelo.

4.1. Elaboração do modelo SMAP

Como mencionado no item 3.1, o modelo SMAP utilizado foi o aplicado e calibrado automaticamente por Diniz (2008), que implementou e executou em linguagem Fortran, o algoritmo SCE-UA, em ambiente MS-DOS. O algoritmo SCE-UA realiza a pesquisa do ótimo global baseado nos mecanismos de seleção natural, combinando um processo de seleção artificial com operadores genéticos extraídos da natureza.

De acordo com o código computacional liberado pelo trabalho de Diniz (2008), foi possível a construção do modelo pelo software Excel, para que, devido a maior familiaridade com o programa, seja mais prático o desenvolvimento dos demais objetivos.

O modelo SMAP foi inicializado com os valores de vazão do posto fluviométrico de Caraúbas, que abrange uma área de 5120 km², os dados pluviométricos dos postos de Coxixola, São José dos Cordeiros, Caraúbas, Congo, Prata, Santa Maria da Paraíba, São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro, Serra Branca, Bananeiras, Sertânia, Poção, Cimbres, Jabitacá, juntamente com os coeficientes gerados pelo polígono de Thiessen; e os dados de evapotranspiração.

Obtidos a partir do método de Hargreaves & Samani (1985) e por meio das lâminas médias mensais referentes às médias calculadas entre os municípios localizados dentro e nas imediações da bacia, os dados de evapotranspiração potencial foram utilizados como entrada no modelo e encontram-se na Tabela 2. A Figura 6 apresenta, graficamente, o comportamento da evapotranspiração calculada durante o ano.

Tabela 2: Resultados da Evapotranspiração Potencial - Método Hargreaves – Samani

Mês	Evapotranspiração Potencial Média mensal (mm/mês)
Jan	150,9
Fev	172
Mar	160,2
Abr	172,6
Mai	142,8
Jun	132,3
Jul	123
Ago	111,6
Set	108
Out	116,8
Nov	140,5
Dez	152

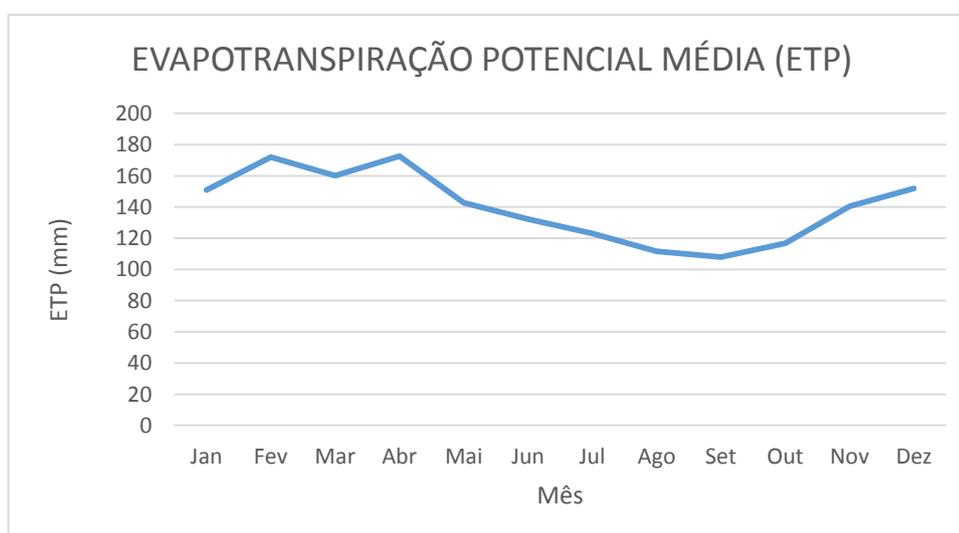


Figura 6: Gráfico da evapotranspiração potencial média mensal.

Com os dados de evapotranspiração potencial, precipitação média dos pluviômetros de acordo com o método do polígono de Thiessen e a vazão fornecida pelo posto fluviométrico de Caraúbas, dos anos de 1974 a 1991, inseriu-se no modelo os resultados dos parâmetros de inicialização e dos parâmetros já calibrados, com coeficiente de eficiência de 0,854, de acordo com Diniz (2008), como apresentado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Parâmetros de
SMAP

inicialização do modelo

Parâmetros de inicialização	
Tuin	18,67 %
Ebin	0 m ³ /s
Área de drenagem	5120 km ²

Tabela 4: Parâmetros calibrados

do modelo SMAP

Parâmetros Calibrados	
STR	267,66
E1	2,783
E2	3,40
CINF	0,632

Como resultado de toda a compilação dos dados, foi obtido o gráfico da Figura 7, que relaciona a vazão observada fornecida pelo posto fluviométrico de Caraúbas, com a vazão calculada pelo modelo, evidenciando o comportamento semelhante entre ambos os dados, mostrando que os resultados fornecidos pelos modelo se assemelham com a realidade.

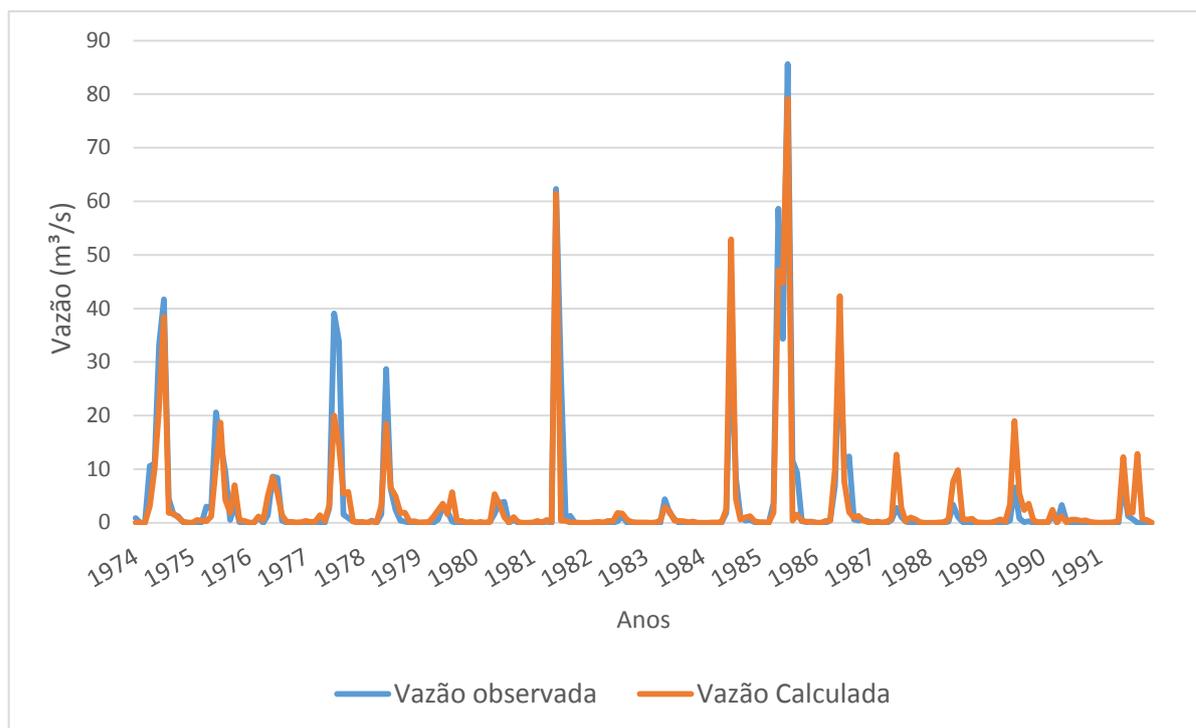


Figura 7: Série de vazões mensais observadas e geradas pelo modelo chuva-vazão SMAP.

4.2. Análise de sensibilidade dos parâmetros

Após a construção do modelo calibrado do SMAP, seguiu-se para a etapa de análise de sensibilidade que avaliou qual a ordem de influência de cada parâmetro no resultado da simulação. O procedimento é realizado fazendo-se perturbações definidas em um dos parâmetros do conjunto ótimo encontrado na calibração, mantendo-se fixos os demais.

O estudo foi feito utilizando o conjunto ótimo encontrado como ponto de partida para se fazer perturbações, para mais, correspondentes a 10, 20, 30, 40 e 50% do valor central.

Na Tabela 5 pode-se verificar a influência de cada parâmetro nos dados de saída do modelo. Observa-se que todos se mostraram bastante sensíveis às perturbações, sendo o parâmetro o CINF e o STR os que causaram maior e menor alteração, respectivamente. Já o parâmetro E1 foi o único que ao ter seu valor aumentado, o resultado de vazão respondeu de forma diretamente proporcional. O comportamento de cada parâmetro de acordo com as alterações feitas, podem ser vistos nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

Tabela 5: Porcentagens de alteração no escoamento total de acordo com as variações dos parâmetros

Porcentagem de alteração no escoamento total					
	+10%	+20%	+30%	+40%	+50%
STR	-6,01	-10,89	-15,05	-18,68	-21,88

E1	12,84	25,22	37,00	48,08	58,36
E2	-9,94	-18,49	-25,89	-32,34	-38,01
CINF	-36,22	-63,61	-82,82	-94,30	-99,20

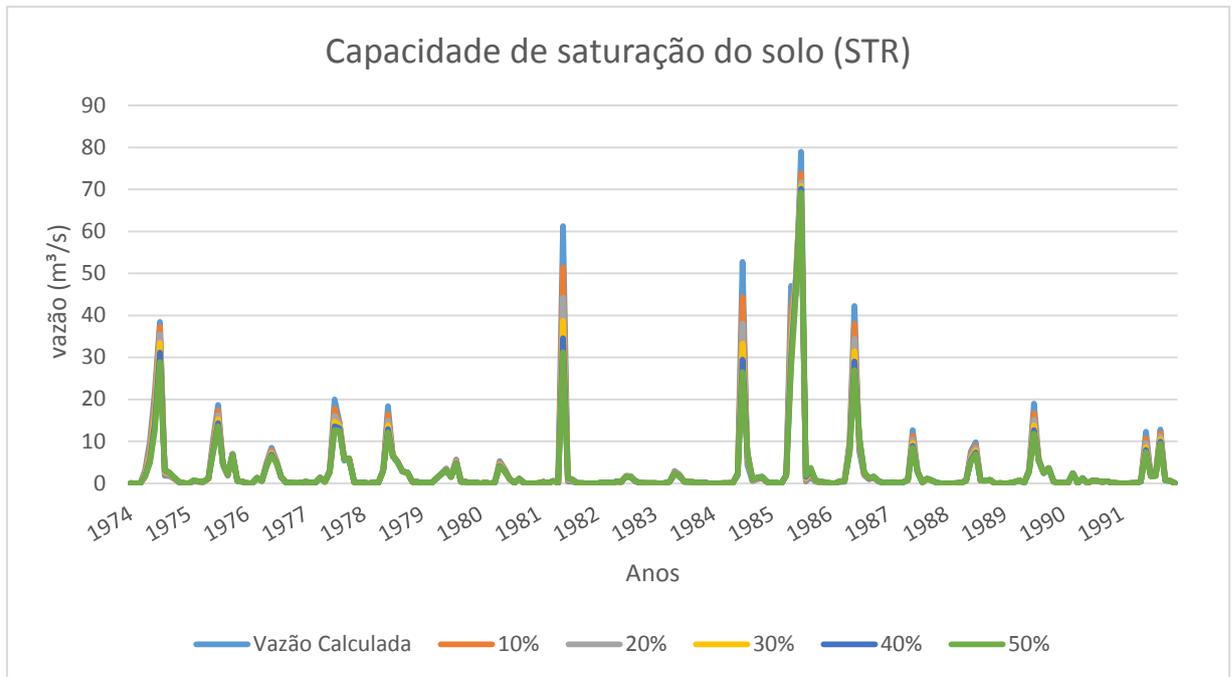


Figura 8: Representação das alterações de vazões do modelo de acordo com as perturbações feitas no parâmetro da capacidade de saturação do solo (STR).

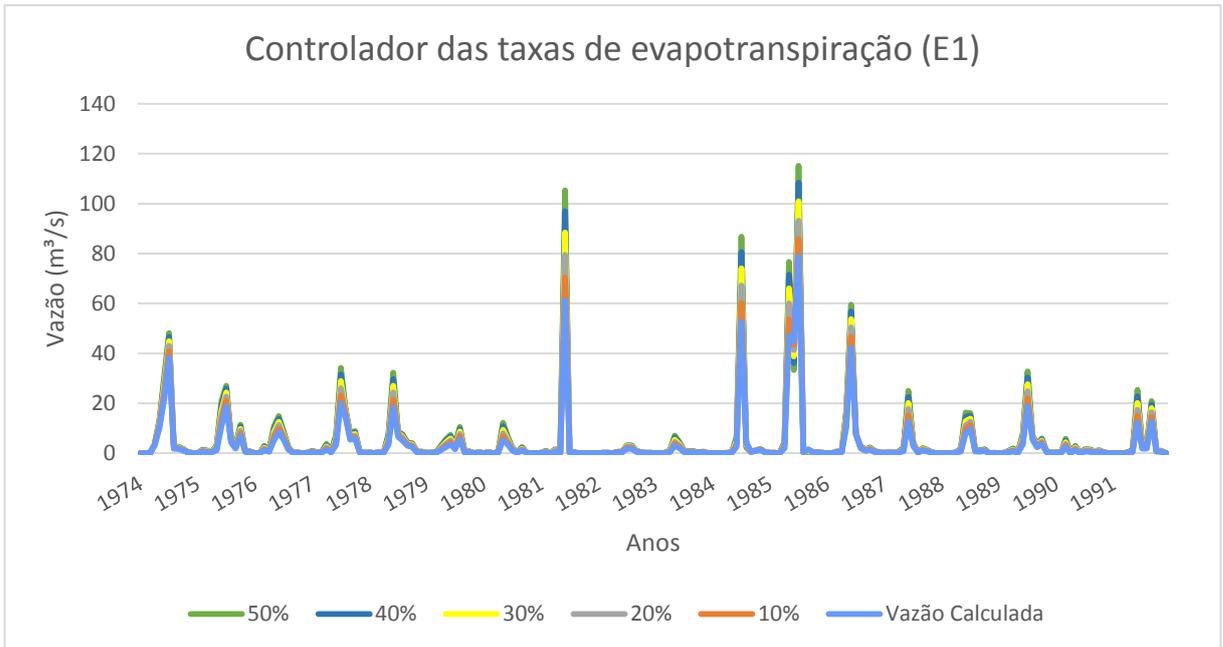


Figura 9: Representação das alterações de vazões do modelo de acordo com as perturbações feitas no parâmetro controlador da taxa de evapotranspiração (E1)

Figura 10: Representação das alterações de vazões do modelo de acordo com as perturbações feitas no parâmetro controlador do escoamento superficial (E2)

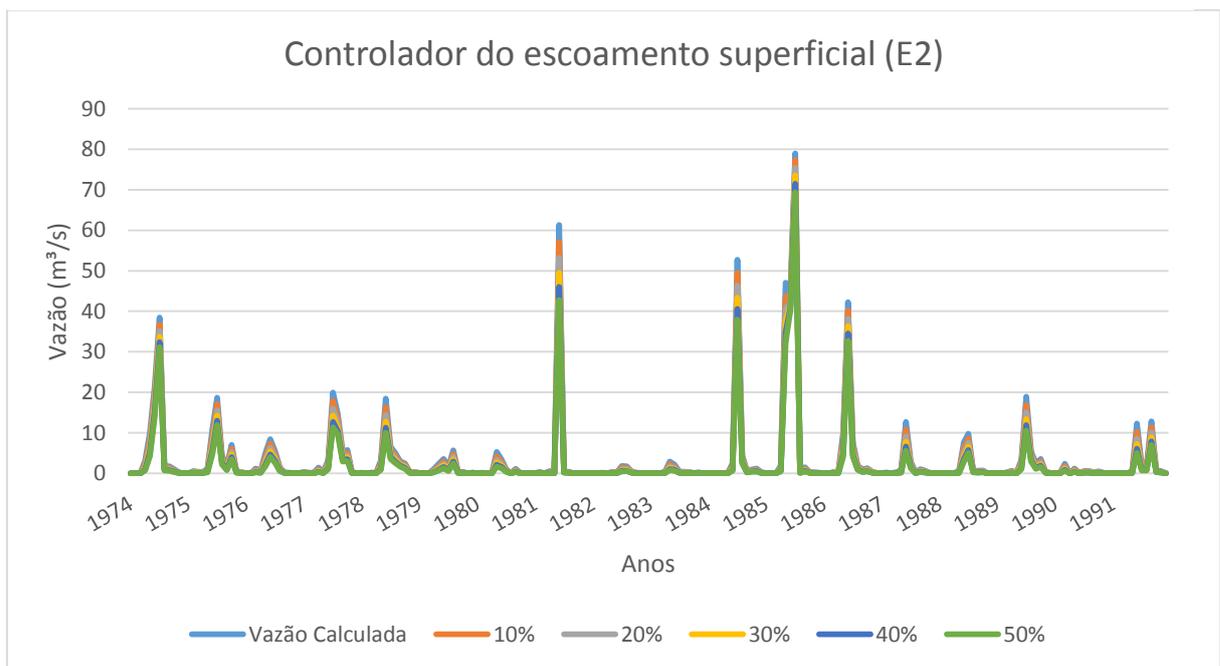
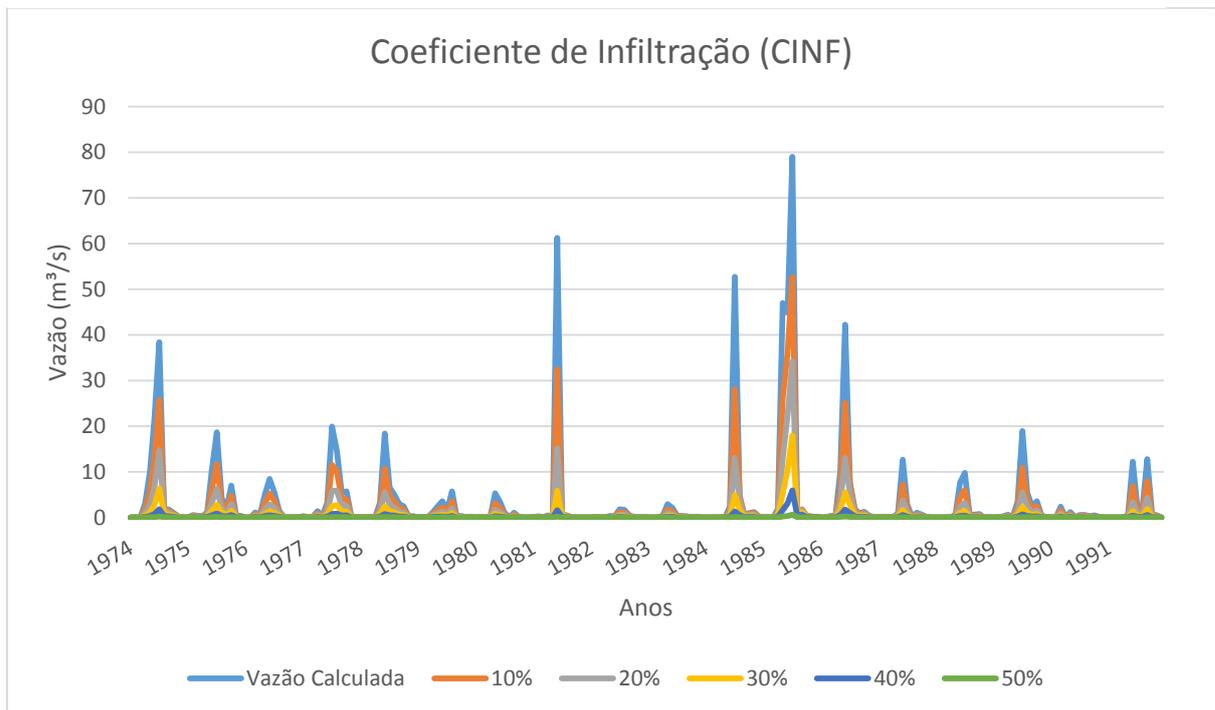


Figura 11: Representação das alterações de vazões do modelo de acordo com as perturbações feitas no parâmetro coeficiente de infiltração (CINF).



4.3. Análise da dinâmica do modelo e a interpretação das possíveis interferências sofridas pelo processo de desertificação

4.3.1. Dados de entrada

O modelo possui a precipitação e a evapotranspiração potencial como dados de entrada. A precipitação possui interferências em um contexto mais amplo e complexo, em que variações ocorridas em relativas pequenas áreas, por si só, não são capazes de influenciar seus valores. Então, foi descartada qualquer possibilidade de influência da desertificação sobre os valores de precipitação.

Evapotranspiração Potencial, por se tratar de uma medida que representa a capacidade do sistema, ou seja, sua potencialidade, não há como sofrer alterações quando seus valores são determinados. Dessa forma, os dados de entrada foram considerados inalteráveis, mesmo quando a bacia em estudo sofre com os processos da desertificação.

4.3.2. Parâmetros

O parâmetro STR representa a capacidade de saturação do solo e pode ser influenciado por fatores relacionados ao tipo e a profundidade do solo, capacidade de retenção, taxa de infiltração, espelhos de água na bacia e rede de drenagem. O parâmetro E2 é controlador do escoamento superficial e está ligado a aspectos que tendem a gerar e facilitar o escoamento como a área, declividade, forma da bacia e sinuosidade dos cursos de água, à precipitação e evaporação (DINIZ, 2008).

O parâmetro E1 é responsável pelo controle das taxas de evapotranspiração na bacia e pode ser associado a informações como a área, a forma da bacia, a elevação da bacia e à própria rede de drenagem, além, é claro, das taxas potenciais de evapotranspiração. Por fim, o parâmetro CINF representa a parcela da chuva que não alimenta o reservatório superficial e pode ser afetado pelo índice de aridez e declividade da bacia, entre outros (DINIZ, 2008).

Além dessas associações entre parâmetros e características das bacias, Diniz (2008) também definiu pelo algoritmo CFS, quais atributos físicos e climáticos da bacia explicam cada parâmetro do modelo. O CFS é um algoritmo de filtro simples que ordena subconjuntos de atributos de acordo com uma correlação baseada numa função de avaliação heurística. É uma tentativa de selecionar apenas as características que melhor descrevem e discriminam o conjunto de dados e suas estruturas latentes, reduzindo a dimensionalidade dos dados,

umentando a eficiência das ferramentas e a consequente qualidade dos resultados obtidos (LEE, 2005 apud DINIZ, 2008) (Quadro 6).

Quadro 6: Atributos selecionados através do algoritmo CFS

Parâmetros do SMAP	Atributos selecionados
E2	Pr, Lt, Kf, Rb, RL, Ra, Ct, SIN, Cmed, Ip, DS, P
STR	Rb, Ra, Ct, Solo 1, Solo 2, PAE
E1	Rb, Ct, Cmed, Solo 1, PAE
CINF	Ld, Ra, Ct, Cmed, Solo 1, PAE

Fonte: Diniz, 2008

Pr – perímetro; Lt – comprimento do curso de água principal; Ld – comprimento de rede de drenagem; Kf – fator de forma; Rb – índice de bifurcação; RL – índice dos comprimentos; Ra – índice das áreas; Ct – coeficiente de torrencialidade; SIN – sinuosidade do curso de água; Cmed – elevação média da bacia; Ip – índice de declividade média da bacia; DS – desnível específico; P – precipitação; PAE – percentagem da área da bacia hidrográfica coberta por espelho de água.

Podemos perceber que os atributos relacionados aos parâmetros do modelo (Quadro 6) representam apenas atributos morfológicos, ou seja, são características inerentes a bacia e não estão ao alcance das alterações que o processo de desertificação pode causar. Porém, usando como base as informações dadas por Diniz (2008) que, de uma forma geral, associa características ou comportamento da bacia hidrográfica aos parâmetros, podemos obter conclusões.

Por ser influenciado pela profundidade do solo e taxa de infiltração, o parâmetro STR pode sofrer alterações devido ao solo compactado e erodido, que é uma característica de área desertificada, em função do desmatamento acelerado, reduzindo a profundidade e a capacidade de infiltração do solo, que por sua vez influenciarão na contribuição de vazão da bacia. O parâmetro CINF também pode sofrer influência devido a compactação mencionada, que reduzirá a capacidade de infiltração, interferindo diretamente nesse parâmetro.

Já o parâmetro E1, por ser responsável pelo controle das taxas de evapotranspiração, poderá sofrer alterações devido ao desmatamento (causa da desertificação), que reduz o processo de transpiração das plantas e aumenta a evaporação da água pelo solo, que por consequência da ausência de cobertura vegetal, se expõe aos raios solares que tendem a aumentar sua temperatura. E por fim, o parâmetro E2 está ligado a aspectos que tendem a gerar e facilitar o escoamento, e devido a ausência de vegetação (característica da

desertificação) que impedirá a infiltração e facilitará o escoamento superficial (escoamento de maior vazão contribuinte da bacia), esse parâmetro pode ser alterado.

Comparando os quatro parâmetros, que foram considerados alteráveis pelo processo de desertificação, com suas sensibilidades (Figuras 8, 9, 10 e 11), pode-se perceber o quão frágil os resultados de vazões fornecidas por essa bacia hidrográfica se encontram frente a esse fenômeno.

A respeito de como os valores de cada parâmetro serão alterados, se para mais ou para menos, pode-se concluir que, com exceção da evaporação que interfere o parâmetro E1, todas as alterações culminarão para uma maior contribuição de vazão pela bacia. No caso, de acordo com a análise de sensibilidade, os parâmetros STR, E2 e CINF poderão ter seus valores reduzidos, mas para o E1 será necessário fazer uma melhor ponderação entre a interferência da transpiração e evaporação, para definir seu comportamento.

4.3.3. Variáveis

Após as análises dos dados de entrada e dos parâmetros, buscou-se analisar as variáveis de estado que compõem o modelo para uma melhor compreensão de como todos esses elementos se interagem, e são eles: reservatório do solo e suas atualizações (RSOLO), escoamento direto (ED), escoamento superficial (ES), evapotranspiração real (ER), escoamento básico (EB), recarga (REC) e escoamento sub-superficial (SS).

Toda a dinâmica de cálculo do modelo é interligada entre seus dados de entrada, parâmetros e variáveis, exigindo-se cautela em sua análise. Para um melhor estudo, foi feita uma ponderação entre a conceituação e características das variáveis e os elementos no qual são dependentes dentro da modelagem, afim de ter respostas conclusivas acerca dos objetivos propostos.

Primeiramente, as variáveis escoamento básico, recarga e escoamento sub-superficial foram desconsideradas por já terem seus valores nulos devido a bacia ter um solo raso e ser assentada sobre rochas impermeáveis. Dessa forma, partiu-se para a análise das demais.

A Evapotranspiração Real (ER) é respaldada pelo teor de umidade, evapotranspiração potencial e o parâmetro E1. Como já exposto no tópico anterior, a desertificação interfere no parâmetro E1, e dessa forma haverá alterações nos resultados calculados do ER, interferindo-o diretamente.

O Escoamento superficial (ES) baseia-se no teor de umidade, precipitação e nos parâmetros CINF e E2. Como mencionado no tópico anterior, o CINF e o E2 estão passíveis de sofrer alterações com a desertificação, logo comprometerá o resultado do escoamento

superficial diretamente. Já indiretamente, temos a interferência pelo teor de umidade, que sofre alterações devido a modificações sofridas por outras variáveis.

O escoamento direto (ED) é dependente apenas de uma das atualizações do RSOLO e do parâmetro STR. O RSOLO é uma variável que está correlativa com várias outras, então ele não proporciona uma interferência direta nos resultados do ED devido ao processo de desertificação. Porém, o STR (capacidade de saturação solo), por ser considerado alterável pelo processo de desertificação, ele interferirá diretamente nos resultados do ED.

O RSOLO e suas atualizações têm como dependência em seus cálculos a precipitação, o parâmetro CINF, o escoamento direto, o escoamento superficial e a evapotranspiração real, mostrando-se ser um elemento bastante dependente. Como já citado sobre a interferência da desertificação a esse parâmetro, o CINF poderá atingir diretamente nos resultados de RSOLO, que por sua vez também poderá ser atingido indiretamente pelas alterações sofridas pelo escoamento superficial e evapotranspiração real.

Por fim, o teor de umidade (TU), que é calculado a partir do segundo mês após a inicialização do modelo, baseia-se nos mesmos parâmetros do escoamento direto, e dessa forma possui a mesma conclusão: há interferência direta da desertificação em seus resultados pelo STR, e interferência indireta por alterações ocorridas no RSOLO.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A desertificação é um fenômeno que reflete a degradação da terra por atividades humanas associada às circunstâncias climáticas, que interferem nos mais variados contextos, seja ele social, econômico e ambiental. Este trabalho trouxe uma reflexão de como essa problemática é capaz de interferir nos recursos hídricos disponíveis em uma região que sofre com sua escassez.

Neste trabalho foi comprovado que o modelo conseguiu representar de forma similar o comportamento da bacia na série histórica utilizada. Porém, é importante ressaltar que o modelo é uma representação simplificada da realidade, então os seus dados calculados não são exatamente iguais aos dados observados, mas mesmo assim os objetivos traçados a partir da sua elaboração foram atendidos.

Na análise de sensibilidade dos parâmetros que fazem parte do modelo, verificou-se os quão sensíveis eles são, sendo possível até constatar uma interferência de pouco mais de 99% em determinado parâmetro. Essa análise permitiu ter-se a dimensão de como o ambiente pode ser frágil quando submetido a alterações (desertificação), afetando sua dinâmica.

Foi observado também que as alterações provocadas nos parâmetros pelo processo de desertificação irão tender ao aumento de vazão da bacia hidrográfica, pois esse fenômeno, ao reduzir a infiltração da água nos solos e do processo de transpiração das plantas (devido ao desmatamento), fará com que uma maior quantidade de água fique disponível para o escoamento. Além disso, o solo exposto junto ao intenso escoamento superficial, causa o carregamento de sedimentos, provocando a erosão e assoreando os cursos d'água. Quando assoreado, os açudes têm a tendência em ampliar seus espelhos d'água, que por sua vez facilitará na perda de água por evaporação, comprometendo o abastecimento de uma população que já sofre com a escassez hídrica.

Depois de tudo que foi explanado, não foi possível determinar o quanto a desertificação interferiu no sistema hidrológico da bacia em estudo, mas pôde-se concluir que o fenômeno em questão é sim capaz de interferir nos parâmetros do modelo, e assim, a evolução dos seus impactos, pode distanciar ainda mais o modelo da realidade da bacia, descalibrando-o.

Sugere-se então que sejam feitos mais estudos com modelos mais precisos, auxiliados ao geoprocessamento, com dados de vazão em uma série histórica mais atual, para tornar os resultados mais consistentes e menos abrangentes. Também, fica a recomendação de analisar se houve alteração do comportamento da bacia, desde os anos da série histórica utilizada até

os dias de hoje, dando espaço para previsão desses efeitos nos próximos anos. Além disso, questões relacionadas a perenização do curso do rio Paraíba e como isso vai afetar os parâmetros estudados.

Por fim, é importante que estudos sobre a perspectiva da relação entre o sistema hidrológico e a desertificação continuem em progresso, para que seja possível tornar mais tangível a dimensão da problemática frente a disponibilidade hídrica, um elemento tão importante para a vida e tão escasso em ambientes que sofre com a desertificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLA, F.; AL-BADRANI, L. **Application of rainfall-runoff model to three catchments in Iraq**. Journal des Sciences Hydrologiques. v. 45, n. 1, p. 13-25. 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: [s.n.], 2001. 328 p;
- ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S.; CLARKE, R. T.; REIS JR, D. S. **Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos**. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 16., 2005, João Pessoa.
- ALMEIDA, A. V.; OLIVEIRA, M. A. B. **A História da Estação Ecológica do Tapacurá (São Lourenço da Mata, PE) baseada no relatório de Vasconcelos Sobrinho de 1976**, Recife, p. 61, 2009.
- ALVES, J. J. A., **Biogeografia**. João Pessoa: Fotograf, 2008. 108p.
- ARAÚJO, S.M.S., **A região semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos**. *Rios Eletrônica - Revista Científica da FASETE*, v.5, n. 5, p.88-98. 2011.
- ARCOVA, F.C.S.; LIMA, W.P.; CICCIO, V. **Balanço hídrico de duas microbacias hidrográficas no Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich**, São Paulo. *Revista Instituto Florestal*, São Paulo, v.10, n.1, p.39-51, 1998.
- AUBREVILLE, A. **Climats, forêts et desertification de l'Afrique tropicale**. Paris: Société d'Éditions Géographiques Maritimes et Coloniales, 1949. 351p.
- BARRELLA, W. et al. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes**. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BERNARDES, N. **As caatingas. Estudos avançados**, v. 13, n. 35, p. 69-78, 1999.
- BEST A., ZHANG, L., MCMAHON T., WESTERN, A, VERTESSY R. **A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability**. Australia: Murray Darling Basin Commission, 2003. 56 p.

BLOCH, D. **Resumo e comentário das Políticas nacionais e Internacionais relativas ao tema desertificação**. Recife: AS-PTA, 1999.

BONGANHA, C. A.; GUIGUER Jr, N.; PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. C. de; RIBEIRO, M. L., **Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos**. [SI]: Analytica, 2007.

BRASIL. **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca PANBrasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, 2004.

BRASILEIRO, R. S., **Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação**. Scientia Plena, Sergipe, v. 5, n. 5, 2009.

CCD, 1995 **Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação**, Tradução. Lisboa: Delegação de Portugal; 1995.

CONTI, J. B., **As consequências de uma relação conflituosa Homem x meio: desmatamento e desertificação**. In: A Geografia Física e as relações sociedade/natureza no mundo tropical. São Paulo: USP, 1996. p. 19-22.

CUNHA, L. K. da., **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. 2004. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Paraná. 2001.

DINIZ, L. S.; **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 2008. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

DRUMOND, M. A. (Coord). **Avaliação e identificação de ações prioritária para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga**, Petrolina: [s.n.], 2000. 23 p.

ECKHOLM, E. & BROWN, L. R., **The spreading deserts the shrinking forests**. Nairobi: Focus, 1977.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A., **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1985.

FAYAL, M. A. de A., **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

GOUDIE. A. S., **Desert degradation**. In: Techniques for desert reclamation. John Wiley & Sons. Chichester. 1990.

GUERRA, A. T., **Dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. p. 184.

KHAN, A. S.; CAMPOS, R. T., Efeitos das secas no setor agrícola do Nordeste. In: GOMES, G. M.; SOUZA, H. R. de; MAGALHÃES, A. R. (org.) **Desenvolvimento sustentável no Nordeste**. Brasília, IPEA, 1995. p. 175 – 194.

KIM, U. & KALUARACHCHI, J. J., **Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of Upper Blue Nile River Basin**, Journal of Hydrology, Etiópia, v. 362, p. 39-56, 2008.

LAL, R. **Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability**. Soil & Tillage Research, 27, p.1-8. 1993.

_____. **Erosion research methods**. Soil Manangement Support Services, Thechinal Monograph, n° 21, 1994, 78p.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. de., **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003. 822 p.

LIMA, R.C.C.; CAVALCANTE, A.M.B; PEREZ-MARIN, A.M. (Org.). **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande - PB: Instituto Nacional do Semiárido. 2011. 209 p.

LIMA, W.P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ. USP, 1976.

_____. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 318 p. (Apostila).

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado**. In: Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos, 4, p. 42-62, 1981, Fortaleza.

LOPEZ-BERMUDEZ, F. Desertificación: magnitud del problema y estado actual de las investigaciones. GUTIERREZ, M. & PENA, J. L. (Edit.). **Perspectiva en Geomorfología**. Murcia: Sociedad Española de Geomorfología, 1988, p. 155-169.

MAINGUET, M., **La désertification expression de la décadance?** In: L'Homme et la sécheresse. Paris: Édition Masson, 1995. p. 285-296.

MAKSIMOVIC, C., **General overview of urban drainage principles and practice**. Urban Drainage in Specific Climates (IHPV- Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO, v.1, n.40, p.1-21. 2001.

MARINHO, C. F. C. E., **Caracterização hídrica e morfométrica do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba**. 2011. 67 f. Monografia (Especialização em GeoAmbiência e Recursos Hídricos do Semiárido) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande. 2011.

MATALLO JUNIOR., H. A desertificação no mundo e no Brasil. In: SCHENKEL, C. S. e MATALLO JR, H (Org). **Desertificação**. Brasília: UNESCO, 2003.

MELO, A. S. Tavares de., **Desertificação: Etimologia, Conceitos, Causas e Indicadores**. Revista do UNIPÊ, João Pessoa: UNIPÊ, 2 (2):21-35, 1998.

MIRANDA, F. M., **Índice de susceptibilidade do meio físico a inundações como ferramenta para o planejamento urbano**. 2016. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, F. R., **O fenômeno da desertificação**, Goiânia: UFG, 2013. 240 p.

OLIVEIRA-GALVÃO, A.L.C; SAITO, C.H., **Mapeamento sobre desertificação no Brasil: uma análise comparativa**. Brasil Florestal, v. 22, n.77, p 9-20, 2003.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. de; DIAS, H. C. T.; **Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica.** Revista Árvore, Viçosa, v. 29, n. 1, Janeiro/Fevereiro 2005.

RAPP, A., **A review of desertification in Africa:** water, vegetation and man. Secretariat for International Ecology (SIES), Estocolmo, n 1, p. 77, 1974.

RAUDKIVI, A. J., **Hydrology.** Pergamon Press, 1a Ed., p. 479, 1979.

SANTOS, L. L. **Modelos hidráulicos-hidrológicos:** Conceitos e Aplicações Laércio Leal dos Santos, Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 2, n. 03, set-dez, 2009.

RENNÓ, C. D., **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica:** aplicação a bacias hidrográficas. São José dos Campos: INPE, 2003. 158 p.

ROCHETTE, R.M. **Le Sahel en lutte contre la désertification:** leçons d' expériences. Comité Inter.-États de lutte contre la sécheresse au Sahel, CILSS, Weikersheim, 1989

ROSMAN, P. C. C., **Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental,** 2001.
(Apostila).

ROXO, M. J., **O panorama mundial da desertificação.** Agricultura familiar e Desertificação. João Pessoa, pp.11-32. 2006.

RUBIO, J. L., **Desertification:** Definiciones. Marco Conceptual. In: Seminário Desertificación y Cambio Climático. Centro de Investigaciones sobre Desertificación – CIDE, Universidade Internacional Menendez Pelayo (UIMP), Valencia, 1995. 46p

SÁ, I. B.; RICHÉ, G. R.; FOTIUS, G. A., As paisagens e o processo de degradação do semiárido nordestino. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI M.; FONSECA, M. T.; Lins L. V. (Ed.), **Biodiversidade da caatinga:** áreas e ações prioritárias para a conservação, Brasília, p. 17-36. 2004.

SALDANHA, J. C. S., **Análise da influência do rio Santa Maria da Vitória na baía de Vitória, através da modelagem computacional:** Uma contribuição ao processo de enquadramento. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2007.

SALES, M. C. L., **Evolução dos estudos de desertificação no Nordeste brasileiro.** Geosp, Espaço e Tempo. São Paulo. n°11. p. 115-126. 2002.

SILVA, L. P. E., **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVEIRA, A. L. L., **Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica**. In TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora Universitária/ Edusp / ABRH, 1997.

SODRÉ, U., **Modelos matemáticos**. UEL. Londrina. 2007.

SOUZA, B. I., **Cariri paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUZA, B. I.; QUEIROZ, R. T.; CARDOSO, E. C. M., **Degradação e riscos à desertificação no alto curso do rio paraíba – PB/Brasil**, Revista da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia, v. 11, n. 16, p. 201-222, jul-dez. 2015.

STEWART, J.B.; FINCH, J.W. **Application of remote sensing to forest hydrology**. J. Hydrology, 150:701-716, 1993.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhães, MG**. 2005. 85 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós- Graduação em Ciência Floresta, Viçosa, MG, 2005.

TRAVASSOS, I. S., **Solos e desertificação no sertão paraibano**, Cadernos do Logepa, v. 6, n. 2, 2011.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Cap. 4, p. 154, 156 – 169. Cap. 15, p. 573 – 617. 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L.F.; Infiltração e armazenamento no solo: In: Tucci, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 2ª Ed., Porto Alegre: Editora Universidade, p.335-372, 2000.

TUCCI, C. E. M.; **Modelos hidrológicos**. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2ª edição. Porto Alegre, Editora da UFRGS.2005

_____. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação (4^a ed.). Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.