



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– DOUTORADO –**

**EFEITO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS E DE USO E COBERTURA
DA TERRA FUTUROS NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS: O CASO DA BACIA DO RIO
TAPEROÁ – ESTADO DA PARAIBA**

Por

Leonardo Pereira e Silva

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2019



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– DOUTORADO –**

**EFEITO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS E DE USO E COBERTURA
DA TERRA FUTUROS NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS: O CASO DA BACIA DO RIO
TAPEROÁ – ESTADO DA PARAIBA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Leonardo Pereira e Silva

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586e Silva, Leonardo Pereira e.

Efeito de cenários climáticos e de uso e cobertura da terra futuros nos processos hidrossedimentológicos : o caso da bacia do Rio Taperoá - Estado da Paraíba / Leonardo Pereira e Silva. - João Pessoa, 2019.
110 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.
Coorientação: Richarde Marques da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Cenários climáticos futuros. 2. Processos hidrossedimentológicos. 3. Uso do solo. 4. Caatinga. I. Santos, Celso Augusto Guimarães. II. Silva, Richarde Marques da. III. Título.

UFPB/BC

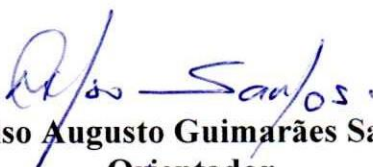
CDU 551.58(043)

**EFEITO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS E DE USO E COBERTURA
DA TERRA FUTUROS NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS: O CASO DA BACIA DO RIO
TAPEROÁ – ESTADO DA PARAIBA**

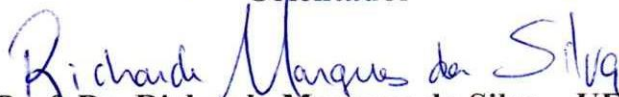
LEONARDO PEREIRA E SILVA

Tese aprovada em 27 de setembro de 2019

Período Letivo: 2019.2



Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
Orientador



Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB
Coorientador



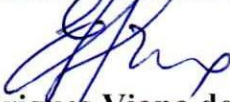
Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. José Yure Gomes dos Santos – UFRN
Examinador Externo



Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima – PPGG/UFPB
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2019

Dedico a minha família e em especial ao meu pais, José Maia e Silva (in memoriam), pela grande contribuição: A minha existência, e pela dedicação, amor e confiança que sempre depositaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro a Deus, guia de luz e orientador do meu caminhar e das minhas conquistas e não desanimar com as dificuldades, e fazer com que seguiste em frente com os meus objetivos.

Aos meus pais José Maia e Silva (*in memoriam*), Ivonete e ao meu irmão Luciano, pela credibilidade, esperança depositada em mim, pelo carinho e incentivo durante estes mais de quatro anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGECAM/CT/UFPB, como a secretária Sara, e em particular a Secretaria da Pós-Graduação Miriam de Moura Costa Rodrigues.

A todos os professores do PPGECAM, pela oportunidade de realização deste curso e pelas contribuições imensuráveis ao meu aprendizado.

Em especial ao meu orientador Professor Celso Augusto Guimarães Santos por ter confiado em mim, por toda atenção, paciência e ajuda durante todo o curso e disciplinas.

Ao meu amigo e co-orientador, o Professor Richarde Marques da Silva (UFPB), pelo incentivo em todo momento e pelas discussões valiosas sobre hidrologia e modelagem hidrológica e aspectos metodológicos.

Aos professores Victor Hugo Rabelo Coelho (UFPB), Tarciso Cabral da Silva (UFPB), José Yure Gomes dos Santos (UFRN) e Eduardo Rodrigues Viana de Lima (UFPB), pelas valiosas colaborações e por suas disponibilidades e presenças como membros da banca.

Ao professor Eduardo Rodrigues Viana de Lima do departamento de geociências (UFPB) pelas contribuições acerca do sensoriamento remoto e sobre o índice estatístico Kappa.

Aos meus colegas do laboratório LEPPAN (Laboratório de Ensino, Pesquisa e Projetos em Análise Espacial), Franklin Linhares, Jorge Flávio Casé, João Filadelfo e José Carlos que de alguma maneira contribuíram para a melhora do trabalho e pela convivência afetiva que pude desfrutar.

Agradeço a todos os meus colegas do doutorado, alguns conheço desde mestrado, que vivenciaram momentos de estudo nas disciplinas, na escrita de artigo, bem como na prova de proficiência, na qualificação e em toda a jornada.

Em especial a colega Ana Paula Xavier Dantas (PPGECAM/CT/UFPB), pelas discussões sobre o LCM e pela parceria em produção de artigos, e ao amigo Alexandro Medeiros Silva (PPGG/CCEN/UFPB) pelos vários debates e discussões sobre o modelo SWAT, manipulação de dados, bem como a ajuda na publicação de artigos.

Enfim, a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

MEU MUITO OBRIGADO!!

*“Guarda-me, ó Senhor, das mãos dos ímpios;
preserva-me dos homens violentos, os quais
planejaram transtornar os meus passos. “*

*“Os soberbos armaram-me laços e cordas;
estenderam uma rede à beira do caminho;
puseram-me armadilhas.”*

*“Eu disse, ao Senhor: Tu és o meu Deus; dá
ouvidos, ó Senhor, à voz das minhas súplicas.”*

Salmo 140

RESUMO

As ações antrópicas sobre a cobertura da terra e a variabilidade climática são os fatores controladores do meio ambiente, esses fatores são ainda mais impactantes na região semiárida do Brasil que se caracteriza pela alta variabilidade espaço-temporal da precipitação e valores elevados de evapotranspiração. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência de cenários climáticos futuros pessimista e otimista nos processos hidrossedimentológicos para a bacia do Rio Taperoá no período entre 2046 e 2064. Inicialmente, o estudo identificou as mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá nos anos de 1990, 1999 e 2002, e em seguida estimou a cobertura da terra para o ano de 2060 usando o modelo LCM através do algoritmo de modelagem dinâmica RNMLP. Os cenários climáticos futuros pessimista e otimista foram estimados usando os modelos atmosféricos de circulação global CNRM-CM3 e MIROC3.2. O estudo também realizou uma modelagem hidrossedimentológica para estimar a vazão e a produção de sedimentos futuros usando o modelo SWAT e a cobertura da terra futura baseada em RNMLP. As principais alterações no uso e cobertura da terra de 2002 quando comparado com o ano de 1990 foi a diminuição da classe vegetação arbórea arbustiva para vegetação arbustiva, esse comportamento foi observado principalmente na porção leste da bacia. A modelagem dinâmica usando o RNMLP mostrou resultados satisfatórios para a bacia do Rio Taperoá com acurácia de 89,69% e índice Kappa de 0,61. O cenário previsto para 2060 apresentou um aumento da área ocupada pela classe vegetação arbustiva herbácea (38%) e diminuição da classe vegetação arbórea arbustiva (2,95%). Os resultados de vazão obtidos para calibração e validação mostram que o SWAT superestimou a vazão média observada, entretanto apresentou resultados satisfatório de R^2 e Nash de 0,85 e 0,82 para a calibração e 0,90 e -0,02 para a validação, respectivamente. Os resultados apresentados mostraram uma grande variabilidade da produção de sedimentos estimada pelos modelos climáticos. Os resultados apresentaram que o modelo CNRM-CM3 no cenário pessimista estimou em 22,74 ton/ha/ano, enquanto o modelo MIROC3.2 no cenário pessimista, a produção de sedimentos foi de 5,36 ton/ha/ano. Assim, pode-se concluir que a escolha do modelo escolhido somado as incertezas no uso e cobertura da terra influenciam bastante nos resultados da vazão e produção de sedimentos na região.

Palavras-chave: Cenários climáticos futuros, Processos hidrossedimentológicos, LCM, Land use, Caatinga

ABSTRACT

Anthropogenic actions on land cover and climate variability are the controlling factors of the environment, these factors are even more impacting in the semi-arid region of Brazil, which is characterized by high spatial-temporal variability of precipitation and high values of evapotranspiration. This study aimed to analyze the influence of pessimistic and optimistic future climate scenarios on hydrosedimentological processes for the Taperoá River basin in the period between 2046 and 2064. Initially, the study identified changes in land use and cover in the Taperoá River basin. in the years 1990, 1999 and 2002, and then estimated the land cover for the year 2060 using the LCM model through the RNMLP dynamic modeling algorithm. The pessimistic and optimistic future climate scenarios were estimated using atmospheric global circulation models CNRM-CM3 and MIROC3.2. The study also performed hydrosedimentological modeling to estimate the flow and production of future sediments using the SWAT model and future land cover based on RNMLP. The main changes in land use and land cover in 2002 when compared to 1990 was the decrease in the class of arboreal shrubby vegetation to shrubby vegetation, this behavior was observed mainly in the eastern portion of the basin. Dynamic modeling using the RNMLP showed satisfactory results for the Taperoá River basin with an accuracy of 89.69% and a Kappa index of 0.61. The scenario foreseen for 2060 showed an increase in the area occupied by the herbaceous shrub vegetation class (38%) and a decrease in the shrubby arboreal vegetation class (2.95%). The flow results obtained for calibration and validation show that the SWAT overestimated the average flow observed, however it presented satisfactory results of R^2 and Nash of 0.85 and 0.82 for the calibration and 0.90 and -0.02 for the validation, respectively. The results presented showed a great variability of sediment production estimated by climate models. The results showed that the CNRM-CM3 model in the pessimistic scenario estimated at 22.74 ton/ha/year, while the MIROC3.2 model in the pessimistic scenario, the sediment production was 5.36 ton/ha/year. Thus, it can be concluded that the choice of the chosen model, added to the uncertainties in land use and cover, greatly influence the results of flow and sediment production in the region.

Keywords: Future climate scenarios, Runofferosion processes, LCM, Land use, Caatinga

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. HIPÓTESE	20
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	21
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1. COBERTURA DA TERRA E SEUS IMPACTOS	22
2.2. PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS	23
2.3. MODELAGEM DA COBERTURA DA TERRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	25
2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS	28
2.5. GEOPROCESSAMENTO	31
2.6. CENÁRIOS CLIMÁTICOS DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)	33
2.7. IMPACTO DE DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS NA VAZÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	37
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	39
3.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPEROÁ	39
3.2 CLIMA	40
3.3 RELEVO	40
3.4 VEGETAÇÃO	41
3.5 SOLOS	41
3.6 GEOLOGIA	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 CONCEPÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	43
4.2 DADOS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS	44
4.3 O MODELO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO SWAT	46
4.4 BANCO DE DADOS UTILIZADO NA MODELAGEM	49

4.4.1	<i>Declividade</i>	51
4.4.2	<i>Discretização da bacia</i>	52
4.4.3	<i>Geração das unidades de resposta hidrológica</i>	53
4.4.4	<i>Tipos de solo da bacia</i>	54
4.4.5	<i>Cobertura da terra na bacia</i>	55
4.5	DESCRIÇÃO DOS MODELOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS UTILIZADOS	59
4.6	MÉTODO DE <i>Downscaling</i> E CORREÇÃO DE VIÉS (BIAS)	60
4.7	COBERTURA DA TERRA ESTIMADA PARA 2060	61
4.8	MODELAGEM DA COBERTURA DA TERRA FUTURO NA BACIA DO RIO TAPEROÁ.....	63
4.9	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS DO MODELO SWAT	64
4.10	ÍNDICES DE DESEMPENHO UTILIZADOS NA MODELAGEM	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	EVOLUÇÃO DA COBERTURA DA TERRA NA BACIA DO RIO TAPEROÁ ENTRE 1980 E 2002	67
5.2	MODELAGEM DOS CENÁRIOS FUTUROS DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.....	74
5.3	MODELAGEM DOS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT.....	80
5.4	EFEITOS DA FONTE DE DADOS DO <i>Downscaling</i> DA PRECIPITAÇÃO	84
5.5	EFEITOS DA FONTE DE DADOS SOBRE A VAZÃO E A PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS ENTRE 2046–2064	85
6.	CONCLUSÕES	95
7.	RECOMENDAÇÕES	97
	REFERÊNCIAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma dos cenários apresentados no SRES.....	34
Figura 2 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Taperoá no Brasil.....	39
Figura 3 - Procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa.	43
Figura 4 - Localização geográfica dos postos pluviométricos e fluviométrico utilizados neste estudo.	46
Figura 5 – Mapa de declividades da bacia do Rio Taperoá.....	52
Figura 6 - Discretização da bacia do Rio Taperoá em sub-bacias.....	53
Figura 7 - Tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Taperoá.	55
Figura 8 - Área amostral para testar a concordância entre as imagens classificadas e a amostra conhecida para imagens dos anos 1980, 1990, 1999, e 2002.	59
Figura 9 - Fluxograma da metodologia utilizada para estimar os usos do solo no LCM....	62
Figura 10 - Classes de uso e uso e cobertura da terra da bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980.	68
Figura 11 - Classes de uso e cobertura da terra bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990. 69	
Figura 12 - Classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999.	70
Figura 13 - Classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.	72
Figura 14 - Classes estimadas de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.....	74
Figura 15 - Classes estimadas de uso e cobertura da terra previstas para a bacia do Rio Taperoá para o ano 2060.	75
Figura 16 - ROC para avaliação da previsão de uso e cobertura da terra em 2002 com base na rede neural artificial na bacia do Rio Taperoá.	78
Figura 17 - Curvas AUC e TOC para avaliação da previsão de uso e cobertura da terra em 2002 com base na rede neural artificial na bacia do Rio Taperoá.	79
Figura 18 - Validação do uso e cobertura da terra para o ano de 2002.	80
Figura 19 - Precipitação média anual na bacia do Rio Taperoá no período entre 1970 e 1990.	81
Figura 20 - Precipitação total mensal na bacia do Rio Taperoá no período de 1970 a 1990.	81

Figura 21- Comparação dos fluxos mensais simulado e observado para o posto de Poço de Pedras.	82
Figura 22 - Precipitações anuais normalizadas para a bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990.	85
Figura 23 - Comparação dos valores simulados da vazão mensal e produção de sedimentos simulado para o posto Poço de Pedras usando o modelo MIROC3.2	86
Figura 24 - Comparação dos valores simulados da vazão mensal e produção de sedimentos simulado para o posto Poço de Pedras usando o modelo CNRM-CM3.....	87
Figura 25 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulada entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário pessimista.....	89
Figura 26 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulada entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário otimista.	90
Figura 27 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário normal.	91
Figura 28 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo o CNRM-CM3, cenário Pessimista.	92
Figura 29 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo CNRM-CM3 no cenário otimista.	93
Figura 30 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo CNRM-CM3 cenário normal.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Projeção do aquecimento médio global da superfície terrestre para o período de 2046–2064, em relação à temperatura observada em 1980–1999 nos diferentes cenários	36
Tabela 2 - Informações dos postos pluviométricos utilizados neste estudo	44
Tabela 3 - Informações do posto fluviométrico utilizado neste estudo	45
Tabela 4 - Estações meteorológicas utilizadas neste estudo.....	49
Tabela 5 - Parâmetros climatológicos obtidos para a estação de Monteiro.....	50
Tabela 6 - Parâmetros climatológicos obtidos para a estação de Patos	50
Tabela 7 - Classes de declividades existentes na bacia	51
Tabela 8 - Tipos e informações básicas dos solos existentes na bacia do Rio Taperoá	54
Tabela 9 - Informações sobre as imagens utilizadas na classificação do uso e cobertura da terra.....	56
Tabela 10 - Descrição das classes cobertura da terra utilizadas neste estudo	57
Tabela 11 - Modelos climáticos globais utilizados neste estudo.....	60
Tabela 12 - Resultado do teste V de Cramer para as variáveis explanatórias testadas na modelagem do uso e cobertura da terra para a bacia do Rio Taperoá.	63
Tabela 13 - Parâmetros adotados pelo modelo SWAT na simulação de vazão.	65
Tabela 14 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980.....	68
Tabela 15 - Área classificada e a porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990.	69
Tabela 16 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999.	71
Tabela 17 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.	72
Tabela 18 - Uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá nos anos de 1980 a 2002... ..	73
Tabela 19 - Matriz de confusão para a previsão de cobertura da terra em 2002	76
Tabela 20 - Erros de omissão e comissão obtidos pela verificação das imagens classificadas	76

Tabela 21 - Comparação entre as classes de uso e cobertura da terra classificada para o ano de 2002 e a estimada para 2060.....	77
Tabela 22 - Resultados dos testes estatísticos dos períodos de calibração e validação do modelo levando em consideração a vazão e a produção de sedimentos do posto Poço de Pedras.....	82
Tabela 23 - Dados de estatísticos de vazão e produção de sedimento para a bacia 2049 a 2064	88

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

ANA - Agência Nacional das Águas

AUC - Area Under the Curve

CNRM - Centre National de Recherches Météorologiques

CUP - Calibration and Uncertainty Programs

ECHAM - Atmospheric general circulation model

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MCG - General Circulation Model

HRU - Hydrologic Response Unit

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

LCM - Land Change Modeler

MDE - Modelo Digital de elevação

MIROC - Model for Interdisciplinary Research on Climate

MLP - Multilayer Perceptron

MUSLE - Modified Universal Solil Loss Equation

RCP - Representative Concentration Pathways

ROC - Receiver operating characteristic

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPRING - Sistema de Processamento de Informação Georreferenciada

SRES - Special Report on Emissions Scenarios

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SWAT - Soil and Water Assessment Tool model

TOC -Total operating characteristic

USLE - Universal Solil Loss Equation

UTM - Universal Transversa de Mercator

1. INTRODUÇÃO

As ações antrópicas sobre o uso e cobertura da terra e a variabilidade climática são os fatores determinadores do meio ambiente, principalmente, no que tange a disponibilidade de água. Esses fatores são ainda mais impactantes na região semiárida do Brasil que se caracteriza pela alta variabilidade espaço-temporal da precipitação e valores elevados de evapotranspiração. Somado a essas características, essa região é a mais populosa do planeta com essa condição climática, o que torna as alterações no regime pluviométrico um importante desafio para os órgãos governamentais e a sociedade civil a convivência com a problemática do déficit hídrico em grande parte da região semiárida (TOMASELLA et al., 2018). Nesse sentido, torna-se imprescindível estudar as mudanças no uso e cobertura da terra e os impactos futuros do clima na vazão e produção de sedimentos no semiárido do Nordeste do Brasil.

O semiárido do Brasil é uma região que possui baixa precipitação e uma alta taxa de evapotranspiração como características, resultando em escassez de água para o consumo humano, animal e vegetal (BRITO et al., 2017). Na região semiárida do Nordeste do Brasil, as principais atividades econômicas são a agricultura familiar e a pecuária extensiva de cabras e bovinos. Outra importante atividade é a extração de madeira, que contribui para o desmatamento, diminuindo a capacidade de resiliência do uso e cobertura da terra da região e aumentando as áreas susceptíveis a erosão dos solos (SILVA et al., 2018a).

A precipitação na região semiárida brasileira apresenta variabilidade em todas as escalas de tempo, a partir das escalas anual, multidecadal e sazonal, pois as regiões semiáridas apresentam alta variabilidade espacial e temporal da precipitação (TORRES et al., 2017). Em algumas dessas escalas, a variabilidade climática é devido à natureza intrinsecamente aleatória dos processos ou devido a numerosas e complexas causas que dificultam a previsão, portanto a hipótese da estacionariedade climática não é mais aceita pela comunidade científica, dada a abundante evidência de que as atividades humanas contribuíram para mudanças climáticas locais e regionais (MARENGO et al., 2017b; SRINIVASAN e PAIVA, 2009). No entanto, mais especificamente, a qualidade da previsão climática futura para o semiárido do Nordeste do Brasil é considerada satisfatória com base em estudos realizados anteriormente (GALVÃO et al., 2005; MARENGO e BERNASCONI, 2014).

Historicamente, o semiárido brasileiro tem vivido dois extremos de eventos climáticos, secas recorrentes e eventos extremos de cheias casuais no seu passado recente, que têm se agravado ainda mais nas últimas décadas (MARENGO et al., 2017a). Uma alternativa para antever os impactos causados pelas mudanças do clima no uso e cobertura da terra é o acoplamento unidirecional entre modelos de previsão climática e modelos hidrológicos, que permitem estimar o comportamento futuro dos processos de vazão e produção de sedimentos. Deve-se destacar ainda que, previsões precisam de precipitação ao longo de vários meses e ainda são um desafio para modelos climáticos e hidrológicos dinâmicos para a região Nordeste (PILZ et al., 2018).

A previsão climática para grande parte da região semiárida do Brasil é complexa porque existem vários fatores controladores que dificultam a previsibilidade do clima nessa região. Somado a essa complexa característica, estudos recentes mostram um decréscimo das vazões nessa região na última década (CARVALHO et al., 2017), e o aumento na produção de sedimentos para eventos extremos de chuvas (SILVA et al., 2018b).

Existem muitos métodos para observar o efeito das mudanças na cobertura da terra sobre o fluxo e o rendimento de sedimentos incluem análise de dados históricos, dados de métodos e da modelagem hidrológica (GHUZA et al., 2018). Em geral, os modelos numéricos são comumente usados para simulação hidrológica, ou seja, são ferramentas eficazes mesmo sob condições variáveis (XU et al., 2013). A maioria das pesquisas na década passada não usaram modelos hidrológicos distribuídos, e apenas focalizaram as influências das mudanças da cobertura da terra na vazão, além dos diferentes efeitos da variabilidade climática (BRAGA et al., 2007). Segundo Pilz et al. (2018) há uma alta correlação de chuva e seca com anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico oriental e Atlântico tropical para o semiárido setentrional, porque juntos a correlação de chuvas pré-temporada oferece um cenário favorável para a previsão sazonal (SOUZA FILHO e LALL, 2003; HASTENRATH, 2012).

Atualmente, diversos estudos vêm aplicando modelos hidrológicos sob cenários climáticos futuros (TANG et al., 2011; SAHARIA e SARMA, 2018; JOSEPH et al., 2018; STEPHENS et al., 2018; ZHENG et al., 2018), impactos na produção agrícola (Pires et al., 2016), e na economia (MOHOR e MENDIONDO, 2017). Entretanto, ainda são escassos os estudos de previsão hidrossedimentológica utilizando cenários futuros para a porção leste

do semiárido do Brasil utilizando modelos para grandes bacias hidrográficas, como o *Soil and Water Assessment Tool model* (SWAT), devido às incertezas na modelagem espacial da cobertura da terra nessa porção do planeta (CLARK et al., 2016).

No entanto, esses estudos enfocaram apenas a influência do uso e cobertura da terra e a variação climática no fluxo. Nesse sentido, este trabalho tem o objetivo de estimar o comportamento dos processos hidrossedimentológicos sob diferentes cenários climáticos para 2060 na bacia do Rio Taperoá, localizada na porção leste do Nordeste do Brasil. Somado a esse fato um dos grandes desafios é a identificação de áreas propensas à erosão do solo (PIMENTEL, 2006), sobretudo em uma região semiárida, como é o caso da bacia do Rio Taperoá¹. Pois, a mesma vem sofrendo ainda mais com o processo de desertificação que causa consequências para o meio ambiente e a população das regiões afetadas, como a migração de pessoas, a redução de produção de alimentos, aumento da pobreza e instabilidade social.

Essa situação social vem ocorrendo em diversas partes do Nordeste do Brasil, e este estudo focalizou como estudo de caso, a bacia hidrográfica do Rio Taperoá, em virtude de sua importância estratégica para o gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraíba, que abastece o reservatório de Boqueirão, a principal obra hídrica que abastece diversas cidades da Paraíba, e, entre elas, Campina Grande.

A bacia do Rio Taperoá vem sofrendo com processos de mau uso do solo que ocorrem de longas épocas, com reflexos na degradação dos seus recursos naturais e dependendo da forma de uso e intensidade de como está sendo usado, pode vir a comprometer o clima no futuro para as próximas gerações, causando: (a) assoreamento dos cursos d'água, com prejuízos para a saúde humana e animal, (b) menor disponibilidade de água para irrigação e para abastecimento, (c) redução da produtividade agrícola, (d) diminuição da renda líquida dos agricultores, e (e) empobrecimento do meio rural (MANZATTO et al., 1998; FRANCISCO, 2010).

Dos processos citados anteriormente, os que envolvem a erosão em bacias de região semiáridas são considerados graves problemas que são influenciados pelas mudanças climáticas e pela forma de uso e ocupação do solo. Essa problemática é ainda

¹ Também conhecido como Rio Paraíba do Norte. Esse rio cruza todo o Estado da Paraíba, sendo um dos mais importantes para o estado da Paraíba, devido a sua extensão e devido a sua importância econômica que se traduz em abastecimento de água para as populações, para a irrigação e para a pesca. O Rio Paraíba do Norte se configura, em alguns locais, com parte de seu leito como intermitente, o que o faz desaparecer em épocas de seca, embora a partir de seu médio curso seja sempre perenizado. Deve destacar ainda que recentemente vem recebendo águas da Transposição do Rio São Francisco.

mais sentida quando influenciada pelas mudanças climáticas, que constituem um dos maiores desafios da humanidade no futuro próximo.

Vários trabalhos apontam que o desequilíbrio ambiental da região semiárida brasileira tem como fator determinante a maneira de como o uso do solo está sendo usado e gerido de uma maneira em geral, tendo um manejo irracional das terras pela agricultura, seja elas com ou sem irrigação, e outras formas de ocupação desordenadas que se traduz em mau uso do solo (SAMPAIO et al., 2003). Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo central analisar a influência de cenários climáticos futuros pessimista e otimista de precipitação para a bacia do Rio Taperoá.

1.1. Hipótese

Os estudos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) indicam que as regiões áridas e semiáridas são mais expostas aos impactos das mudanças no clima e devem sofrer com a disponibilidade de água devido a diminuição das chuvas nas próximas décadas. Face ao exposto, esta pesquisa se baseia na hipótese de que, mesmo em cenário climático otimista haverá escassez (diminuição) de água na bacia do Rio Taperoá e aumento da produção de sedimentos entre os anos de 2046 e 2064.

1.2.Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da variabilidade de cenários climáticos futuros e do uso e cobertura da terra nos processos hidrossedimentológicos da bacia do Rio Taperoá no período entre 2046 e 2064.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e da vazão na bacia do Rio Taperoá para os períodos de 1970–1990 e 2046–2064.
- Simular as mudanças futuras no uso e cobertura da terra da bacia do Rio Taperoá para o ano de 2060.
- Estimar as vazões com base nos cenários climáticos futuros otimista e pessimista para a bacia do Rio Taperoá entre os anos 2046 e 2064.
- Estimar a produção de sedimentos com base nos cenários climáticos futuros otimista e pessimista para a bacia do Rio Taperoá entre os anos 2046 e 2064.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cobertura da Terra e Seus Impactos

Na legislação brasileira, a bacia hidrográfica é a unidade física adotada para o gerenciamento dos recursos hídricos que constitui um princípio básico para a implementação da gestão dos recursos hídricos, sendo que tal denominação também é utilizada mundialmente (GARCIA, 2014).

A bacia hidrográfica, dentro de uma visão integrada, deve ser a unidade de caracterização, diagnóstico, planejamento e gestão ambiental, com vistas ao desenvolvimento regional sustentável, pois os impactos ambientais podem ser mensurados e corrigidos mais facilmente. Assim, a água vem a ser um elemento integrador dos fenômenos físicos ocorridos na bacia (GARCIA, 2014).

O gerenciamento do uso do solo vem tornando uma importante necessidade para as comunidades que vivem nas bacias hidrográficas. Estudos científicos recomendam o desenvolvimento sustentável de bacias hidrográficas, que é fomentado no aproveitamento racional dos recursos com mínimo dano ao ambiente (BOTELHO, 1999).

Segundo Campos (1997), o planejamento dessas áreas como os de atividades agrícolas, desmatamento para pecuária e moradia vem sendo desenvolvidos de forma que o uso do solo seja aproveitado de maneira racional visando proteger sua capacidade produtiva e que seja eficaz.

Seabra et al. (2014) realizaram mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá, e na sua análise espacializaram às ocorrências de áreas cobertas por caatinga, utilizando as ferramentas do SIG e assim foi possível fazer uma compreensão da organização espacial dos usos e coberturas da terra presentes na bacia.

O uso e ocupação do solo realizado de uma forma inapropriada tem acarretado diversos problemas ambientais, como o aumento da erosão hídrica em bacias hidrográficas. A ocupação desordenada do espaço pode causar prejuízos para o solo, vegetação, ciclo hidrológico e trazer enormes consequências para a população local (SANTOS, 2009). Assim, ações antrópicas visando o planejamento e controle da ocupação do solo requerem cada vez mais uma visão sistêmica ampliada sobre as necessidades da comunidade envolvida em bacias hidrográficas, principalmente devido as mudanças climáticas. Como a região Nordeste do Brasil é uma das regiões semiáridas mais populosas do planeta, estudos

e ações que busquem entender a influência dos impactos da variabilidade climática nos processos hidrossedimentológicos é de suma importância para os recursos hídricos, no tocante a quantidade e qualidade das águas presentes na região semiárida. Essas circunstâncias ambientais inadequadas reduzem as condições da qualidade de vida da população, causando impactos ambientais e são as principais limitações ao desenvolvimento dessas áreas (TUCCI, 2005).

Essa forma de uso do solo atual não teria problema se este crescimento não estivesse acontecendo em sua maioria de forma desordenada colocando em risco importantes fontes de recursos naturais como a água, por exemplo (SILVA, 2007). Souza et al. (2009) identificaram o processo de desertificação no Cariri, associando os tipos de degradação ao uso da terra, e nos advertem que o Cariri exige repensar, e que as questões naturais, sociais, culturais, políticas e produtivas estão intrinsecamente relacionadas.

Assim se faz necessário, aliada ao planejamento do uso do solo, a gestão dos recursos hídricos, que vem sendo um fator unificador, pois as ações a serem desencadeadas nesses processos não ficam mais atreladas como unidades administrativas. O manejo integrado de bacias hidrográficas no semiárido deve preceder de diagnósticos socioeconômico, ambiental, de vegetação, de solo, para ter um maior entendimento nos processos Hidrossedimentológicos (ROCHA e KURTS, 2001).

2.2. Processos Hidrossedimentológicos

Um dos principais problemas relacionados ao mau uso e ocupação do solo é a erosão, que se torna um grande problema em bacias hidrográficas, onde a cada ano milhões de toneladas de solo são erodidos causando graves consequências para as comunidades que vivem nessas bacias (SILVA, 2007).

A erosão é um relevante problema ambiental que afeta diretamente a sociedade, reduzindo a capacidade dos mananciais que sevem como reservatórios, aumentando o transporte de poluentes agregados às partículas de sedimentos (ARAÚJO e KNIGHT, 2005). De acordo com Simões et al. (2003), erosão é o processo de desgaste ou arraste da superfície da terra pela ação de água corrente, eólica, glacial ou de outros agentes geológicos e arrasto gravitacional.

Dentre as diversas formas de erosão, aquela causada pela ação da água é a que mais afeta as bacias. A erosão hídrica pode ser dividida em erosão laminar, que é a

remoção de uma camada fina e relativamente uniforme de solo por chuva e escoamento superficial, essa a erosão linear que ocorre formando canais de frequência e dimensões variadas. De acordo com as características da precipitação, é influenciada pela rugosidade superficial, comprimento da rampa, declive e cobertura do solo.

E ainda os rios e córregos, sendo muitas vezes responsáveis pelo aprofundamento e ampliação dos leitos dos rios. Assim, conforme sejam os fatores atuantes, a intensidade e a velocidade da vazão e subsuperficial, e esses processos erosivos podem gerar diversas formas de erosão.

Para Nolla (1982), outro processo de fundamental importância para a intensificação da erosão é o *splash* ou erosão por salpicamento, que é promovido pelo impacto das gotas da chuva sobre o solo. Esse processo promove o rompimento e desagregação do solo, até mesmo as partículas mais resistentes do solo, para o transporte das águas. Esse processo causa a selagem da camada superficial do solo devido ao preenchimento dos poros do solo. Nesse sentido, o controle da erosão hídrica deve ser realizado de forma que exista um plano de uso, manejo e conservação em nível de bacia hidrográfica, considerando os diversos fatores que interferem na erosão.

Assim, se faz necessário a utilização de ferramentas que possam simular e quantificar os processos ambientais na bacia. Um tipo de ferramenta seriam os modelos hidrológicos, os quais estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas, pois a falta de atenção dada aos fatores condicionantes da erosão gera em bacias e em todas esferas do ecossistema prejuízos e conseqüentemente a diminuição de investimentos nas regiões afetadas, principalmente em áreas como a do cariri paraibano.

Magalhães et al. (2018) utilizaram o modelo hidrológico SWAT para análise de processos hidrológicos na Bacia Experimental do Córrego Jatobá, em um cenário de recomposição de Caatinga, e o estudo mostrou que a expansão agrícola provocou aumento na vazão e um aumento na umidade do solo.

Os prejuízos, do ponto de vista da produção de sedimentos em bacias hidrográficas responsáveis pelo abastecimento de água humana, são as mais diversificadas possível, portanto, contribuem para a degradação ambiental, uma vez que podem levar à redução da qualidade de água e animais e plantas, a presença de pesticidas em espécies de sedimentos, assoreamento, com relação a água pode-se citar as inundações causadas por

alterações dos órgãos reguladores de vazão com regime de fluxo e uso do solo impróprio (GUERRA, 2005).

Da Silva et al. (2016) simularam diferentes cenários de uso do solo na porção da bacia do Rio São Francisco utilizando o modelo SWAT para analisar os efeitos de mudanças na produção de sedimentos, fazendo comparações com o atual uso da terra. Silva E Medeiros (2014) aplicaram o mesmo modelo para escala de microbacia com eventos extremos em vegetação do tipo caatinga.

Desde os anos 1960, com o surgimento do modelo de Stanford, diferentes modelos têm sido amplamente utilizados, sempre com o objetivo de investigar os problemas relacionados aos recursos hídricos, sempre utilizando as bacias hidrográficas como unidade espacial chave para descrever os vários componentes do ciclo hidrológico com variações, tanto temporal e espacial (MILLER et al., 2007).

O monitoramento e modelagem são necessários para estudos hidrológicos com foco na gestão de bacias hidrográficas. Tucci (1998) explica que um modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entender e buscar suas respostas para diferentes entradas.

2.3. Modelagem da Cobertura da Terra e Mudanças Climáticas

Segundo o IPCC (2007), mudança climática se refere a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devido à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Hoje, por meio de modelos matemáticos, é possível simular o clima futuro em nível global e regional, de maneira que os modelos climáticos descrevem os processos físicos e dinâmicos do clima e as interações entre os componentes do sistema climático e os processos físicos de uma bacia.

Pacheco e Hewitt (2014) aplicaram dois métodos baseados em redes neurais artificiais para modelar a mudança de uso da terra na região de Madri, na Espanha. A partir de imagens de satélites foi realizada a validação da predição, observando-se que apesar dos dois métodos conterem o mesmo algoritmo, podem produzir resultados dissimilares, todavia são excelentes para localizar padrões de comportamento.

Estudos sobre a integração entre um SIG e modelos hidrossedimentológicos com dados advindo de modelos globais e regionais em escala de bacias representativa e experimental vêm sendo realizados em várias partes do mundo, e recentemente, cresceu o

interesse para a realização de estudos nesta linha de pesquisa. Estudos sobre o acoplamento entre a produção de sedimentos e os SIG constituem uma importante área de conhecimento, pois permitem em uma análise mais específica e abrangente, que servem como base para a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Megahed et al. (2015) modelaram o crescimento urbano da cidade do Cairo, no Egito, analisando os padrões de crescimento urbano e espacial mediante métricas estatísticas e redes neurais. Os resultados indicaram que 14% da vegetação e 4% do deserto em 2014 serão alterados para áreas urbanizadas no ano de 2025.

Vega et al. (2017) analisaram as mudanças em dois parques na Espanha, levando em consideração os cenários de continuação das alterações e outro otimista (com regeneração do uso e cobertura da terra), ambos para o ano de 2030. Levando em consideração as consequências do aumento da ação antrópica na interface urbano-florestal, maior risco de incêndios florestais e aumento na fragmentação dos habitats naturais.

A região semiárida do nordeste do Brasil se apresenta como uma das regiões mais vulneráveis as mudanças climáticas no país. O semiárido brasileiro apresenta níveis de precipitação relativamente elevados que variam entre 400 mm a 800 mm por ano, mal distribuídas e esse fator limita fortemente as atividades agrícolas e o abastecimento humano, pois além dessa regularidade da precipitação ser insuficiente ou pouco confiável, e concentrada em poucos meses, a evapotranspiração também são bem elevadas (CIRILO, 2009).

Para entender esses fenômenos no Nordeste do Brasil, os pesquisadores enfocam o efeito da variabilidade climática e mudanças na cobertura da terra na hidrologia de bacias hidrográficas usando cenários climáticos.

Estudos sobre o assunto indicam que já é uma realidade o déficit hídrico e há uma possibilidade de um agravamento em eventos extremos futuros, pois pode ocorrer um declínio da intensidade das chuvas, um aumento da evaporação e um maior número de dias secos consecutivos por causa do mau uso do solo. Outro fator preponderante é o aumento das temperaturas, que se torna mais forte e intenso em anos de El Niño devido à mudança climática (MARENGO, 2009).

Devido aos fatores citados anteriormente, e sem falar no aumento da população, não é possível saber ao certo os padrões de necessidade demanda de água para a população, e para as condições ambientais. Assim, planejar cenários futuros é prever

incertezas e considerar as mudanças, e poder ajudar a entender as implicações e condições sobre o gerenciamento dos recursos hídricos (NASUTI e LITRE, 2014).

Marengo et al. (2004) analisaram a variabilidade da precipitação regional produzida pelo modelo atmosférico climático global do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Centro de Estudos Oceânicos, Terrestres e Atmosféricos (CPTEC/COLA), para a América do Sul. Esse estudo identificou assinaturas bem conhecidas de anomalias de chuvas do El Niño em 1982–1983 e 1986–1987, indicando sua sensibilidade ao forte forçamento externo. Em anos normais, a variabilidade climática interna pode afetar a previsibilidade do clima em algumas regiões.

Estudos de modelagem climática vêm sendo desenvolvidos a exemplos de estudos de vulnerabilidades setoriais a mudança do clima no Brasil encabeçado pela Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais - Rede CLIMA. O Brasil tem grande parte de sua economia, sobretudo, a agricultura e a indústria condicionadas pelo clima e os regimes hidrológicos de suas bacias hidrográficas (BRASIL, 2006; PBMC, 2013). Assim, devido a escassez de estudos hidrológicos há a necessidade de mais estudos sobre o assunto para que órgãos gestores de recursos hídricos conheçam o comportamento hidrológico futuro em diferentes cenários e condições climáticas e de uso do solo, para se adaptarem para o enfrentamento dos impactos das mudanças do clima.

Para estudos de modelagem climática, o método do *downscaling*, ou regionalização que é a redução da grade de resolução dos modelos globais para projeções mais detalhadas para com uma resolução espacial mais alta do que a fornecida de uma simulação de um modelo global do clima para um determinado local ou estação. A regionalização de dados climáticos simulados tem sido muito usada para previsões sazonais em regiões da América do Sul (CHOU et al., 2005).

Existem estudos que relatam que a região do nordeste brasileiro já apresenta mudanças climáticas significativas com elevadas temperaturas, assim há necessidade de uma discussão nacional e internacional a respeito do assunto e como serão as medidas mitigadoras e adaptações climáticas para os novos padrões climáticos (BRASIL, 2016; HAWKINS e SUTTON, 2012).

2.4. Modelos Hidrológicos

Nas últimas décadas, modelos hidrológicos distribuídos de base física têm sido amplamente utilizados em estudos para avaliar o comportamento e os impactos das mudanças de uso do solo e sua influência sobre os processos de fluxo de água superficial e subterrânea, desprendimento, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas.

Nesse aspecto, o acoplamento entre esses modelos, o uso de SIG e de produtos como imagens de satélite constituem uma área promissora para pesquisas na área de geotecnologias aplicada a recursos hídricos. O uso de SIG na modelagem hidrológica é extremamente valioso para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que busca simular as alterações que ocorrem por meio de mudanças no uso da terra em tempo real, e seu uso é muito importante para o estabelecimento de planos de uso e ocupação e a integração solo e água, tanto em áreas rurais como nas áreas urbanas, trazendo contribuições significativas para a gestão dos recursos hídricos (SILVA e SANTOS, 2008).

No Brasil o uso de modelos tem aumentado consideravelmente devido ao fato de a relevância dada a esse assunto por pesquisadores do país e do exterior. Entretanto, poucos estudos são aplicados para a quantificação da produção de sedimentos em ambientes de cenários futuros (SILVA et al., 2010).

Com esse propósito, a aplicação de modelos hidrossedimentológicos é de suma importância para a análise da produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Segundo Rennó e Soares (2001), um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando na compreensão dos mecanismos envolvidos no presente. Embora haja pouca diferença, em termos de definição do modelo, os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prever futuras mudanças nos ecossistemas, nesse caso a região do Cariri Paraibano.

Nas últimas décadas, os modelos hidrossedimentológicos têm sido cada vez mais utilizados na investigação dos impactos do uso e ocupação do solo na produção de sedimentos e do escoamento (O'NEAL et al, 2005; SETEGN et al, 2009, ZHANG et al, 2009; PENG e XU, 2010). Um modelo é a reprodução de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, para entendê-lo e buscar suas respostas para

diferentes entradas. E quanto mais complexos os sistemas, mais desafiadores e necessários os modelos (TUCCI,1998).

Para Rennó e Soares (2001), os modelos comumente são classificados, entre outras formas, pelo tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocástica ou determinística). Os modelos estocásticos são aqueles que uma das variáveis envolvidas na modelagem tem um comportamento aleatório, com distribuição de probabilidade, já os modelos determinísticos são aqueles que não têm esse tipo de variável e assim reproduzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de inputs.

Quanto ao tipo de relação entre essas variáveis, elas podem ser: empíricas ou conceituais. Os modelos empíricos são derivados do conceito e sua formulação não tem representação explícita dos processos físicos da bacia, possuindo uma característica regionalista, enquanto os modelos conceituais, também denominados de modelos baseados em processos, são aqueles que tentam descrever todos os processos que estão envolvidos no fenômeno estudado com base em formulações físicas.

Para Tucci (1998) uma simulação é o processo pelo qual utiliza modelos por três fases, classificadas como estimativa ou ajuste que é a fase onde os parâmetros devem ser determinados, verificação que é a simulação do modelo com os parâmetros estimados e é onde se verifica a validade do ajuste realizado, e a previsão que é a simulação do sistema pelo modelo com os parâmetros ajustados para quantificação de sua resposta em diferentes entradas.

Os modelos de planejamento são aqueles que simulam condições globais de um sistema maior. Normalmente, envolve uma região ou uma bacia e busca não somente a solução meramente hidráulica, hidrológica ou econômica, mas engloba também a quantificação socioeconômica e ambiental (TUCCI, 1998).

Considerado com uma ferramenta para representar o comportamento da bacia hidrográfica, o modelo hidrológico prevê condições futuras e simula situações hipotéticas para avaliar impactos de mudanças, e pode ser definida como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes, sendo alguns da superfície terrestre e outros subsuperficiais (ENOMOTO, 2004; RENNÓ e SOARES, 2001). Visando potencializar o uso de modelos de simulação hidrológica para o desenvolvimento de soluções para o correto gerenciamento de recursos hídricos em bacias, hoje vários estudos utilizam acoplamento de modelos hidrossedimentológicos e SIG. Entre os modelos existentes, o modelo SWAT é um dos mais usados no planeta (ARAGÃO, et al., 2013).

Como exemplos de estudos usando o SWAT, podemos destacar o trabalho de Bressiani et al. (2015b), que revisaram os requerimentos do SWAT no período de 1999 a 2015 em periódicos nacionais e internacionais, anais de congressos e teses ou dissertações, e verificaram que aproximadamente 67% dos estudos pesquisados foram realizados em bacias inseridas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. No Brasil, o modelo SWAT vem sendo empregado para os trabalhos como o de Aragão et al. (2013), que analisaram a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e a simulação dos processos de vazão em uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil.

Dantas et al. (2015) simularam o escoamento e o rendimento de sedimentos utilizando também o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. Silva e Medeiros (2014) aplicaram o mesmo modelo para escala de microbacia com eventos extremos em vegetação do tipo caatinga. Bressiani et al. (2015a) estudaram os efeitos de diferentes resoluções de dados meteorológicos espaciais e temporais sobre a modelagem de vazões de uma bacia no semiárido, Nordeste do Brasil.

Da Silva et al. (2016) simularam diferentes cenários de uso do solo na porção da Bacia do Rio São Francisco utilizando o SWAT para analisar os efeitos de mudanças na produção de sedimentos, fazendo comparações com o atual uso da terra. De Andrade et al. (2018) aplicaram o SWAT em uma bacia representativa do nordeste do Brasil para avaliar os efeitos de conjuntos de dados de descarga e umidade do solo sobre as incertezas e previsões do modelo.

Magalhães et al. (2018) investigaram a eficácia hidrológica em um cenário de recuperação em áreas de maior elevação topográfica da Caatinga arborescente e o comportamento dos componentes hidrológicos em um cenário de expansão agrícola para a bacia experimental do Jatobá, em Pernambuco.

De Medeiros et al. (2018) aplicaram o modelo SWAT para estimar o escoamento e o rendimento de sedimentos na bacia do reservatório Eptácio Pessoa e identificaram regiões onde o reflorestamento deve ser realizado com urgência na parte norte e no extremo sul da sub-bacia devido ao nível geral de degradação da terra.

Aragão et al. (2013) ao aplicarem o modelo SWAT analisaram a sensibilidade do parâmetro Curva Número (Cn2) aos parâmetros relacionados à água subterrânea, denotando a influência do uso e da cobertura do solo e das condições de recarga do aquífero na vazão o modelo foi capaz de reproduzir consistentemente a vazão e a produção de sedimentos.

Dantas et al. (2015) aplicaram o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. Esses autores constataram que o modelo SWAT apresentou um bom desempenho e concluíram que o modelo pode ser usado como instrumento de apoio ao planejamento de uso da terra para a bacia do Rio Taperoá.

2.5.Geoprocessamento

O SIG é definido como um sistema computacional, usado para o entendimento dos fatos e fenômenos que ocorrem no espaço estudado, é também entendido como um conjunto de técnicas de Geoprocessamento mais amplas e que pode englobar todas as demais, essas técnicas de SIG após a criação de um modelo digital do ambiente permitem estimar em detalhe este fenômeno ambiental, além de ser um sistema baseado em computador que permite capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados (CÂMARA, 1995; ROCHA, 2000; XAVIER DA SILVA, 2001).

Os SIGs podem trazer benefícios extraordinários a pesquisas que envolvam modelagem em bacias hidrográficas, devido a sua capacidade de manipular a informação espacial de forma precisa, rápida e sofisticada (GOODCHILD et al., 1993).

O Sensoriamento Remoto tem sido utilizado para obter informações sobre um objeto ou fenômeno na superfície da terra, sem contato físico com ele, através de dispositivos que são colocados em aeronaves como drones ou satélites. (ROCHA, 2000). O sensoriamento remoto tem como objetivo a obtenção de informações confiáveis, identificando, mesurando e quantificando o uso do solo através da interpretação de imagens de alta qualidade.

Além de estudos relacionados a uso do solo, os SIG'S são comumente usados em problemas que se referem a erosão dos solos, e podem ser entendidos como sendo o levantamento das condições ambientais nos quais são identificadas a extensão e a possível expansão territorial de um processo ambiental, para detectar esses problemas, muitas vezes são utilizadas as técnicas de geoprocessamento (XAVIER-DA-SILVA e CARVALHO FILHO, 1993).

De acordo com Machado e Vettorazzi (2003), a incorporação de modelos hidrológicos em um SIG auxilia na interpretação dos resultados do modelo, portanto, uma

ferramenta poderosa e eficiente no cruzamento da informação espacial e tabular, economizando tempo e despesas desnecessárias.

Modelos de análise ambiental foram integrados nos SIG, uma vez que permitem a integração de bancos de dados espaciais, permitindo a análise geográfica dos processos hidrossedimentológicos de forma integrada, a fim de representar espacialmente os resultados de modelagem, especialmente na produção de mapas temáticos pelo cruzamento de imagens de sensoriamento remoto, dados tabulares e de informação geográfica (NIGEL e RUGHOOPUTH, 2010).

A integração de modelos de simulação hidrossedimentológicos com SIG permite a manipulação e a construção de bancos de dados espaciais de vários tipos de dados, de forma integrada, no mesmo sistema de referência.

O acoplamento de modelos hidrossedimentológicos com SIG não é uma introdução recente e nos últimos anos tem aumentado consideravelmente. Em estudo de modelagem hidrológica, as técnicas automáticas para determinar as propriedades da drenagem em bacias hidrográficas fez com que a representação cartográfica usual do relevo fosse substituída gradualmente por Modelos Numéricos do Terreno, o que facilitou e muito a tarefa de preparação desses dados.

Para Xavier-da-Silva (1992), a utilização de ferramentas de SIG permite ganhar conhecimento sobre as relações entre fenômenos ambientais de uma bacia, gerando modelos numérico do terreno, simulando cenários, a fim de definir planejamentos, gerenciamento ou zoneamento em bacias.

De acordo com Silva (2010), os SIGs permitem conexões entre as diferentes atividades, com base em sua proximidade geográfica. De maneira simplificada, um SIG combina diferentes níveis de informação sobre um lugar proporcionando-lhe uma melhor compreensão do mesmo. O sensoriamento remoto permite observar variáveis hidrológicas em grandes áreas (SCHMUGGE et al., 2002).

Pois o aspecto mais fundamental da informação que é tratado é a representação dos dados espaciais ou dados geográficos possuem uma localização expressa como coordenadas de um mapa e atributos descritivos representados num banco de dados convencional (CÂMARA, 1995).

Os SIGs quando projetados ao acoplamento e ao processar de informações georreferenciadas, permitem a manipulação de dados de diversas fontes em banco de dados, recuperando e combinando informações e efetuando vários tipos de análises,

inclusive podem ser combinados com modelos hidrológicos utilizando o Sistema de Apoio à Decisão. (SILVA, 2007).

2.6.Cenários Climáticos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)

O Painel intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) vem desenvolvendo pesquisas com o objetivo de auxiliar e prever condições climáticas no futuro. Os estudos do IPCC permitem projeções da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera para fomentar o desenvolvimento de cenários de mudanças climáticas na Terra, partindo da influência que esses gases exercem sobre o sistema climático do planeta. Assim, é possível prever cenários climáticos com diferentes condições (otimista e pessimista), que são controlados pela concentração de gases do efeito estufa. Essas projeções levam em consideração, como a principal variável, a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Como resultado dessas pesquisas, são publicados periodicamente relatórios de emissão desses gases, baseados nas condições de desenvolvimento social, econômico e tecnológico da sociedade no planeta. O IPCC relaciona a concentração dos seguintes gases: (a) dióxido de carbono (CO_2), (b) metano (CH_4), e (c) óxido nitroso (N_2O), de acordo com as atividades do ser humano, uma vez que esses gases que influenciam no efeito estufa podem provir de fontes não naturais, como, por exemplo, a queima de combustíveis fósseis. Nesse sentido, para o desenvolvimento de projeções são considerados fatores como: (a) crescimento populacional, (d) desenvolvimento da tecnologia, (c) mudanças no sistema de geração e uso de energia, e (e) aproveitamento da terra (WAYNE, 2013). Todos esses fatores são considerados para a geração de cenários climáticos futuros que levam em consideração os gases de efeito estufa na atmosfera.

O IPCC no início dos anos 2000 publicou dois estudos de projeções de gases do efeito estufa, que foram mundialmente estudados pela comunidade científica em todos os continentes, são eles: o *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), e o *Representative Concentration Pathways* (RCPs) (IPCC, 2007) (TAVEIRA, 2016). Esses dois relatórios com as projeções do clima da Terra têm sido utilizados como base para a elaboração de cenários climáticos, auxiliando pesquisas na avaliação de impactos nos recursos hídricos acarretados pelas mudanças climáticas.

As projeções contidas no SRES (IPCC, 2007) dividem-se em grupos e subgrupos, também conhecidos como cenários (Figura 1), segundo as forças motrizes antrópicas que podem influenciar na emissão de gases do efeito estufa. Esses cenários representam diferentes situações que envolvem o desenvolvimento de tecnologia, crescimento populacional além de desenvolvimento social e econômico, como dito anteriormente.

Os cenários A2 e B2 caracterizam-se, principalmente, pelo crescimento contínuo da população no decorrer do século (sendo mais intensa na família A2), e desenvolvimento tecnológico e econômico mais lento em relação aos outros cenários.

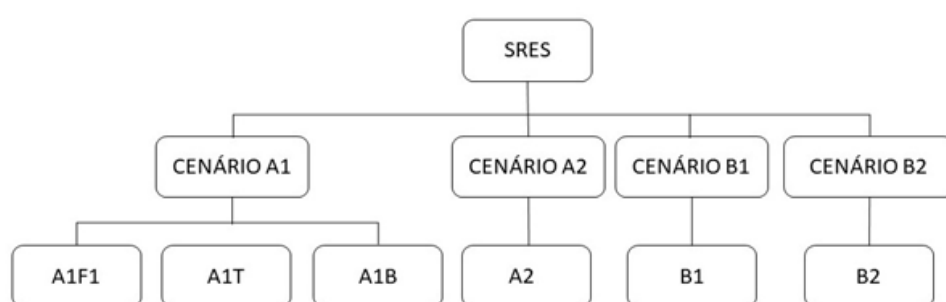


Figura 1- Fluxograma dos cenários apresentados no SRES.

O cenário da família B1 (Figura 1) pode ser considerado “otimista” em relação aos demais, pois considera o crescimento populacional controlado e o desenvolvimento tecnológico voltado para fontes de energia renovável e sustentabilidade ambiental.

Os cenários contidos no grupo A1 levam em consideração o rápido crescimento econômico e possui foco nas tecnologias voltadas para a produção energética. O cenário A1F1 considera fontes de energias não renováveis de origem fóssil. No cenário A1T constam fontes de energia renovável, enquanto no cenário A1B prevê um balanço entre as duas fontes de energia citadas (NAKICENOVIC e SWART, 2000).

O grupo dos cenários RCP trouxe uma nova proposta de projeções futuras de gases estufa, que são categorizadas em quatro diferentes vias representativas de concentração de gases de efeito estufa ao longo de todo o século XXI. Os quatro cenários, intitulados RCPs são classificados em termos de forçantes radiativas, que de acordo com Taveira (2016) podem ser definidas como uma “medida de influência que um fator tem de

alterar o balanço de energia que entra ou sai no sistema terra-atmosfera, e é um índice de importância do fator como um potencial mecanismo de mudança climática”.

Assim como os SRES, os RCPs possuem projeções de emissões de gases estufa com base em atividades econômicas, fontes de energia, crescimento populacional, entre outros fatores socioeconômicos (WAYNE, 2013). Contudo, esses cenários possuem algumas inovações e otimizações em relação aos SRES, uma vez que essa área do conhecimento necessita de atualizações constantes nas metodologias e utilização de dados disponíveis, devido ao fato de constantes avanços técnico-científicos que contribuem para o melhor entendimento do sistema climático. Além disso, existe ainda a atualização da própria base histórica de dados, que pode apresentar mudanças nas tendências, impactos, adaptação e vulnerabilidade climáticas (TAVEIRA, 2016).

Comparando os dois grupos apresentados, pode-se destacar que por se tratar de publicação mais recente, existem alguns aprimoramentos realizados nos cenários RCPs em relação aos SRES, em decorrência dos avanços tecnológicos e científicos ocorridos no intervalo de tempo entre eles.

A categorização dos RCPs ocorre de acordo com a colaboração das forçantes radiativas para o aquecimento do sistema climático global. Os cenários são divididos em quatro grupos: o grupo intitulado RCP 2.6, representa um aumento possível na temperatura global entre 0,3°C a 1,7°C; no grupo RCP 4.5, o aumento previsto para temperatura seria entre 1,1°C a 2,6°C; no cenário RCP 6, a temperatura prevista está entre 1,4°C a 3,1°C, e por fim, no grupo intitulado RCP 8.5, o aumento da temperatura seria mais severo, entre 2,6°C a 4,8°C ao longo do século XXI, em decorrência da emissão contínua de gases estufa prevista pelo cenário (WAYNE, 2013).

A Tabela 1 mostra a máxima forçante radiativa de cada cenário previsto para o futuro, e a respectiva mudança máxima esperada na temperatura. Na Tabela 1 são apresentadas as estimativas e prováveis faixas de incerteza avaliadas para o aquecimento projetado para o final do século XXI, considerando-se como referência as temperaturas observadas entre 1980 e 1999.

O acoplamento de cenários climáticos futuros não é uma inovação recente. Existem na literatura diversos estudos que fazem uso da aplicação de modelos de previsão climática e hidrológicos. Como exemplo, pode-se citar os estudos de Block e Rajagopalan

(2009) e Alves et al. (2012), que empregaram diferentes modelos hidrológicos de complexidade variável para gerar previsões de vazões e/ou reservatórios.

Tabela 1- Projeção do aquecimento médio global da superfície terrestre para o período de 2046–2064, em relação à temperatura observada em 1980–1999 nos diferentes cenários

Cenários de emissões	Melhor estimativa (°C)	Faixa provável (°C)
B1 – Apresenta rápidas mudanças na estrutura econômica mundial, com ênfase em soluções globais, na sustentabilidade ambiental e na inserção de tecnologias limpas	1,8	1,1–2,9
A1T – Semelhante ao cenário A1B, porém com uma mudança tecnológica no sistema energético dando ênfase ao uso intensivo de fontes de energia não fóssil	2,4	1,4–3,8
B2 – Descreve um mundo com uma população intermediária e ênfase nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental	2,4	1,4–3,8
A1B – Representa um mundo futuro onde a globalização é dominante, apresentando crescimento econômico muito rápido, população atingindo o pico em meados do século e desenvolvimento rápido de tecnologias eficientes, havendo um equilíbrio entre fontes de energia fósseis e não fósseis	2,8	1,7–4,4
A2 – Descreve um mundo futuro heterogêneo onde a regionalização é dominante, com alto crescimento populacional, lento desenvolvimento econômico e mudanças tecnológicas lentas	3,4	2,0–5,4
A1FI – Semelhante ao cenário A1B, porém com uma mudança tecnológica no sistema energético dando ênfase ao uso intensivo de fontes fósseis	4,0	2,4–6,4

Em outro estudo, Braga et al. (2013) avaliaram um sistema de modelagem integrado para uma bacia localizada na região leste do Nordeste do Brasil usando dados do Modelo Espectral Regional do Centro Nacional de Previsões Ambientais, dentro do Modelo de Circulação Geral do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (GCM). Os resultados mostraram que o *downscaling* dinâmico realizado pelo modelo RSM regional se aproxima da distribuição de frequência do conjunto de dados observados diariamente, embora erros tenham sido detectados na magnitude e no tempo (ou seja, antecipação de picos na escala diária e escoamento simulado e volumes armazenados em reservatórios), fortemente ligados à chuva.

Barfus e Bernhofer (2014) apresentaram uma avaliação dos desempenhos do MCG para o Brasil, enfrentando problemas relacionados à disponibilidade de água e qualidade. Os resultados da avaliação de desempenho do modelo foram aplicados para derivar estimativas do clima futuro nas regiões por meio da média do conjunto.

Em um estudo recente, Delgado et al. (2018) investigaram o uso de uma relação estatística para fornecer previsões sazonais de nível de reservatório e calcularam vários índices de seca meteorológica que são comparados com observações para avaliar a habilidade das previsões, usando dois GCMs ECHAM 4.6 e ECMWF.

2.7. Impacto de Diferentes Cenários Climáticos na Vazão e Transporte de Sedimentos em Bacias Hidrográficas

Os impactos ocasionados pelas mudanças do clima utilizando as projeções do IPCC nos processos naturais vêm sendo cada vez mais estudados (BAE et al., 2011; KIM et al., 2013; SHRESTHA et al., 2017). As projeções de emissões de gases de efeito estufa também são utilizadas em modelos atmosféricos de circulação global, como o HadCM3 (YU et al., 2012), o CSIRO-Mk 3.0 (GORDON et al., 2002) e o MIROC-5 (WATANABE et al., 2010), por exemplo, que são usados para a elaboração de cenários climáticos em escalas diária ou mensal. Destaca-se ainda que as projeções dos gases de efeito estufa propostas pelo IPCC também são usadas por institutos e órgãos de pesquisa para a produção de cenários climáticos no mundo.

Estudos como o de Marengo et al. (2009) e Sabóia et al. (2017) aplicaram e analisaram dados simulados por modelos globais de circulação atmosférica para distintas regiões no planeta, são pesquisas que possibilitam o aprimoramento do conhecimento sobre a influência da variabilidade climática em variáveis ambientais. Tais aplicações servem para melhor entender e/ou prever o comportamento e também eventos extremos do ciclo hidrossedimentológico. Deve-se ressaltar que esses estudos geralmente ocorrem com o auxílio de ferramentas de modelagem e equacionamento do sistema ambiental.

Darren et al. (2009) analisaram as respostas hidrológicas às variações na concentração de CO₂ na atmosfera, e variações na temperatura e precipitação utilizando como ferramenta a modelagem matemática distribuída. Em comparação com a situação

climática atual, a pesquisa concluiu que altas concentrações de CO₂ na atmosfera e aumento da temperatura, características do cenário A1F1 do IPCC em 50 anos de simulação, resultaram na diminuição da evapotranspiração média em 37,5%, aumento da produção de sedimentos em 36,5% e aumento da vazão em 23,5%.

Perazzoli et al. (2013) simularam a tendência de variáveis climáticas de uma bacia hidrográfica no sul do Brasil em resposta aos cenários A2 e B2 elaborados pelo IPCC. Os autores concluíram que os resultados variaram conforme a escala de tempo (anual, mensal ou diária). Em relação aos sedimentos, os maiores valores foram encontrados quando simulados com o cenário A2. Houve evidência que os eventos extremos de maior intensidade na escala de tempo diária para o cenário A2 transportam mais sedimentos dentro da bacia, com impactos significativos sobre a conservação do solo e assoreamento de corpos d'água.

Pode-se destacar que a utilização dos dados RCPs é ainda incipiente quando comparada a aplicações com dados do SRES (NAKICENOVIC e SWART, 2000). Isso se deve, principalmente, à falta de regionalizações específicas dos dados climáticos modelados com base nos RCPs. Entretanto, algumas publicações apresentam avaliação de impacto e simulação de processos hidrológicos a partir dos dados RCPs, como nos estudos de Zhang et al. (2014) e Htut e Shrestha (2015), que analisaram o impacto das projeções RCP 4.5 e 8.5 na vazão ao longo do século XXI, resultando em aumento da vazão de até 57% sob a influência dos dois cenários.

Ouyang et al. (2015) analisaram o impacto dos RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 no regime de vazão de bacia hidrográfica e concluíram que apesar do aumento da precipitação e temperatura ao longo do tempo identificado em todos os cenários, a vazão diminuiu em decorrência do aumento da evapotranspiração causado pelo aquecimento do sistema climático na região.

Pesquisas demonstram, por meio do uso de modelagem, que o processo de erosão e transporte de sedimentos, bem como o ciclo hidrológico, são afetados diretamente por mudanças no clima. De maneira geral, as situações climáticas que potencializam os eventos extremos de precipitação proporcionam maior carga de sedimentos, demonstrando a sensibilidade do regime hidrossedimentológico à frequência e intensidade de eventos pluviométricos. Entre as pesquisas que relacionam a frequência e intensidade de chuvas em diferentes cenários climáticos com auxílio de modelagem matemática é possível citar: He et al. (2006); Gosain et al. (2006); Lu et al. (2013); e Mullan et al. (2013).

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá

A bacia hidrográfica do Rio Taperoá possui uma área de aproximadamente 5.660 km², está inserida na mesorregião da Borborema e inserida na região do cariri paraibano, engloba 23 municípios e está localizada mais precisamente entre as coordenadas geográficas 6°40'0" e 7°40' 0" de latitude sul e 36°00' 00" e 37°20' 00" de longitude oeste (Figura 2). Os municípios que fazem parte parcialmente da área da bacia são, Assunção, Boa Vista, Cacimbas, Cabaceiras, Cubati, Barra de Santa Rosa, Boqueirão, Serra Branca, Juazeirinho, Taperoá, Tenório, Teixeira, Junco do Seridó, Salgadinho, São João do Cariri, Seridó, Pocinhos e Olivedos. Os municípios que fazem parte em sua área totalmente integrando a bacia são, os municípios de Desterro, Soledade, Livramento, Gurjão, São José dos Cordeiros, Parari e Santo André.

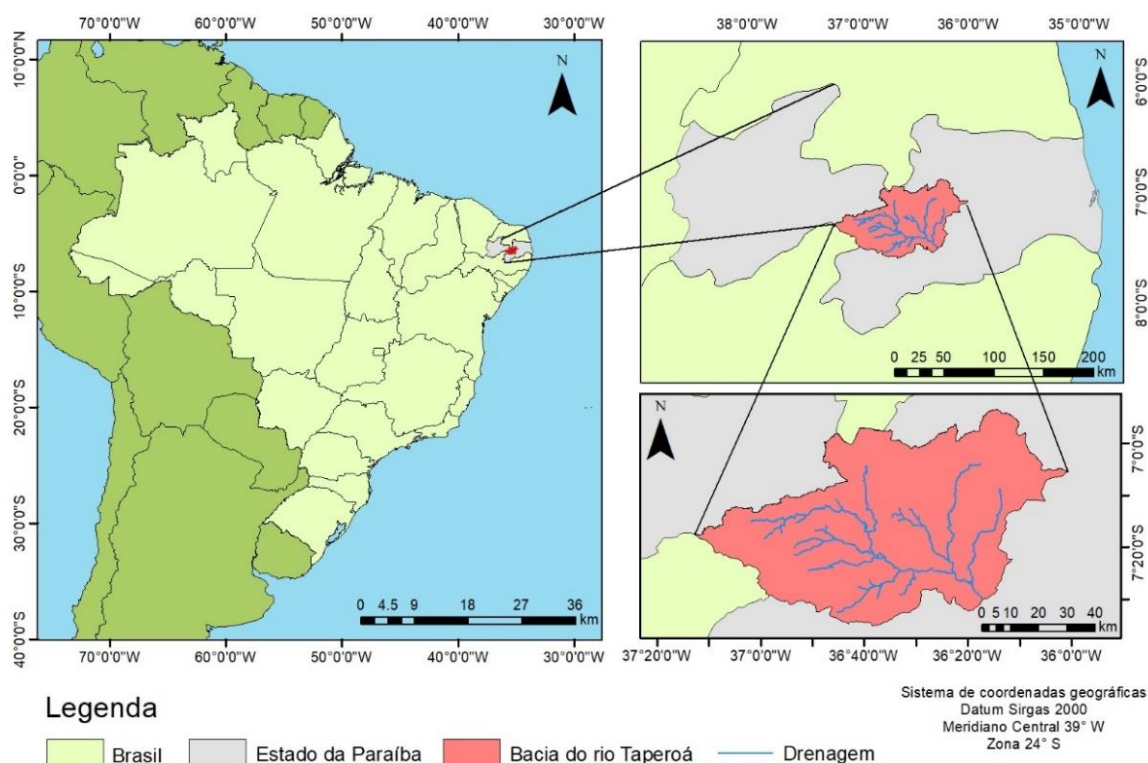


Figura 2 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Taperoá no Brasil.

A bacia do Rio Taperoá possui rede de drenagem parte perene, parte intermitente ou também conhecido como rios temporários, sendo o seu rio principal o Rio Taperoá com a extensão de 131.56 km. O Rio Taperoá tem sua nascente na porção oriental da Serra do Teixeira, seguindo seu curso na direção norte, sudeste em direção do rio Paraíba e desagua no açude Presidente Epitácio Pessoa (Boqueirão), enquanto aos limítrofes, a área estudada limita-se, ao norte, com a bacia do rio Seridó, que drena para o Rio Grande do Norte; a nordeste, com as bacias do rio Jacú e Curimataú; a leste, com a sub-bacia do Médio Paraíba; ao sul, com a bacia do Alto Paraíba e a sudoeste, com a bacia do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco.

3.2 Clima

A bacia do Rio Taperoá apresenta clima do tipo tropical semiárido (clima quente e seco – BSh), segundo a classificação climática de Köppen. Essa região se caracteriza por chuvas de verão, com temperaturas elevadas superiores a 27° C. A amplitude térmica da bacia varia de 3°C a 5°C, e a umidade relativa do ar é de aproximadamente 78% (DANTAS et al., 2015). Quanto as precipitações na área de estudo estas variam entre 350 e 600 mm/ano, se concentrando principalmente entre os meses de janeiro e abril, tendo de 8 a 9 meses de estiagem (DE MEDEIROS et al., 2018). A evapotranspiração na região é alta variando entre 2.500 e 3.000 mm/ano, o que provoca elevada taxa de evapotranspiração, acarretando déficit hídrico na bacia (DANTAS et al., 2015). O número elevado de horas de exposição solar faz com que as taxas de evapotranspiração sejam elevadas, provocando déficit hídrico elevado em parte do ano (BEZERRA, 2002).

3.3 Relevo

A área de estudo apresenta um relevo suave ondulado com altitudes em torno de 300 a 500 m. As feições do relevo fazem com que a drenagem seja voltada para sudeste. A bacia do Taperoá está localizada na franja ocidental do planalto da Borborema, onde predomina o embasamento cristalino, com presença de *inselbergues* e formações de pediplanos. Em toda a bacia os terrenos são formados por superfícies de pediplano que são um processo formado da exposição a partir dos sedimentos do cretáceo ou terciário, essas

áreas muitas vezes são cobertas por rochas do escudo cristalino brasileiro, que podem ser em forma de gnaisses, granito e/ou xisto (CARVALHO, 1982).

3.4 Vegetação

A bacia do Rio Taperoá apresenta um uso e cobertura da terra primária do bioma caatinga e que se estende por toda a região onde são encontrados os níveis pluviométricos mais baixos e uma evaporação com taxas elevadas (LIMA e MELO, 1985). Esses fatores fazem com que a área seja propícia para o crescimento total e adaptação a escassez de água na região.

Quanto a forma da vegetação, segundo Souza et al. (2009) o agrupamento da área de estudo mostra uma caatinga do tipo arbórea dos relevos e serras, com uma alta população lenhosa e com uma densidade razoável. Também pode ser encontrada uma caatinga arbustiva densa, ou caatinga hipertermófila, com arbustos e moitas densas e a caatinga arbustiva aberta, clara, baixa como um tapete de gramíneas. Assim a caatinga da área de estudo varia de hipoxerófila a hiperxerófila, com a ocorrência ainda de matas serranas nos pontos mais altos e úmidos da região.

3.5 Solos

Os solos da bacia do Rio Taperoá são caracterizados e se apresentam em forma de mancha. Em geral os solos se apresentam como rasos sendo eles solos do tipo Neossolo Litólico, Luvisolo, Planossolo, Neossolo Regolítico, Neossolo Flúvico Vertissolo, Cambissolo e Latossolo. A maioria dos solos encontrados na região do semiárido apresentam características químicas adequadas, mas possuem limitações físicas, relacionadas à topografia, profundidade, pedregosidade e drenagem (OLIVEIRA et al., 2003; FRANCISCO, 2010).

3.6 Geologia

A geologia da bacia do Rio Taperoá é caracterizada por rochas cristalinas que tem origem do período pré-cambriano, e é conhecido como o Planalto da Borborema ou Serra da Borborema (CORRÊA, 2001; SILVA, 2015). Essa unidade da paisagem é definida

como um extenso cinturão orogênico meso/neoproterozóico, composto por rochas metamórficas e ígneas intrusivas pré-cambrianas (ROSS, 2005).

O Planalto da Borborema tem influência no regime climático, na dispersão da drenagem e no tipo de vegetação associada ao semiárido e condiciona o uso e a ocupação da terra, que se estende por grande parte do Nordeste Brasileiro, essa região ocorre um extenso complexo gnáissico-migmatítico com manchas de rochas granitóides e grabóides, compostas por micaxistos com sillimanita e granada (ALMEIDA et al., 1977; VITAL et al., 2015; BARROS et al., 2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Concepção do Método Proposto

A metodologia utilizada incorporou diversos procedimentos metodológicos que podem ser conferidos abaixo:

- Pesquisa e análise bibliográfica sobre o tema e a área de estudo. Embora tenha se constituído em etapa inicial, continuou praticamente durante toda a pesquisa, fornecendo os subsídios teórico-metodológicos sobre o tema abordado.
- Coleta e aquisição de informações a partir dos materiais bibliográfico, cartográfico e climatológico.
- Elaboração de material cartográfico para entender como o uso da terra está sendo ocupado pelo homem e auxiliar na predição dos usos do solo futuros.
- Modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT.
- Coleta, processamento e análise dos cenários climáticos futuros para a bacia do Rio Taperoá.

Para entender melhor os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo, uma visão ampla de todas essas etapas pode ser conferida na Figura 3.

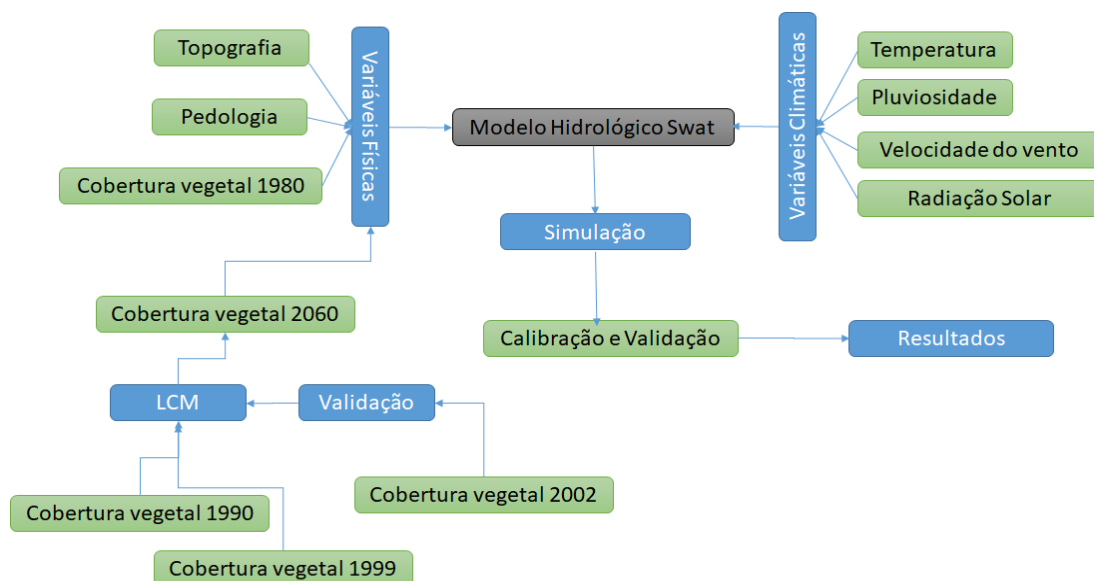


Figura 3 - Procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa.

4.2 Dados Hidrológicos Utilizados

Para a realização deste trabalho foram coletados dados pluviométricos de postos localizados dentro e no entorno da área de estudo. Ao final da análise foram selecionados doze postos pluviométricos com dados do período de 1970 a 1990, pois esse foi o período de menor falha nos dados (Tabela 2).

Tabela 2 - Informações dos postos pluviométricos utilizados neste estudo

Nome do Posto	Responsável	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Coxixola	ANA	736017	-7,61	-36,61	465
Desterro	ANA	737018	-7,28	-37,10	590
Fazenda Bananeiras	ANA	736026	-7,51	-36,96	700
Gurjão	ANA	736016	-7,26	-36,48	480
Juazeirinho	ANA	736015	-7,06	-36,58	570
Pocinhos	ANA	736014	-7,06	-36,06	624
Santa Tereza	ANA	736006	-7,11	-36,41	500
Santo André	ANA	736005	-7,21	-36,63	470
São José dos Cordeiros	ANA	736011	-7,38	-36,81	610
Serra Branca	ANA	736009	-7,48	-36,66	450
Soledade	ANA	736008	-7,06	-36,36	560
Taperoá	ANA	736002	-7,20	-36,83	500

As fontes para a obtenção dos dados foram a Agência Nacional das Águas (ANA), disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>, e também da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), disponível em <<http://www.aesa.pb.gov.br>>.

Após a coleta, seleção e organização dos postos, foi realizada uma análise de consistências dos dados, que levou em conta o período de dados existentes para cada posto, e a identificação de possíveis falhas na série histórica dos postos pluviométricos. Uma falha pode ser definida como sendo a ausência de informação em respectivo dia na série histórica dos dados. Muitas observações pluviométricas apresentam falhas em seus registros devido à ausência do observador ou por defeitos no aparelho de coleta (DANTAS, 2016).

Existem vários métodos para se fazer o preenchimento de falhas, como a regressão linear, método das razões dos valores normais e ponderação regional. O método utilizado para o preenchimento das falhas foi o método da ponderação regional, por ter como base, pelo menos dez anos de registros pluviométricos, ao menos três estações

localizadas o mais próximo possível da estação que apresenta a falha nos dados de precipitação.

Para essa etapa ser fez necessário que os postos fossem de altitudes e regiões climatológicas homogêneas (SILVA et al., 2010). Esse método é expresso pela equação 1.

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (1)$$

sendo:

P_x = precipitação anual da estação com falha na série preenchida (mm);

P_i = precipitação anual da estação vizinha de ordem “i” para o ano em que se verificou a falha (mm);

N_x e N_i = precipitações médias anuais dos postos com falha na série preenchida e do vizinho de ordem “i”, respectivamente (mm);

n = número de postos vizinhos.

No que tange os dados de vazão, neste estudo foram utilizados dados de vazão do posto Poço de Pedras (Tabela 3), localizado no município de São João do Cariri, o qual possui dados observados de vazão para o período estudado (1970 a 1990). A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos postos pluviométricos e fluviométrico utilizados no estudo.

Tabela 3 - Informações do posto fluviométrico utilizado neste estudo

Nome do Posto	Responsável	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Poço de Pedras	ANA	38850000	-7,39	-36,43	430

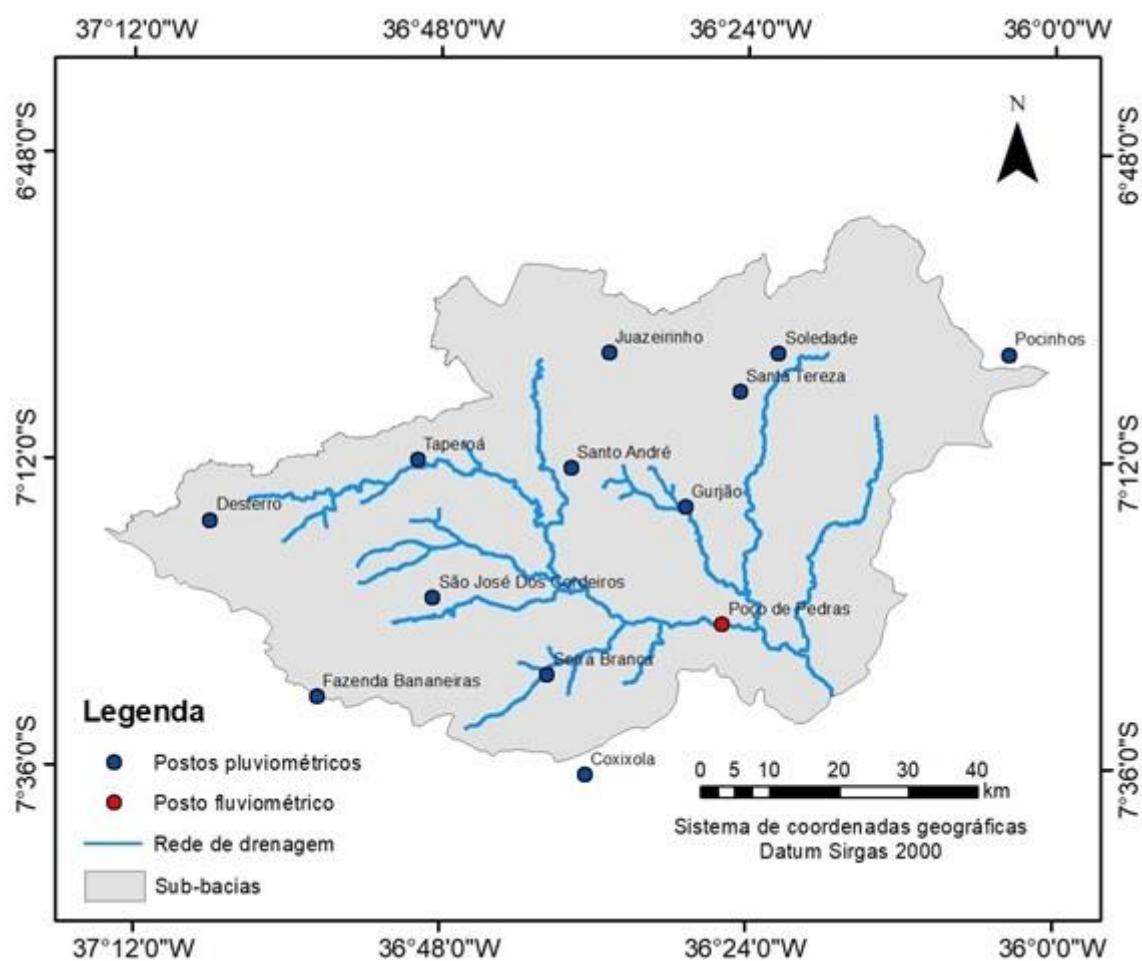


Figura 4 - Localização geográfica dos postos pluviométricos e fluviométrico utilizados neste estudo.

4.3 O Modelo Hidrossedimentológico SWAT

O *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrossedimentológico fundamentado em características semi-físicas de bacias hidrográficas, contínuo no tempo e com capacidade de simular longos períodos (ARNOLD et al., 2012). Esse modelo foi concebido com uma estrutura de comandos capaz de dividir a bacia hidrográfica em unidades homogêneas, tendo como componentes aspectos climáticos, pedológicos, topográficos, vegetativos e de manejo do solo. Essa estrutura possibilita a simulação de escoamento, sedimentos e nutrientes em qualquer bacia hidrográfica.

O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas para determinação de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração. A perda de solo é calculada a partir da Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS, 1975). Essa metodologia

usa a quantidade de escoamento para estimar a erosão dos solos e a produção de sedimentos. A MUSLE é então definida conforme Equação 2.

$$P_{sed} = 11,8(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (2)$$

sendo P_{sed} a produção de sedimentos em um dado dia (ton), Q_{surf} o volume de vazão (mm), q_{peak} a vazão de pico do escoamento (m^3/s), $area_{hru}$ a área das Unidades de Resposta Hidrológica – HRU (ha), K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot ha / MJ / mm$), C_{USLE} o fator de manejo e cobertura do solo (adimensional), P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas (adimensional), e LS_{USLE} o fator topográfico (adimensional).

A água contida no solo no ponto de murchamento, bem como a capacidade de campo são definidos pelo modelo como função da densidade do solo em cada sub-bacia. A erosão dos solos no modelo SWAT é simulada por intermédio da MUSLE, a qual é uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Enquanto no modelo USLE são utilizados os índices de precipitação como medidas indicativas de energia do impacto das gotas de chuva no solo, a MUSLE usa a quantidade de vazão para simular a produção de sedimentos.

O uso da MUSLE resulta em inúmeros benefícios, entre eles, ganho de precisão do modelo e a necessidade de uma razão de transporte é eliminado, permitindo que a equação seja aplicada para eventos de chuva individuais. Neste estudo, a vazão de pico foi calculada por uma modificação do Método Racional. A vazão foi obtida através do método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (NEITSCH et al., 2011).

O transporte de sedimentos através da rede de canais foi baseado nos processos de deposição e degradação. A deposição dentro do canal até o exutório da bacia foi determinada a partir da velocidade de deposição das partículas do sedimento (MELO NETO et al., 2014). A velocidade de sedimentação foi calculada a partir da lei de Stokes e a degradação do sedimento no canal foi fundamentada no conceito do poder de fluxo de Bagnold (1977).

A evapotranspiração potencial foi definida a partir do método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1989) e o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT foi baseado na equação do balanço hídrico, conforme apresentado na Equação 3.

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3)$$

sendo SW_t o conteúdo final de água no solo (mm), SW o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm), t o tempo (dias), R_i a precipitação (mm), Q_i a vazão (mm), ET_i a evapotranspiração (mm), P_i a percolação (mm), e QR_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

A evapotranspiração é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evaporação potencial. O modelo oferece três opções para a estimativa da evaporação potencial: Penman e Monteith, Hargreaves e Samani, e Priestley e Taylor.

No modelo SWAT, a componente percolação usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinando com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez percolada abaixo da zona das raízes, esse volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. Essa técnica é apresentada pela equação 4:

$$SW_i - SW_{oi} \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \quad (4)$$

sendo SW e SW_o a umidade do solo no começo e fim do dia (mm), respectivamente, Δt o intervalo de tempo (h), TT o tempo de propagação através da camada i em h, e i o índice de identificação da camada do solo.

Assim, a percolação pode ser calculada pela seguinte relação:

$$P_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (5)$$

sendo P_i a percolação em mm/dia.

O tempo de propagação nas camadas de solo é calculado através da equação:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{K_s} \quad (6)$$

na qual FC é a capacidade de campo, menos a lâmina de água do ponto de murchamento para a camada i (mm), e K_s é a condutividade hidráulica do solo (mm/h).

4.4 Banco de Dados Utilizado na Modelagem

A escolha da interface Arcswat se deu pela agiliza na entrada de dados, a criação de arquivos de entrada necessários e a edição de parâmetros, além de permite que os parâmetros espaciais sejam facilmente observados no ambiente (ROFFE, 2012).

Com relação aos dados de entrada, o modelo SWAT necessita de algumas informações climatológicas: (a) temperatura máxima mensal, (b) temperatura mínima mensal, (c) desvio padrão mensal da temperatura máxima, (d) desvio padrão mensal da temperatura mínima, (e) precipitação média mensal (f) desvio padrão da precipitação média mensal, (g) coeficiente de inclinação, (h) probabilidade de um dia com chuva após um dia seco, (i) probabilidade de um dia com chuva depois de um dia com chuva, (j) número médio de dias de chuva no mês, (k) precipitação máxima de 30 minutos registrada no mês, (l) radiação solar média diária, (m) temperatura média diária do ponto de orvalho para cada mês e (n) velocidade média diária do vento.

As informações climatológicas foram obtidas a partir de duas estações climatológicas (Tabela 4), de observação de superfície convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis em <<http://www.inmet.gov.br/portal>>. As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores mensais dos parâmetros climatológicos para as duas estações utilizadas neste estudo e também usados por Dantas (2016).

Os dados climatológicos são os últimos dados a serem inseridos no modelo antes de gerar os primeiros resultados para os processos de vazão e produção de sedimento. A avaliação do desempenho do modelo é feita através da aplicação de coeficientes estatísticos como correlação e regressão que medem o grau de ajuste entre os dados simulados e observados.

Tabela 4 - Estações meteorológicas utilizadas neste estudo

Código	Nome	Longitude	Latitude	Altitude (m)
82792	Monteiro	-37,07	-7,88	603
81913	Patos	-37,27	-7,08	249

Fonte: INMET (2016).

Tabela 5 - Parâmetros climatológicos obtidos para a estação de Monteiro

Parâmetros/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	32,8	33,2	32,8	31,8	30,6	29,8	28,9	29,5	31	32,2	32,5	32,1
TMPMN	21	20,9	20,9	20,7	20,3	18,8	17,9	17,9	19,1	19,6	20,1	20,2
TMPSTDMX	3,37	3,67	3,33	2,97	3,39	3,27	3,18	3,43	3,41	3,34	3,5	4,59
TMPSTDMN	1,11	1,84	1,31	1,3	1,39	1,33	1,94	1,31	2,34	1,1	1,06	1,95
PCPMM	60	58,1	70,1	64,7	39,4	33,6	26	19,3	7,28	4,2	6,34	33
PCPSTD	9,2	8,49	7,91	9,15	4,97	3,85	2,68	2,08	1,52	1,84	2,96	6,77
PCPSKW	6,6	5,92	5,23	8,27	7,62	7,31	5	4,52	9,64	1,93	2,41	9,18
PR_W1	0,09	0,12	0,16	0,2	0,16	0,21	0,23	0,13	0,06	0,03	0,04	0,06
PR_W2	0,42	0,45	0,45	0,43	0,39	0,46	0,39	0,43	0,36	0,21	0,23	0,4
PCPD	4,47	5,21	7,32	7,95	6,95	8,89	8,84	6,11	2,47	1,0	1,58	2,63
RAINHHMX	30,5	25,5	26,6	42,2	21	18,7	7,72	5,53	1,56	2,3	0,53	7,3
SOLARAV	39,5	35,9	38,6	36,5	32,5	29	31,1	35	39,8	42,4	41,7	40,7
WNDVAV	20,1	20,1	20,2	20	20	16,7	18,3	18	18,4	18,7	19,4	19,4
DEWPT	2,27	1,96	1,77	1,69	1,71	1,59	1,77	2,05	2,51	2,77	2,81	2,43

Tabela 6 - Parâmetros climatológicos obtidos para a estação de Patos

Parâmetro/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	32,4	32	31,4	30,6	29,3	28,2	27,9	29,3	30,9	32,3	32,8	32,8
TMPMN	19,8	19,9	20,1	19,7	18,5	17,1	16,3	15,7	16,8	18,5	19,5	19,9
TMPSTDMX	0,8	1,1	1,19	1,14	1,32	0,9	0,77	0,58	0,67	0,54	0,59	0,68
TMPSTDMN	1,02	0,88	0,73	0,67	0,92	1,01	1,18	1,05	0,87	0,63	0,54	0,6
PCPMM	22,6	68,7	95,6	122	43,4	29,7	34,6	12,4	6,81	7,66	7,11	12,1
PCPSTD	5,45	11,4	11,1	14,4	5,81	3,72	4,15	2	1,15	4,06	3,86	2,82
PCPSKW	13,3	8,32	5,48	5,66	6,06	6,14	5,08	9,87	16,6	28,8	28,6	10,7
PR_W1	0,03	0,06	0,1	0,15	0,09	0,1	0,1	0,04	0,02	0,0	0,0	0,01
PR_W2	0,74	0,51	0,31	0,3	0,17	0,12	0,2	0,64	0,84	0,91	0,94	0,83
PCPD	3,07	3,45	4,28	5,41	3,41	3,24	3,41	3,45	3,66	2,28	2,17	2,66
RAINHHMX	30,5	25,5	26,6	42,2	21	18,7	7,72	5,53	1,56	2,3	0,53	7,3
SOLARAV	39,5	35,9	35,6	36,5	32,5	29	31,1	35	39,8	42,4	41,7	40,7
WNDVAV	19,2	19,9	20,7	20,9	20,2	19,1	18,4	17,6	17,8	18,2	18,4	18,8
DEWPT	2,27	1,96	1,77	1,69	1,71	1,59	1,77	2,05	2,51	2,77	2,81	2,43

Para a realização da modelagem foram executados alguns procedimentos e coleta de informações para a obtenção dos resultados. Os dados constituem em informações cartográficas e dados tabulares. Assim, foram necessários dados cartográficos das feições do terreno, Modelo Digital de elevação (MDE), mapa de uso e cobertura da terra, tipos de solos e os dados climáticos e hidrológicos. Para algumas informações se faz necessária uma busca na literatura como as dos parâmetros dos solos e características dos usos do

solo, além dos índices de desempenho do modelo, parâmetros de avaliação dos resultados, como serão vistos no item a seguir.

4.4.1 Declividade

A declividade ou inclinação do terreno é dada pelo ângulo de inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal. Essa informação foi de fundamental importância para a criação das unidades de resposta hidrológica (HRU). Para a construção da distribuição das classes de declividade para a bacia do Rio Taperoá, foi adotada uma classificação do terreno proposta pela EMBRAPA (1979). Foram definidas cinco classes de declividade que vão da classe “0–3” até “< 45 %”, essas informações foram obtidas através do modelo digital de elevações do SRTM da missão *Shuttle Radar Topography Mission*.

Para esse estudo, foi adotado o método proposto pela EMBRAPA (1979), onde: 0–3% plano, 3–8% suave ondulado, 8–20% ondulado, 20–45% fortemente ondulado, > 45% montanhoso (Tabela 7). A Figura 5 mostra a espacialização da declividade da bacia do Rio Taperoá calculadas com base na classificação do terreno proposta pela EMBRAPA (1979).

Tabela 7 - Classes de declividades existentes na bacia

Declividades (%)	Tipo de relevo	Área da bacia (km ²)
0 a 3	Plano	3157.06
3 a 8	Suave ondulado	1806.18
8 a 20	Ondulado	607.25
20 a 45	Fortemente ondulado	109.97
> 45	Montanhoso	4.30

Fonte: EMBRAPA (1979).

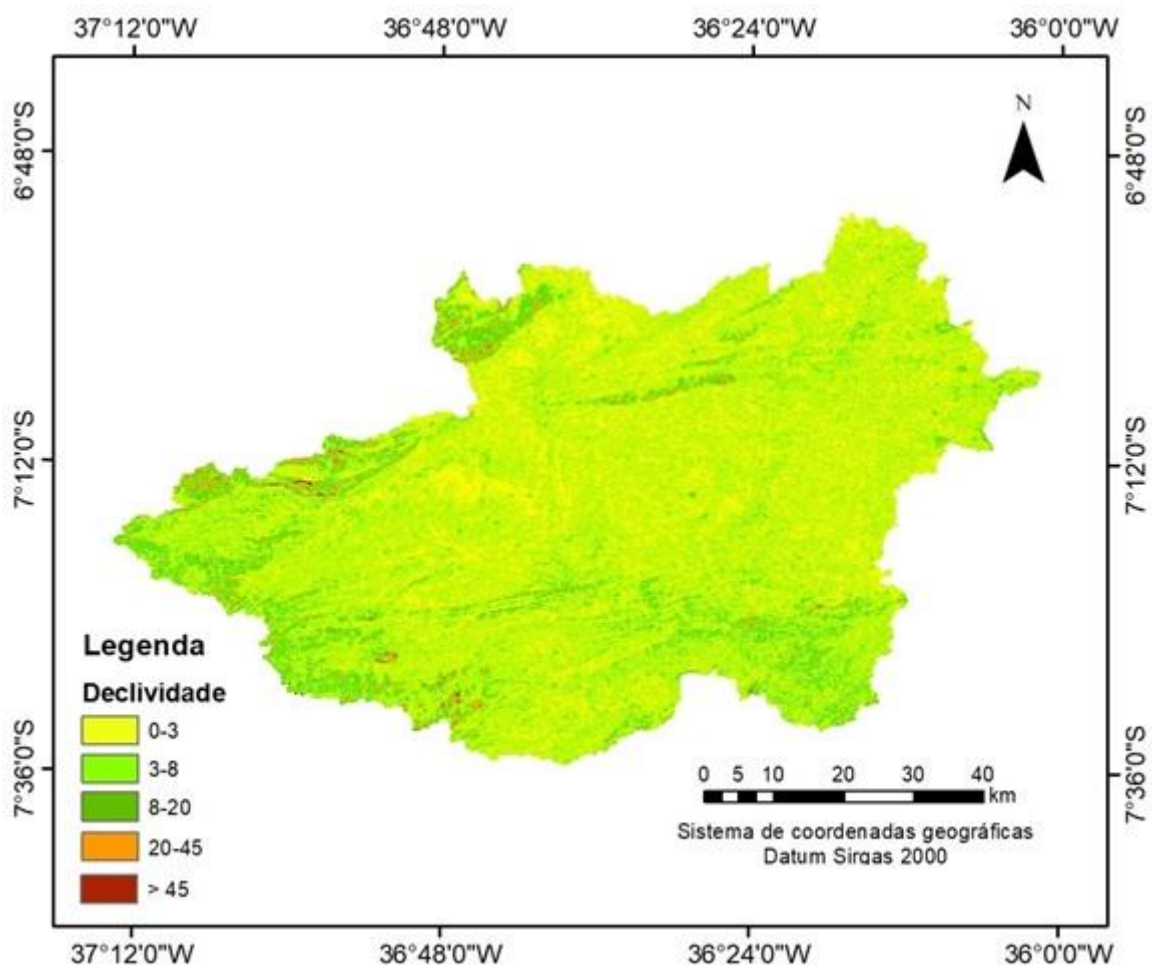


Figura 5 – Mapa de declividades da bacia do Rio Taperoá.

4.4.2 Discretização da bacia

Para discretizar a bacia do Rio Taperoá foi definida a área mínima de acumulação de fluxo pelos canais como sendo igual a 10000 ha, este valor foi o sugerido pela interface do ArcSwat e visou manter o padrão similar ao mapa de hidrografia.

Para a realização da dessa etapa foi necessária a utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia.

O Modelo Digital de Elevação utilizado foi obtido através do site do INPE (2015). Estes dados correspondem às imagens de radar SRTM da missão *Shuttle Radar Topography Mission*, refinados por krigagem para todo o território brasileiro com resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m).

Foram escolhidos os dados do Topodata ao invés do SRTM nativo, pois o nível de detalhe é o mesmo, porém em uma superfície com coerência de suas propriedades

angulares como declividade, orientação de vertentes entre as células vizinhas, isso sendo um fator importante em análise morfométrica, além de não vir com os vazios existentes nos dados originais (VALERIANO et al., 2006).

Utilizando essa informação, a bacia do Rio Taperoá foi discretizada em 317 sub-bacias, onde foram identificados o direcionamento, a acumulação do fluxo de vazão do terreno, a rede de drenagem da bacia e todos os exutórios de cada uma das sub-bacias do Rio Taperoá (Figura 6).

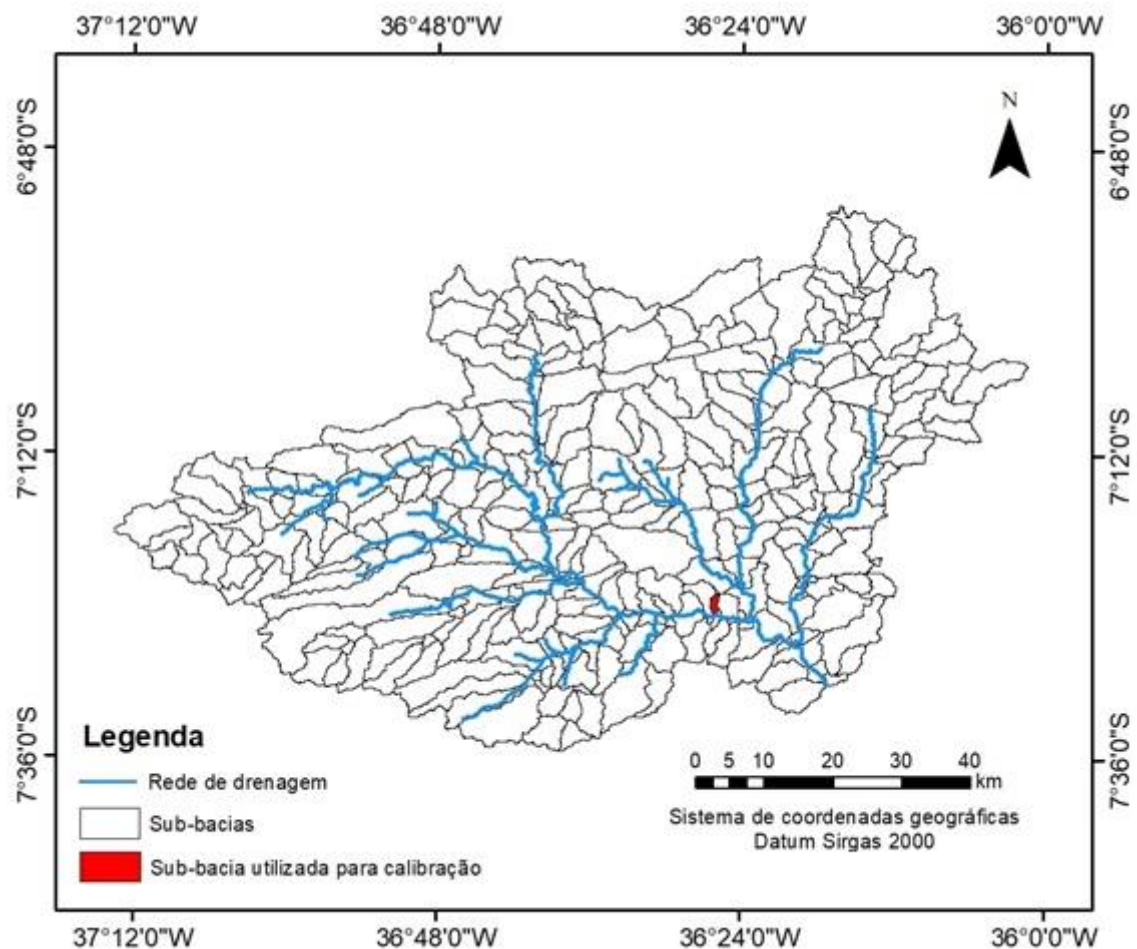


Figura 6 - Discretização da bacia do Rio Taperoá em sub-bacias.

4.4.3 Geração das unidades de resposta hidrológica

Terminada a etapa de discretização da bacia, foram criadas as unidades de respostas hidrológicas, em inglês, *Hydrologic Response Units* – HRU. As HRUs são formadas pela combinação dos usos do solo, tipos de solos e declividade. Em outras

palavras, as HRUs são áreas que possuem em comum características do uso e cobertura da terra, tipos de solo e declividade, ou seja, cada combinação diferente entre a uso e cobertura da terra, tipo de solo e declividade irá gerar uma (HRU) *Hydrologic Response Unit* diferente.

4.4.4 Tipos de solo da bacia

A distribuição espacial dos solos foi elaborada tomando como base o mapa pedológico do estado da Paraíba (AESAs, 2015), foram encontrados oito tipos de solos na bacia do Rio Taperoá (Tabela 8). A Figura 7 expõe a distribuição espacial dos tipos de solos ao longo da bacia.

Tabela 8 - Tipos e informações básicas dos solos existentes na bacia do Rio Taperoá

Tipo de solo	Área (km ²)	Área (%)	Descrição
Neossolo Litólico	1994,77	35,20	solo constituído, em grande parte, por fragmentos de rocha maiores que 2 mm, apresentando contato direto entre o horizonte A e o C; normalmente não ultrapassam 50 cm de profundidade
Luvissolo	1458,26	25,73	solo formado por material mineral, compreendendo horizonte B textural com alta saturação de bases e argilas de alta atividade
Planossolo	918,79	16,21	solo apresentando horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico (pouco permeável), constituído por material mineral
Neossolo Regolítico	790,59	13,95	solo com horizonte A sobrejacente ao horizonte C, podendo haver horizonte Bi com espessura menor que 10 cm
Neossolo Flúvico	289,08	5,10	solo originário de sedimento aluvial de caráter flúvico
Vertissolo	131,61	2,32	solo com horizonte vértico variando entre 25 e 100 cm de profundidade e com aspectos texturais insuficientes para caracterizar um horizonte B textural
Cambissolo	84,03	1,48	solo formado por material mineral com horizonte B incipiente abaixo da maioria dos horizontes superficiais
Latossolo	0,33	0,01	solo que apresenta horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A

Fonte: AESA (2015) e EMBRAPA (2006).

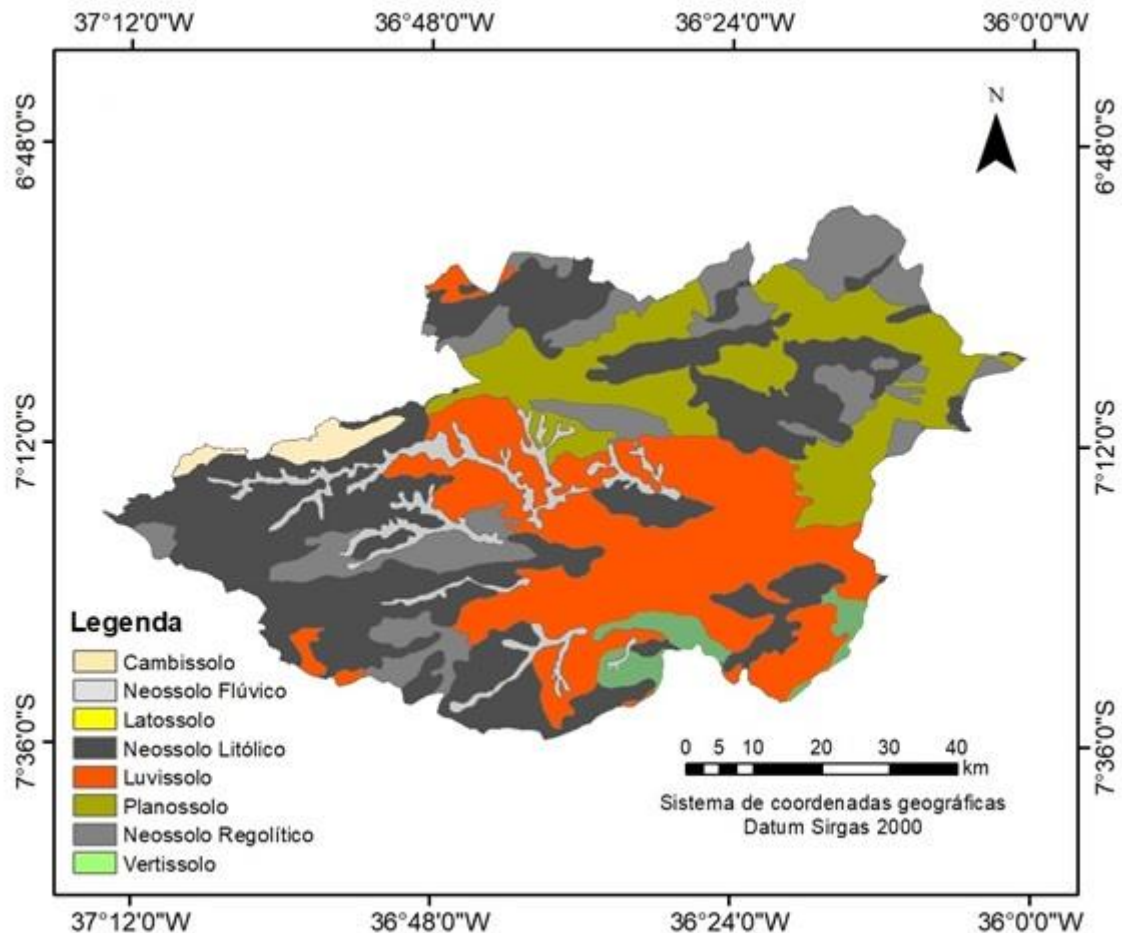


Figura 7 - Tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Taperoá.

4.4.5 Cobertura da terra na bacia

Os usos do solo podem ser entendidos como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem, sendo um fator importante para o estudo dos processos hidrossedimentológicos. Esse parâmetro está ligado com a situação da cobertura superficial a qual o terreno está submetido, influenciando diretamente na dinâmica da vazão e da erosão. Os usos do solo da bacia do Rio Taperoá foram estabelecidos a partir de imagens de satélite que permitiram realizar o mapeamento das classes de uso do solo identificadas em toda bacia.

Neste estudo foram definidos uso e cobertura da terra para quatro momentos: (a) 1980, (b) 1990, (c) 1999, e (d) 2002. Os mapas de uso e cobertura da terra para cada um desses anos foram elaborados utilizando imagens do satélite LANDSAT 02, 05 e 07 e a

classificação supervisionada pelo método Máxima Verossimilhança (MAXVER). O método supervisionado MAXVER permite que o pesquisador selecione as áreas conhecidas de uso e cobertura da terra na imagem.

Esse método de classificação é um método estatístico que utiliza uma classificação *pixel a pixel* mais comum. Esse método considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Esse método foi escolhido pelo fato de se tratar de uma área de grande extensão territorial, pela dificuldade na interpretação da vegetação do tipo caatinga, e pelas resoluções espaciais das imagens não permitirem uma visualização mais acurada do terreno.

As imagens de satélite foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e algumas características das imagens podem ser vistas na Tabela 9. A classificação dos usos do solo para o ano de 1980 foi realizada através de um mosaico de duas imagens orbitais pelo fato do tamanho da cena da imagem do Satélite landsat2, as imagens disponíveis para a área de estudo foram as descritas na Tabela 9. Para a classificação do uso do solo dos demais anos (1990, 1999 e 2002) fez-se o uso de imagens de satélite dos seus respectivos anos, também obtidas no INPE.

Tabela 9 - Informações sobre as imagens utilizadas na classificação do uso e cobertura da terra

Data	Satélite	Sensor	Órbita	Ponto	Bandas	Resolução
02/08/1980	Landsat 2	MSS	230	65	4-6-5 (RGB)	80 m
09/10/1981	Landsat 2	MSS	231	65	4-6-5 (RGB)	80 m
18/06/1990	Landsat 5	TM	215	65	3-4-2 (RGB)	30 m
08/04/1999	Landsat 5	TM	215	65	5-4-3 (RGB)	30 m
13/07/2002	Landsat 7	TM	215	65	3-4-2 (RGB)	30 m

Para a criação dos mapas de uso e cobertura da terra foi utilizado o *software* SPRING (CÂMARA et al., 1996). Após a elaboração do banco de dados foi necessário criar um projeto onde foi inserido o limite geográfico da área em estudo, a projeção cartográfica do trabalho, o sistema de projeção e o modelo da terra e parâmetros de hemisfério, latitude e longitude de origem e paralelos padrão. Para o projeto da bacia do Rio Taperoá no SPRING foi escolhido o sistema de projeção UTM, com *datum* horizontal SIRGAS 2000, com origem no meridiano de 39°00'00'' Oeste de Greenwich, o que equivale à zona 24. Os limites geográficos para esse estudo foram as coordenadas métricas 669866 e 851229 mE e 9152639 e 9258902 mN.

Com o projeto criado e ativado, foi realizada a etapa de geração dos modelos de dados, pois para inserir qualquer dado no SPRING, obrigatoriamente, é necessário a definição dos diferentes tipos de dados que serão manipulados, ou seja, a definição do modelo de dados.

Para o banco de dados da bacia do Rio Taperoá, os mapas do uso e cobertura da terra são temáticos, por se referirem a dados que classificam uma posição geográfica quanto a um determinado tema. Com a imagem de satélite em mãos foi realizado o registro da imagem, ou seja, o georreferenciamento da imagem, estabelecendo uma relação entre as coordenadas da imagem e as coordenadas conhecidas, obtendo-se assim uma maior precisão para a interpretação.

Ainda com o *software* SPRING foi possível fazer a transformação das imagens de mapas pré-existentes da extensão *TIFF-Tagged Image File Format* para a extensão nativa do SPRING, o *GRIB Gridded binary*, um formato de valores de ponto de grade expresso no modo binário, para dar início a criação dos mapas temáticos.

Para iniciar a interpretação e análise do uso e cobertura da terra da bacia do Rio Taperoá foram definidas cinco classes baseadas em trabalho de campo e adaptado de trabalhos como o Dantas (2018), a saber: (a) corpos hídricos, (b) vegetação arbórea/arbustiva, (c) vegetação arbustiva, (d) vegetação arbustiva herbácea, e (e) vegetação herbácea (Tabela 10).

Tabela 10 - Descrição das classes cobertura da terra utilizadas neste estudo

Classes	Descrição
Corpos hídricos	Lagos naturais e artificiais
Vegetação arbórea arbustiva	Associação de uma vegetação com predominância de árvores em meios a arbustos
Vegetação arbustiva	Vegetação predominantemente com arbustos
Vegetação arbustiva herbácea	Associação de uma vegetação predominantemente com arbustos, ervas, gramíneas, pasto e agriculturas
Vegetação herbácea	Vegetação predominantemente com ervas, gramíneas ou pouca vegetação, solo expostos e áreas antrópicas

Para se conhecer a acurácia da aplicação da classificação das imagens utilizadas foi aplicado o índice Kappa (LANDIS e KOCH, 1977). Esse coeficiente foi escolhido porque a área de estudo é grande e pela dificuldade em interpretar o tipo de vegetação da

caatinga a partir da resolução espacial das imagens. Esse método é um índice de comparação de mapas amplamente utilizado na literatura que avalia a precisão do modelo em termos do número de células devidamente classificadas em conjunto com a localização das células. Segundo Landis e Koch (1977), esse índice avalia o grau de concordância entre as imagens classificadas e a estimada. O índice Kappa pode ser obtido pela seguinte equação (COHEN, 1960):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (7)$$

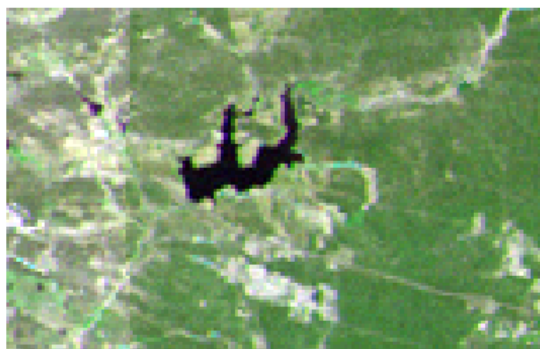
sendo I = índice Kappa, x_{ii} = o valor na linha i e coluna i ; x_{i+} = a soma da linha i ; x_{+i} = a soma da coluna i da matriz; n = número total de observações e c = número total de classes.

A relação do coeficiente Kappa adotada neste estudo para avaliação da qualidade entre o mapa simulado e o classificado para o ano de t_3 (2002), baseada no Kappa, segundo Landis e Koch (1977), define como sendo: (a) péssima: < 0 ; (b) ruim: $0-0,2$; (c) razoável: $0,21-0,4$; (d) boa: $0,41-0,6$; (e) muito boa: $0,61-0,8$; e (f) excelente: $0,81-1,0$.

Para quantificar a concordância entre as imagens classificadas e a amostra conhecida na imagem, calculou-se o coeficiente Kappa para uma área amostral em cada imagem com dimensões de 274 linhas $\times$ 420 colunas, totalizando uma área de 123 km² (Figura 8).

Posteriormente, uma malha de 60 *pixels* de amostra conhecidos foi criada em cada imagem e, em seguida, uma matriz de confusão das amostras e os pontos classificados da imagem foram gerados. Em seguida, a concordância entre os pares foi calculada com base na matriz de confusão; a amostra aleatória e a soma das probabilidades também foram calculadas (MA e REDMOND, 1995; SANTANA et al., 2014).

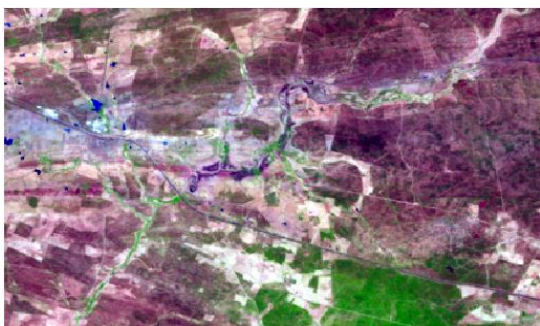
(a) 1980



(b) 1990



(c) 1999



(d) 2002

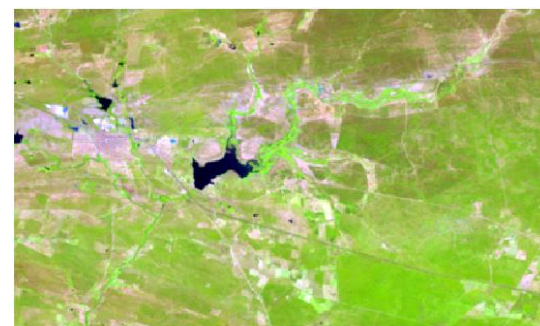


Figura 8 - Área amostral para testar a concordância entre as imagens classificadas e a amostra conhecida para imagens dos anos 1980, 1990, 1999, e 2002.

4.5 Descrição dos Modelos e Cenários Climáticos Futuros Utilizados

Neste trabalho, foram utilizados dados climatológicos de três cenários (A1B, A2 e B1) de emissão de gases de efeito estufa, do Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões (SRES) A1B, A2 e B1 do IPCC AR4, esse relatório foi escolhido devido a solidez científica e reprodutibilidade do estudo, como apresentados e descritos anteriormente neste estudo. As simulações futuras para as vazões realizadas para a bacia do Rio Taperoá, levaram em consideração o período de precipitação de 2046 a 2064 e o período de análise da cobertura da terra para o ano de 2060. Esses dados foram usados para representar as condições climáticas futuras para a bacia do Rio Taperoá.

Neste estudo, as projeções climáticas futuras sob os três cenários de emissões foram baseadas nos GCMs: (a) CNRM-CM3 e (b) MIROC3 (Tabela 11). Ambos os modelos possuem resolução espacial de $2,8 \times 2,8^\circ$, e incluem temperatura média mensal e precipitação para o período de referência de 1960 a 1990 e o período futuro de 2046 a 2064.

Tabela 11 - Modelos climáticos globais utilizados neste estudo.

Modelo climático	País	Nome	Instituição
CNRM-CM3	França	CNRM-CM3	Centre National de Recherches Météorologiques, Météo France
MIROC-HI	Japão	MIROC3.2	Center for Climate System Research, University of Tokyo

O motivo pelo qual foram escolhidos os modelos CNRM-CM3 e MIROC-HI do 4º relatório do IPCC (AR4) foi porque esses modelos vêm sendo utilizados em diversos estudos de modelagem hidrológica e do clima na América do Sul (VALVERDE e MARENGO, 2010).

4.6 Método de *Downscaling* e Correção de Viés (bias)

Os dados de grade dos MCG usados, neste estudo, para prever a precipitação tendem a simular muitos eventos de precipitação de intensidade muito baixa em relação a estações pluviométricas, como constatado por Ines e Hansen (2006). Assim, a correção de viés foi calculada assumindo fatores multiplicativos para a precipitação, que permitiu que os dados de precipitação fossem corrigidos (YANG et al., 2005).

Neste trabalho, o algoritmo de correção de viés foi utilizado para estabelecer a relação entre dados diários observados e simulados pelo MCG na série histórica, como usado por Gao et al. (2019). Primeiramente, uma técnica de mapeamento de distribuição dos dados estabelece uma relação entre a precipitação diária observada e a precipitação simulada pelo MCG no período histórico utilizado.

Em seguida, o índice de precipitação em percentis entre os dados observados e os dados simulados pelo MCG são então multiplicados para a precipitação diária futura para cada percentil. Especificamente, as precipitações diárias ajustadas para o período futuro são derivadas usando as seguintes equações:

$$P_{adj,fut,Q} = P_{GCM,fut,Q} \times (P_{obs,Q}/P_{GCM,ref,Q}) \quad (8)$$

sendo $P_{obs,Q}$ é observado precipitação diária, $P_{GCM,ref,Q}$ é percentual a precipitação simulada pelo MCG no período histórico utilizado, $P_{GCM,fut,Q}$ é a precipitação diária futura.

4.7 Cobertura da Terra Estimada Para 2060

Para a predição do uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2060 foi utilizado o algoritmo *Multilayer Perceptron* (MLP) (HAYKIN, 2001), disponível no módulo *Land Change Modeler* do software IDRISI TerrSet. Neste estudo, a modelagem dinâmica foi composta por três etapas principais: (a) previsão do potencial de transição, (b) simulação e (c) validação.

Para a etapa de previsão do potencial de transição foram realizadas as análises das principais mudanças no uso e cobertura da terra da bacia entre t_1 (1990) e t_2 (1999), necessárias para a definição das classes de transição. Em seguida, foram definidas as classes de transição, testando a seleção de variáveis explanatórias pelo teste de Cramer.

Neste estudo, foram consideradas, na modelagem dinâmica do uso e cobertura da terra, as variáveis que apresentaram valores de Cramer $> 0,15$, valor esse recomendado por Hamdy et al. (2017). Assim, foram testadas as seguintes variáveis explanatórias: (a) altimetria, (b) declividade, (c) vias de circulação, (d) cursos d'água, (e) distâncias dos cursos d'água, (f) distância das vias de circulação, (g) transição da vegetação arbórea para vegetação arbórea arbustiva, (h) transição da vegetação herbácea para vegetação arbustiva herbácea, (i) mudanças entre 1990 e 1999 e (j) probabilidade de mudanças entre 1990 e 1999.

Esse teste varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a relação entre a variável explanatória e as classes de transição definidas. O teste de Cramer é uma análise estatística não paramétrica, ou seja, é aplicável independente da distribuição das variáveis. Essa análise é utilizada para medir a força de associação entre variáveis (LIEBERTRAU, 1983). Esse teste é obtido pela Eq. 9:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (9)$$

em que: χ^2 = coeficiente Qui-quadrado (Eq. 10):

$$\chi^2 = \frac{(O-E)^2}{2} \quad (10)$$

sendo: V = índice V de Cramer; n = tamanho da amostra; q = menor valor das linhas e colunas da imagem do uso e cobertura da terra; O = frequência observada para uma categoria e E = frequência esperada na categoria correspondente.

Para avaliar as expectativas de mudança através da matriz de probabilidade de transição de t_2 para t_3 foi utilizada também cadeia de Markov (CM). As CM traçam processos estocásticos usando:

$$\Pi(t+1) = p^n \times \Pi(t) \quad (11)$$

no qual: $\Pi(t)$ = é o estado do sistema no tempo t ; $\Pi(t+1)$ = é o estado do sistema após o intervalo $(t+1)$ e p^n = representa os estados possíveis de acontecer, demonstrado através de matriz de possibilidade de transição.

A etapa de validação da modelagem para o ano t_3 (2002) simulado foi realizada no próprio módulo LCM do IDRISI TerrSet utilizando o índice kappa. A Figura 9 apresenta o fluxograma da metodologia empregada neste estudo.

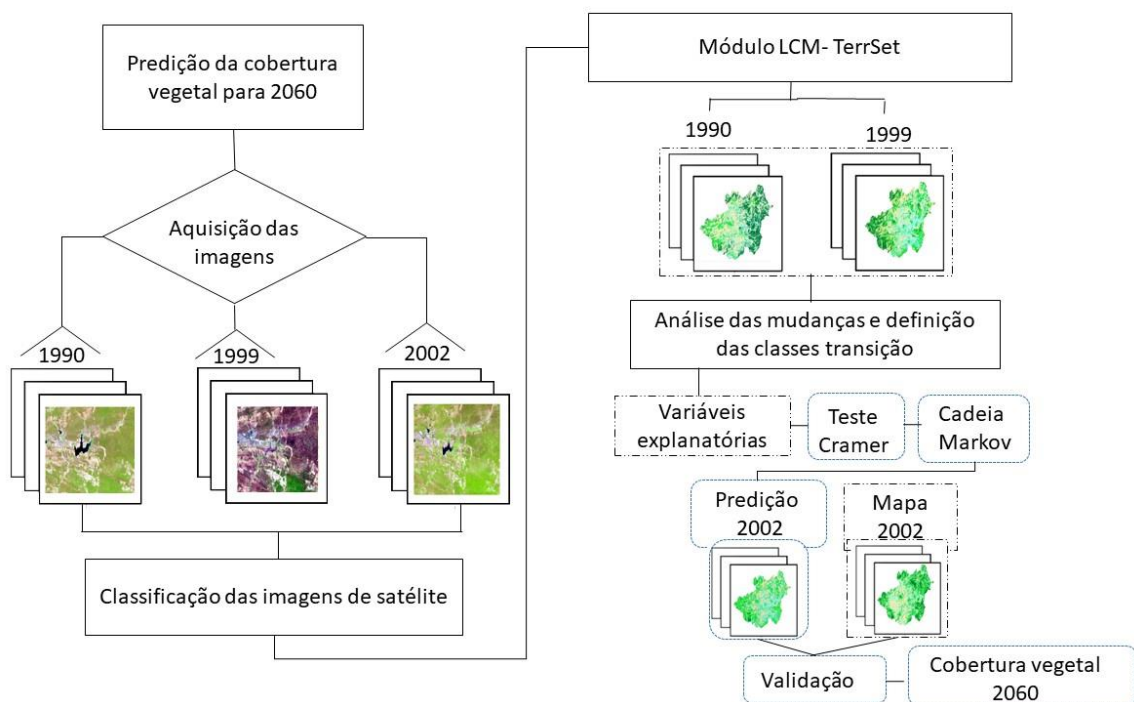


Figura 9 - Fluxograma da metodologia utilizada para estimar os usos do solo no LCM

Para testar o quanto a aprendizagem do multilayer perceptron (MLP) do Modelagem de Detecção de Mudanças foi satisfatória foram usados os métodos estatísticos *Total operating characteristic* (TOC) e o *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e a *Area Under The Curve* (AUC). O TOC e o ROC são métodos gráficos para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnóstico e/ou predição utilizados em algoritmos de aprendizado. Com esses métodos torna-se possível estimar a taxa de verdadeiro positivo e a taxa de falso positivo pelas estimativas de uso e cobertura da terra gerados pelo modelo LCM (PRATI et al., 2008). Outra análise relacionada a curva ROC é que a ordenação dos exemplos está relacionada com a área abaixo da curva AUC, e a área abaixo da curva varia de 0 a 1, e o limiar da classe é 0,5. Acima desse limite, o algoritmo classifica em uma classe, e abaixo desse limite na outra classe, sendo uma maneira de resumir a curva ROC em um único valor, somando todos os limites ROC (PRATI et al., 2008).

4.8 Modelagem da cobertura da terra futuro na bacia do Rio Taperoá

A Tabela 12 mostra as variáveis explanatórias testadas a partir do teste V de Cramer para a modelagem do uso e cobertura da terra em t_4 (2060) na bacia do Rio Taperoá. As variáveis explanatórias consideradas na modelagem foram: (a) transição da vegetação arbórea para vegetação arbórea arbustiva, (b) transição da vegetação herbácea para vegetação arbustiva herbácea, (c) mudanças entre 1990 a 1999 e (d) probabilidade das mudanças entre 1990 a 1999.

Tabela 12 - Resultado do teste V de Cramer para as variáveis explanatórias testadas na modelagem do uso e cobertura da terra para a bacia do Rio Taperoá.

Variável explanatória	Teste V de Cramer
Transição da vegetação arbórea para vegetação arbórea arbustiva	0,27
Transição da vegetação herbácea para vegetação arbustiva herbácea	0,20
Mudanças entre 1990 a 1999	0,81
Probabilidade das mudanças entre 1990 a 1999	0,35
Altimetria	0,08
Declividade	0,04
Vias de circulação	0,07
Cursos d'água	0,03
Distâncias dos cursos d'água	0,09
Distância das vias	0,04

A variável mudança entre 1990 a 1999 apresentou o maior valor para o teste de Cramer. Esse resultado indicou que as mudanças ocorridas nos anos de 1990 e 1999 na área de estudo foram significativas para a modelagem e que existe maior possibilidade da permanência do comportamento das mudanças no uso e cobertura da terra para o cenário futuro. No entanto, para a variável vias de circulação foi encontrado o menor resultado quanto ao teste de Cramer, o que representou baixa significância dessa variável para a modelagem do uso e cobertura da terra na bacia.

4.9 Calibração e Validação Automática dos Parâmetros do Modelo SWAT

Em virtude de existirem diversas incertezas na simulação hidrológica, que são causadas por erros na variável de entrada, limitação na estrutura do modelo e erros nas estimativas dos parâmetros calibráveis pelo modelo (TUCCI, 2005), todas ocorrendo durante o processo de calibração, neste estudo optou-se por utilizar o ajuste automático dos parâmetros.

A calibração e validação do modelo SWAT foi realizada através da comparação entre as vazões mensais simuladas pelo modelo, e as vazões mensais observadas na estação fluviométrica de Poço de Pedra, referentes aos períodos de 1973 a 1985 (calibração), e 1986 a 1990 (validação).

Os dados de sedimentos não foram calibrados, pois não existem dados observados relacionados à sedimentos na bacia. Nessa etapa de calibração optou-se pela calibração automática utilizando o *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP), desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). Esse programa é de domínio público, utilizado para a calibração automática dos parâmetros do modelo SWAT, levando-se em consideração a aproximação entre os volumes observados e estimados de vazão. O SWAT-CUP analisa também a sensibilidade dos parâmetros mais sensíveis na etapa de calibração utilizando um algoritmo de análise.

A calibração foi realizada para os parâmetros que mais influenciaram diretamente na vazão a partir do método de autocalibração, chamado SUFI-2. Para a calibração do modelo foram utilizados 19 parâmetros no programa SWAT-CUP, que mais influenciam na vazão para as condições das bacias existentes no Nordeste brasileiro, como utilizado por

Santos (2015). Os dezenove parâmetros empregados na simulação da vazão podem ser visualizados na Tabela 13.

Os processos de calibração dos parâmetros do modelo foram realizados com 500 iterações, como recomendado pelo manual do programa SWAT-CUP, onde em cada iteração, os valores de cada parâmetro são modificados simultaneamente. No final da calibração são mostrados, para cada iteração, os valores de: (a) cada parâmetro otimizado, (b) valores calculados para os índices estatísticos, (c) valores simulados para a variável indicada (nesse caso a vazão), e (d) a iteração que apresentou o melhor ajuste.

Tabela 13 - Parâmetros adotados pelo modelo SWAT na simulação de vazão.

Parâmetros	Descrição	Rank
Alpha_bf	Coeficiente do fluxo de base	1
Biomix	Eficiência biológica	2
Canmx	Máxima interceptação da cultura	3
Cn2	Curva número na condição II de umidade	4
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal	5
Ch_N2	Coeficiente de Manning para o canal	6
Epc0	Fator de crescimento da cultura	7
Esco	Coeficiente de compensação de evaporação de água do solo	8
Revapmn	Tempo de retorno da água do aquífero para o canal	9
Gw_delay	Tempo para a recarga do aquífero	10
Gw_revap	Tempo de atraso da água subterrânea	11
Gwqmn	Profundidade limiar da água no aquífero raso exigido para que o fluxo de retorno ocorra (mm H ₂ O)	12
Rchrg_dp	Fração de percolação do aquífero profundo	13
Slsbbsn	Comprimento médio da encosta na sub-bacia	14
Surlag	Coeficiente de lag do escoamento superficial	15
Sol_alb	Albedo do solo úmido na primeira camada do solo.	16
Sol_awc	Capacidade de água disponível	17
Sol_k	Condutividade hidráulica saturada na primeira camada de solo	18
Sol_z	Profundidade da camada	19

Posteriormente a calibração dos parâmetros do modelo no programa SWAT-CUP se faz necessário o retornar ao ArcSWAT para a inserção dos valores calibrados para os parâmetros escolhidos na calibração, os parâmetros de escoamento superficial.

A partir da execução do modelo através da interface do programa ArcSWAT com os novos valores dos parâmetros calibrados, temos os resultados finais da modelagem. Os

resultados disponibilizados pelo ArcSWAT através do modelo SWAT podem ser organizados nas formas de tabelas, gráficos e mapas.

4.10 Índices de Desempenho Utilizados na Modelagem

Para a análise da comparação entre as vazões observadas e simuladas foram utilizados dois métodos estatísticos: o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS (NASH e SUTCLIFFE, 1970), e o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2), estes métodos já são utilizados em diversos estudos (ABBASPOUR et al., 2015; GOLMOHAMMADI et al., 2017; MORIASI et al., 2007; PEREIRA et al., 2016).

O NS analisa o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, no qual Nash = 1 indica um ajuste perfeito. Este coeficiente é calculado pela Equação 12.

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \right) \quad (12)$$

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

O R^2 calcula a associação linear entre duas variáveis, também variando de $-\infty$ (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela Equação 13.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (13)$$

no qual, x_i os valores observados; x_m a média dos valores observados; y_i os valores calculados pelo modelo; y_m a média dos valores calculado pelo modelo; e n o número de eventos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Evolução da Cobertura da Terra na Bacia do Rio Taperoá Entre 1980 e 2002

A bacia do Rio Taperoá possui a cobertura de sua superfície marcada pela presença de espécies vegetais típicas do bioma Caatinga e pequenas áreas úmidas na bacia, caracterizadas pela presença de água nos pequenos açudes e poucos reservatórios de água usados para o consumo humano, que ficam secos ou com pequena quantidade de água durante grande parte do ano (SEABRA et al., 2014).

Francisco et al. (2012) relataram, em uma análise espaço-temporal da vegetação nessa bacia, falsas mudanças originadas pela variabilidade da umidade no solo, e ressaltaram que, quanto maior for a área estudada, mais desafiador se torna o controle do estudo. Nesse difícil cenário, este estudo busca mapear o uso e cobertura da terra pretérita e a futura, além estimar os processos hidrossedimentológicos decorrentes das alterações da cobertura da superfície nessa bacia.

As Figuras 10 –13 mostram as quatro imagens classificadas do uso e cobertura da terra para os anos analisados (1980, 1990, 1999 e 2002). Para se analisar a acurácia do ajuste entre as imagens classificadas foi aplicado o coeficiente Kappa para ambas as imagens e os resultados obtidos foram o seguinte: (a) 1980 = 0,85, (b) 1990 = 0,78, (c) 1999 = 0,71, e (d) 2002 = 0,72. Esses resultados mostram que todos os valores foram > 0,7 e demonstram uma concordância para cada ano analisado, o que pode ser considerado como muito bom ou substancial entre os dados analisados.

A Figura 10 apresenta as classes de uso e cobertura da terra da bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980. A Tabela 14 apresenta as áreas classificadas e as porcentagens das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980. Após a mensuração e a análise das áreas foi possível constatar que na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980, a área de vegetação arbustiva foi de 2.084,78 km² (36,79% da bacia), enquanto a classe de vegetação arbórea arbustiva apresentou uma área de 1.996,27 km² (35,22% da bacia).

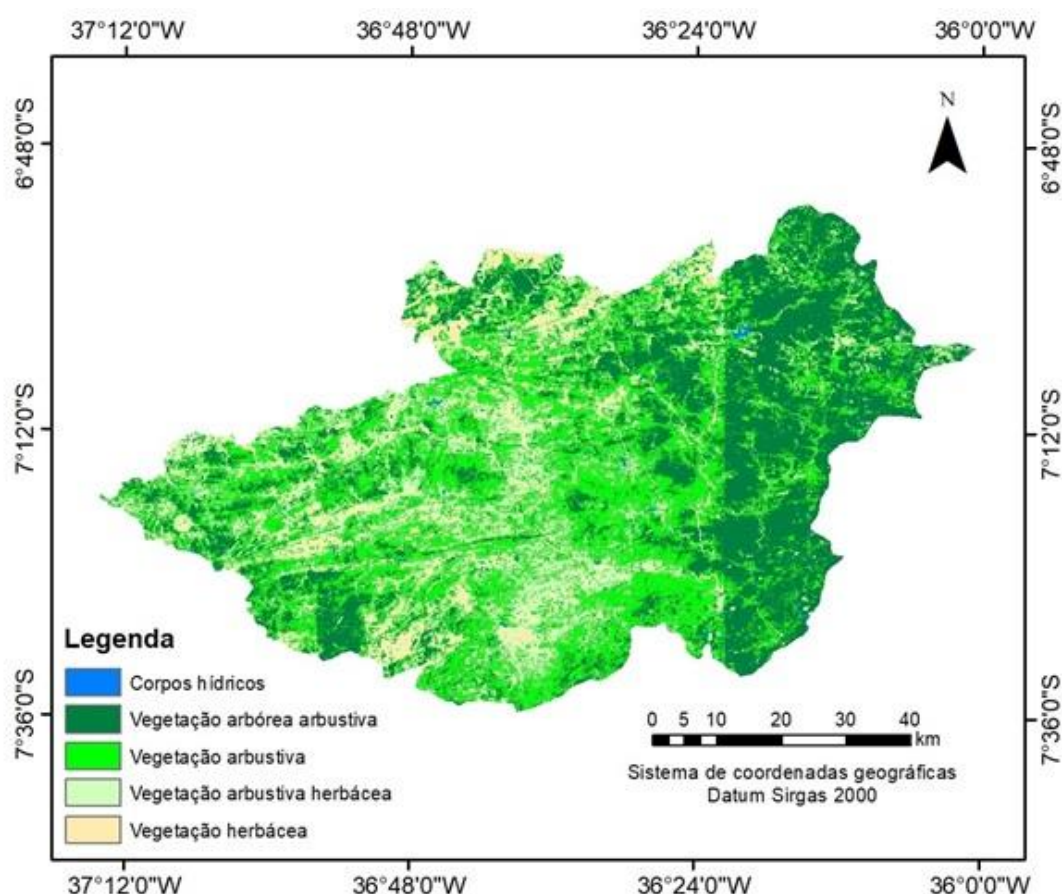


Figura 10 - Classes de uso e uso e cobertura da terra da bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980.

Tabela 14 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1980.

Uso e cobertura da terra	Área classificada em 1980 (km ²)	Porcentagem
Corpos hídricos	26,34	0,46
Vegetação arbórea arbustiva	1.996,27	35,22
Vegetação arbustiva	2.084,78	36,79
Vegetação arbustiva herbácea	1.074,09	18,95
Vegetação herbácea	485,85	8,57
Total	5.667,47	100,00

Como esperado, esses dados mostram que a cobertura da terra na bacia é composta majoritariamente por vegetação não exuberante, ou seja, espécies de pequeno porte que são típicas do bioma Caatinga. Segundo Chaves et al. (2013) e Guimarães (2008), os estratos arbóreos nessa região se confundem bastante com o vasto espectro de respostas de vegetação desse bioma. Chaves et al. (2013) ressaltam ainda que somente os bosques mais vigorosos constituídos por algarobas, que ocorrem ao longo dos canais de

drenagem podem ser identificados, pois apresentam maior vigor da vegetação. A Tabela 15 apresenta a área classificada e a porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990. A Figura 11 mostra a distribuição geográfica das áreas classificadas de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990.

Tabela 15 - Área classificada e a porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990.

Uso e cobertura da terra	Área classificada em 1990 (km²)	Porcentagem
Corpos hídricos	14,66	0,26
Vegetação arbórea arbustiva	571,69	10,09
Vegetação arbustiva	1.408,75	24,86
Vegetação arbustiva herbácea	2.186,48	38,58
Vegetação herbácea	1.485,35	26,21
Total	5.667,47	100,00

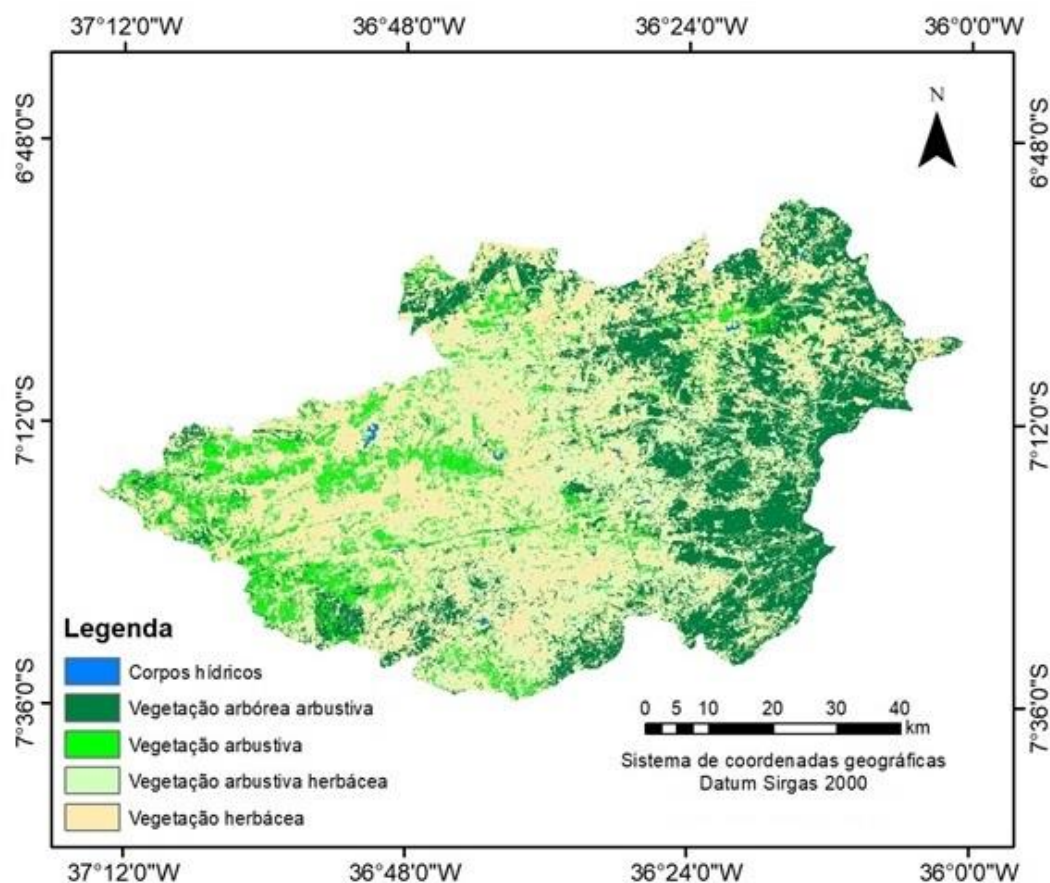


Figura 11 - Classes de uso e cobertura da terra bacia do Rio Taperoá para o ano de 1990.

Com base nas áreas em hectares das classes identificadas na bacia para o ano de 1990, é possível perceber que as coberturas vegetais mais representativas nesse ano

também foram as classes vegetação arbustiva (com um sutil aumento em relação ao ano de 1980) e vegetação arbustiva herbácea (com uma maior diminuição quando comparada ao ano anterior). Porém, nota-se ainda que são as principais classes de uso e cobertura da terra que recobrem a superfície da bacia.

A Figura 12 mostra as classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999. A Tabela 16 apresenta as áreas classificadas e a porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999. Para o ano de 1999 constata-se uma alteração nas principais classes de uso e cobertura da terra na bacia, em que as principais classes passaram a ser a vegetação herbácea, apresentando uma área de 1.953,09 km² (34,46% da bacia), em segundo lugar, a classe vegetação arbustiva herbácea 1.490,04 km², o que representa 26,29% da área total da bacia, e em terceiro lugar, a classe vegetação arbustiva, que possui aproximadamente 24% da área da bacia. Observa-se que a classe de vegetação herbácea foi a mais representativa, ocorrendo em praticamente todas as porções da bacia, enquanto a classe vegetação arbustiva herbácea está presente nas porções leste e central da bacia.

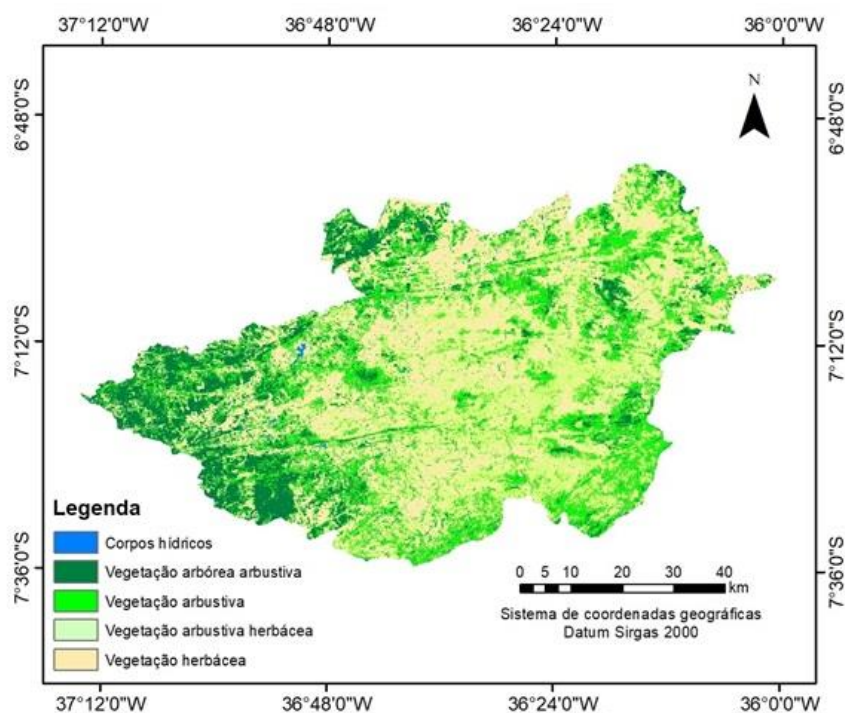


Figura 12 - Classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999.

Tabela 16 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 1999.

Uso e cobertura da terra	Área classificada em 1999 (km²)	Porcentagem
Corpos hídricos	16,5	0,29
Vegetação arbórea arbustiva	829,6	14,64
Vegetação arbustiva	1.378,22	24,32
Vegetação arbustiva herbácea	1.490,04	26,29
Vegetação herbácea	1.953,09	34,46
Total	5.667,47	100,00

Entre as mudanças do uso e cobertura da terra de 1999 em relação a 1990, destaca-se no uso e cobertura da terra de 1999 uma mudança significativa na classe de vegetação arbórea arbustiva para vegetação arbustiva quando comparado com o mapa de 1990. Essa variação foi identificada na porção oeste da bacia, no entanto, também foi percebido a transição da classe de vegetação arbustiva para a classe de vegetação arbórea arbustiva.

A Figura 13 apresenta as classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002. Percebe-se uma maior concentração da classe vegetação herbácea na porção central da bacia e um avanço da mesma na direção oeste. Na porção leste observa-se predominância da classe da vegetação arbustiva e diminuição das classes de vegetação herbácea e vegetação arbustiva herbácea e à oeste verificou-se perda da classe vegetação arbórea arbustiva e aumento da área Vegetação arbustiva quando comparado ao mapa classificado para 1999.

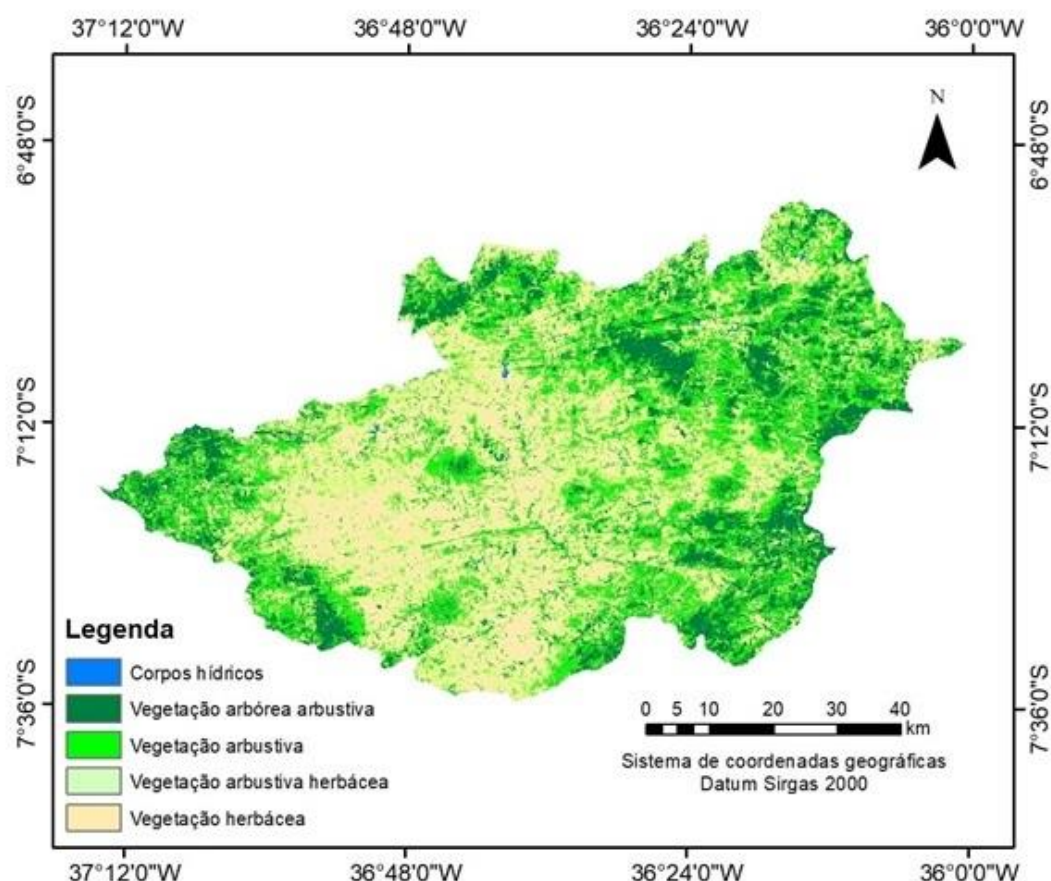


Figura 13 - Classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.

A Tabela 17 mostra as áreas em km² e as porcentagens das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002. As classes temáticas apresentaram os seguintes resultados: (a) corpos hídricos = 11,07 km² (0,20%), (b) vegetação arbustiva herbácea = 1.350,72 km² (23,83%), (c) vegetação herbácea = 1.713,16 km² (30,23%), (d) vegetação arbustiva = 1.577,45 km² (27,83%) e (e) vegetação arbórea arbustiva = 1.015,07 km² (17,91%).

Tabela 17 - Área classificada e porcentagem das classes de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.

Uso e cobertura da terra	Área classificada em 2002 (km ²)	Porcentagem
Corpos hídricos	11,07	0,20
Vegetação arbórea arbustiva	1.015,07	17,91
Vegetação arbustiva herbácea	1.350,72	23,83
Vegetação arbustiva	1.577,45	27,83
Vegetação herbácea	1.713,16	30,23
Total	5.667,47	100,00

A Tabela 18 mostra as mudanças nas áreas de uso e cobertura da terra. Percebe-se que as classes vegetação arbustiva herbácea e vegetação herbácea aumentaram substancialmente, enquanto as classes corpos hídricos, vegetação arbórea arbustiva, e vegetação arbustiva diminuíram entre 1980 e 2002, aproximadamente 58%, 49%, e -24%, respectivamente.

Tabela 18 - Uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá nos anos de 1980 a 2002.

Classes	1980	1990	1999	2002	Varição
	Área em km ²				1980-2002 (%)
Corpos hídricos	26,34	14,86	16,5	11,07	-57,97
Veg. arbórea arbustiva	1996,27	571,69	829,61	1.015,07	-49,15
Vegetação arbustiva	2084,78	1.408,95	1.378,22	1.577,45	-24,33
Veg. arbustiva herbácea	1074,09	2.187,68	1.490,04	1.350,72	25,75
Vegetação herbácea	485,85	1.486,35	1.953,09	1.713,16	252,61

Analisando os mapas de uso e cobertura da terra obtidos, verificou-se que a classe Corpos hídricos apresentou uma leve diminuição de 1980 para 1990 e em seguida um aumento de área no ano 1990 para 1999, e logo em seguida uma diminuição em 2002. A vegetação arbórea arbustiva mostrou uma diminuição de 1980 para 1990 e em seguida um aumento para os três períodos consecutivos, enquanto a vegetação arbustiva apresentou uma diminuição de 1980 para 1990, e um aumento entre 1990 e 2002. A vegetação arbustiva herbácea teve um aumento de 1980 para 1990 e uma diminuição consecutiva nos três períodos seguintes e a vegetação herbácea apresentou um aumento do primeiro até o terceiro período e uma leve diminuição no terceiro período.

Na comparação das classes entre os anos estudados pode-se perceber que de 1980 para 1990 a classe de uso que mais teve alteração foi a vegetação arbórea arbustiva, com um ganho de área de 1180,69 km² (259,30 %) de sua área original. A segunda classe que sofreu mais influência foi a vegetação herbácea, que perdeu 1152,78 km² (cerca de 52,20% de sua área). A classe de solo exposto foi a categoria quantificada com a variação a qual ter um ganho de 265,75 km², um aumento de 31,68% em relação a sua área original.

Por outro lado, a área ocupada por vegetação arbórea arbustiva teve uma diminuição de 49,15% em relação a mesma classe em 2002. No entanto, após 1999, a vegetação arbustiva herbácea passou a aumentar, enquanto, a áreas de vegetação arbustiva

diminuiu em 2002, enquanto a classe vegetação arbustiva herbácea diminuiu no período entre 1990 e 1999.

Com relação as mudanças entre o período de 1980 e 2002 na bacia, a vegetação herbácea foi aquela cobertura que apresentou uma maior variação (252,61%), o que representou uma perda de aproximadamente 1.227 km². As outras classes também tiveram perdas de sua área ocupada, como pode ser visto na Tabela 18, sendo a que apresentou a área com maior diminuição foi a classe corpos hídricos (57,97%).

5.2 Modelagem dos Cenários Futuros de Uso e Ocupação da Terra

Para a construção dos cenários futuros de uso da terra foram utilizados os mapas classificados de uso e cobertura da terra de 1990, 1999 e 2002. As Figuras 14 e 15 apresentam os mapas estimados das classes temáticas para o ano de 2002 e 2060, respectivamente. Baseado nos resultados de ambos os mapas, percebe-se um aumento significativo da área ocupada por vegetação arbustiva-herbácea, o que representa uma regeneração do uso e cobertura da terra, baseada em medidas de preservação do bioma caatinga que vem sendo realizadas nos últimos anos.

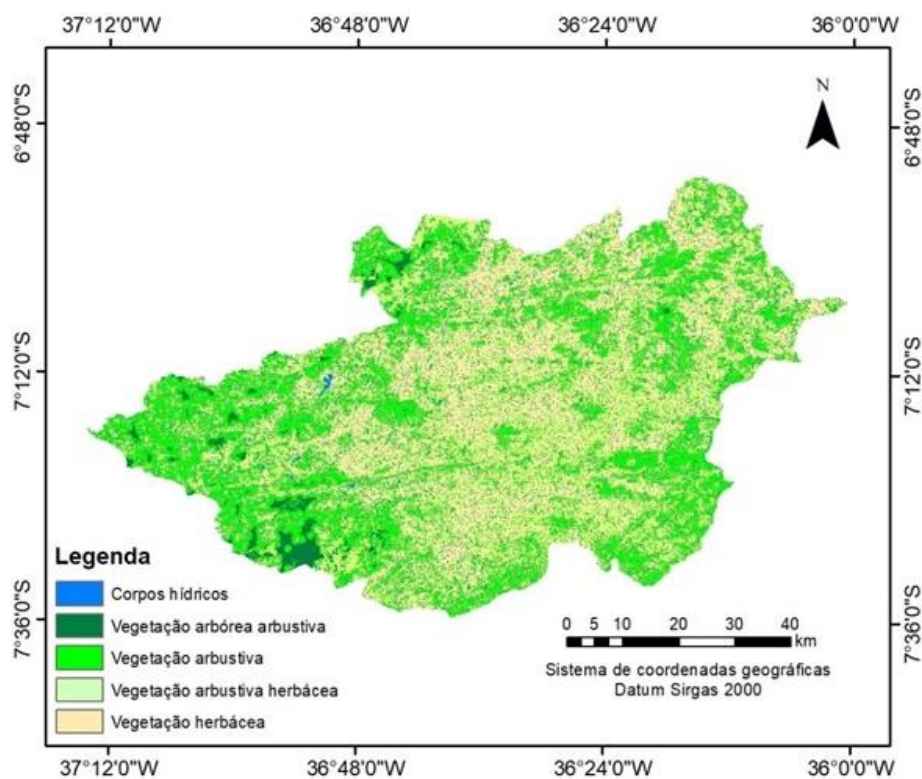


Figura 14 - Classes estimadas de uso e cobertura da terra na bacia do Rio Taperoá para o ano de 2002.

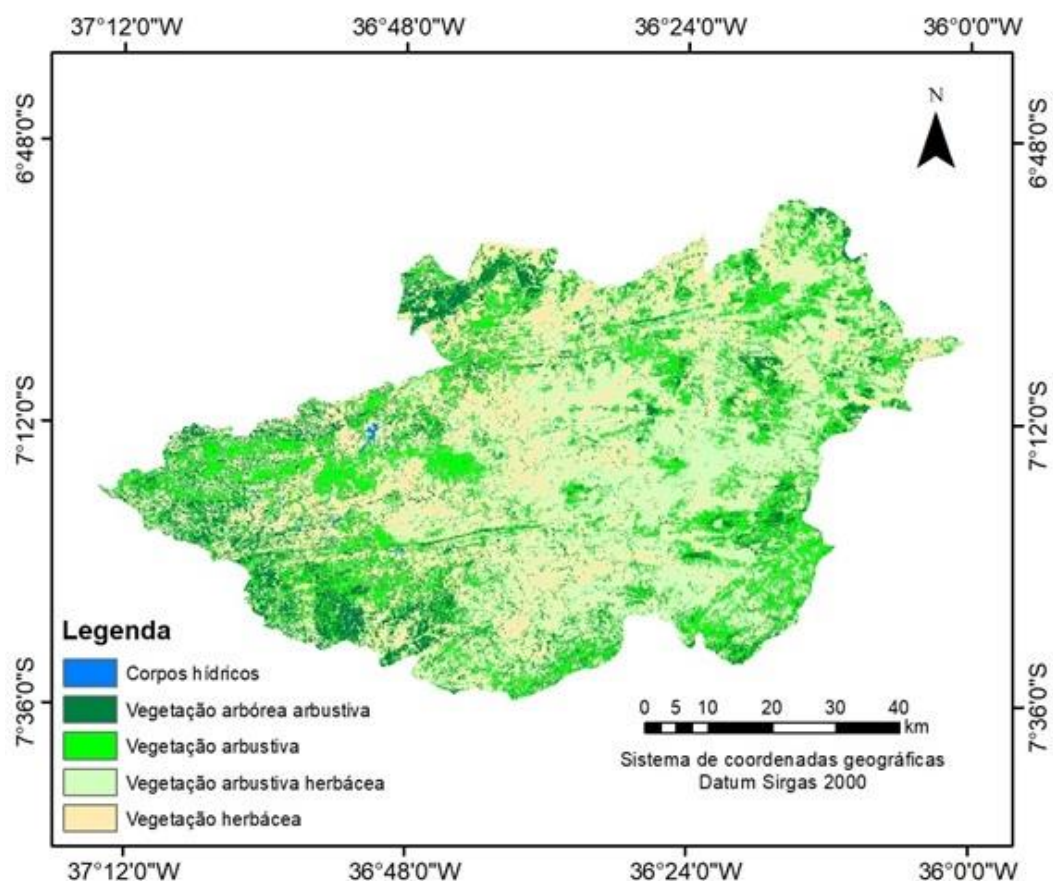


Figura 15 - Classes estimadas de uso e cobertura da terra previstas para a bacia do Rio Taperoá para o ano 2060.

A Tabela 19 mostra a comparação entre as classes de usos e coberturas vegetais para os anos de 2002 (classificado/observado) e estimado para 2060. No que tange os prognósticos realizados pela modelagem usando o LCM para o ano de 2060, a classe vegetação arbustiva herbácea é aquela mais representativa, com uma área de 2.200,74 km², o que representa uma área de 38,83 % da área total da bacia. A segunda classe com a maior representatividade foi a vegetação herbácea, que apresenta um percentual de 25,68% da área total da bacia, i.e., cerca de 1455,46 km², seguido das classes vegetação arbustiva, vegetação arbórea arbustiva, com cerca de 22,95 % e 12,25%, da área da bacia respectivamente (Tabela 19).

Tabela 19 - Matriz de confusão para a previsão de cobertura da terra em 2002

Categoria	Corpos hídricos	Veg. arbórea arbustiva	Veg. arbustiva	Veg. arbustiva herbácea	Veg. herbácea	Total
Corpos hídricos	11220	4722	2846	1856	3748	24392
Veg. Arbórea	1170	546027	204711	151734	167851	1071493
Arbustiva	2413	667308	2209403	327589	196546	3403259
Veg. Arbustiva	2702	252740	652099	1907982	520705	3336228
Herbácea	2610	37183	221787	439922	3339585	4041087
Veg. Herbácea	20115	1507980	3290846	2829083	4228435	11876460
Total						

A Tabela 20 mostra a matriz de mudança do uso e cobertura da terra entre a classificação realizada a partir da imagem de satélite para o ano de 2002 e a previsão do uso e cobertura da terra 2002 realizada pela modelagem usando o LCM. Nessa tabela pode-se observar a porcentagem dos erros de omissão e comissão para a previsão do uso e cobertura da terra do ano de 2002. Esses resultados foram obtidos pela verificação do cruzamento entre uso e cobertura da terra classificada para o ano de 2002 e o uso e cobertura da terra do ano de 2002 prevista pela modelagem do LCM.

A maior omissão foi identificada na classe corpos hídricos, com 54,00% e a menor a classe foi na vegetação herbácea (17,36%). Já para a comissão foi verificado que a classe vegetação arbórea arbustiva foi de 63,79%, enquanto a maior comissão foi identificada na classe vegetação herbácea (21,02%).

Tabela 20 - Erros de omissão e comissão obtidos pela verificação das imagens classificadas

Uso e cobertura da terra	Omissão	Comissão
Corpos hídricos	54,00%	44,22%
Vegetação Arbórea Arbustiva	49,04%	63,79%
Vegetação Arbustiva	35,08%	32,86%
Vegetação Arbustiva Herbácea	42,81%	32,56%
Vegetação Herbácea	17,36%	21,02%

Os resultados obtidos de erro de omissão podem ser considerados satisfatórios entre todas as classes previstas e as identificadas na imagem classificada. Além disso, pode-se notar que os maiores erros de comissão foram obtidos para a classe vegetação Arbórea

Arbustiva (63,79%), um valor que pode ser considerado alto, devido ao fato da maior ocorrência dessa classe na bacia (Tabela 21).

Tabela 21 - Comparação entre as classes de uso e cobertura da terra classificada para o ano de 2002 e a estimada para 2060

Uso e cobertura da terra	Área em km ²		Erro (%)	Área do mapa previsto para 2060 (km ²)	Variação 2002-2060 (%)
	Em 2002	Previsão para 2002			
Corpos hídricos	11,07	14,92	34,78	16,5	10,59
Veg. arbórea arbustiva	1.015,07	622,24	38,70	694,22	11,57
Vegetação arbustiva	1.577,45	1.678,62	6,41	1300,55	-22,52
Veg. arbustiva herbácea	1.350,72	1.807,15	33,79	2200,74	21,78
Vegetação herbácea	1.713,16	1.544,54	9,84	1455,46	-5,77

A Figura 16 mostra o gráfico do ajuste entre as predições positivas (eixo das ordenadas) e negativas (nas abscissas), ou seja, os diagnósticos verdadeiros e falsos do mapa previsto de 2002 estimado pelo MLP, sendo construído com os dados em ordem decrescente da probabilidade estimada pelo modelo estudado, no qual foi calculado a taxa de verdadeiro positivo e a taxa de falso positivo, que ilustra o desempenho na previsão do modelo. Com base na curva ROC (cor vermelha), o resultado do modelo pode ser considerado bom, porque os resultados alcançados estão apresentando mais acertos nas predições do que erros. Na teoria, quanto maior for a distância entre os resultados da simulação (linha vermelha) em relação a linha diagonal, melhor será o resultado do ajuste do modelo.

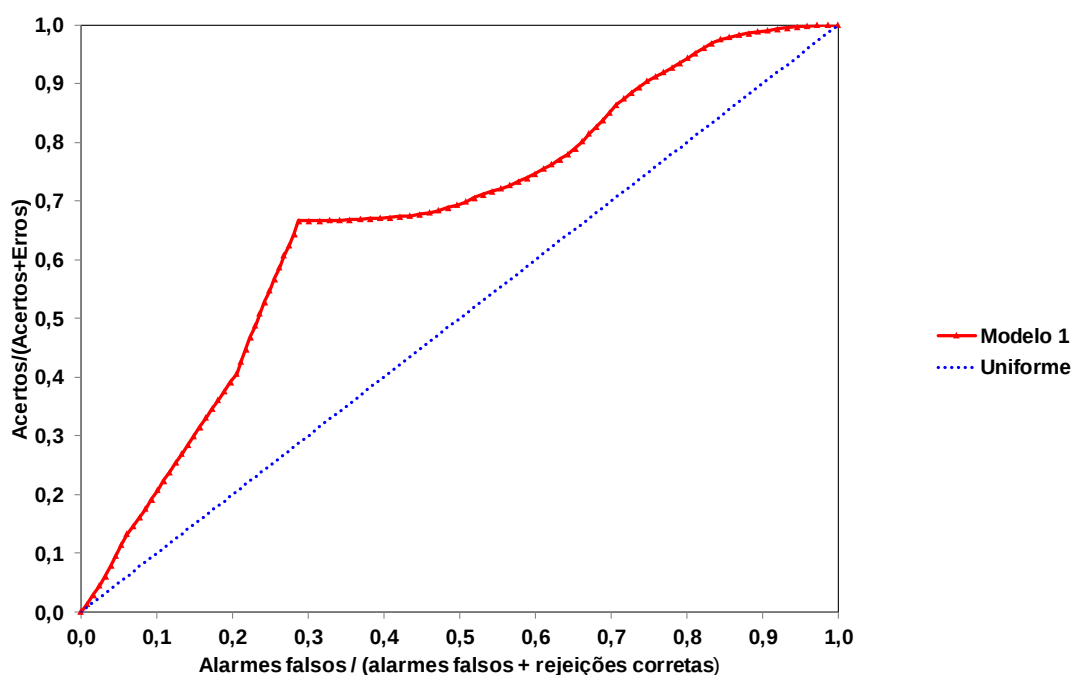


Figura 16 - ROC para avaliação da previsão de uso e cobertura da terra em 2002 com base na rede neural artificial na bacia do Rio Taperoá.

A Figura 17 mostra o resultado do TOC que foi usado para avaliar o desempenho da probabilidade de mudanças da cobertura da terra produzida pelo algoritmo MLP. Em geral, a curva TOC mostrou a área limite dos erros e acertos do mapa previsto 2002 para a bacia do Rio Taperoá. Os limites máximo e mínimo do TOC formam um paralelogramo, que contém o espaço matematicamente possível dos resultados obtidos com a modelagem espacial (PONTIUS JR e SI, 2014). Os resultados obtidos mostram que a AUC foi de 0,67, isto é, maior do que 0,5, o que indica uma predição satisfatória do uso e cobertura da terra modelada com o MLP.

A Figura 18 mostra os resultados espaciais da validação do uso e cobertura da terra prevista para o ano de 2002 pelo MLP. Os erros espaciais da validação do uso e cobertura da terra foram distribuídos em toda bacia, porém, mais concentrados na parte nordeste da bacia, enquanto os acertos foram identificados mais na porção centro-sul da bacia. Os resultados obtidos pelo modelo no que tange os alarmes falsos da predição espacial ocorreram predominantemente na porção oeste.

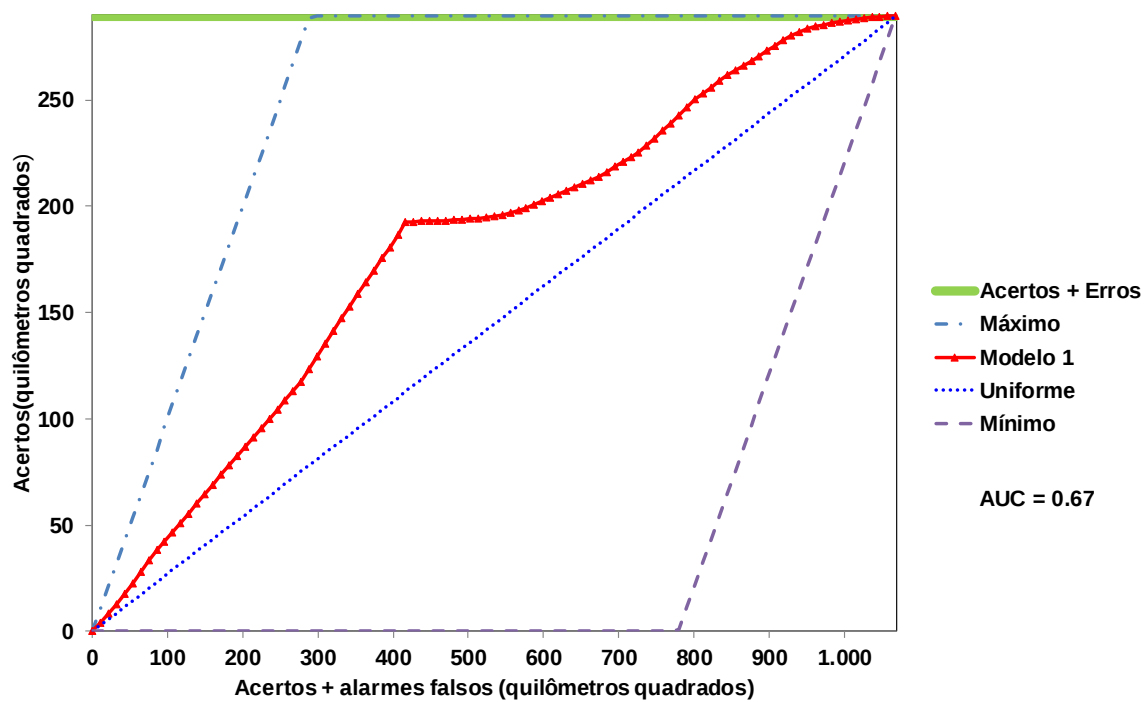


Figura 17 - Curvas AUC e TOC para avaliação da previsão de uso e cobertura da terra em 2002 com base na rede neural artificial na bacia do Rio Taperoá.

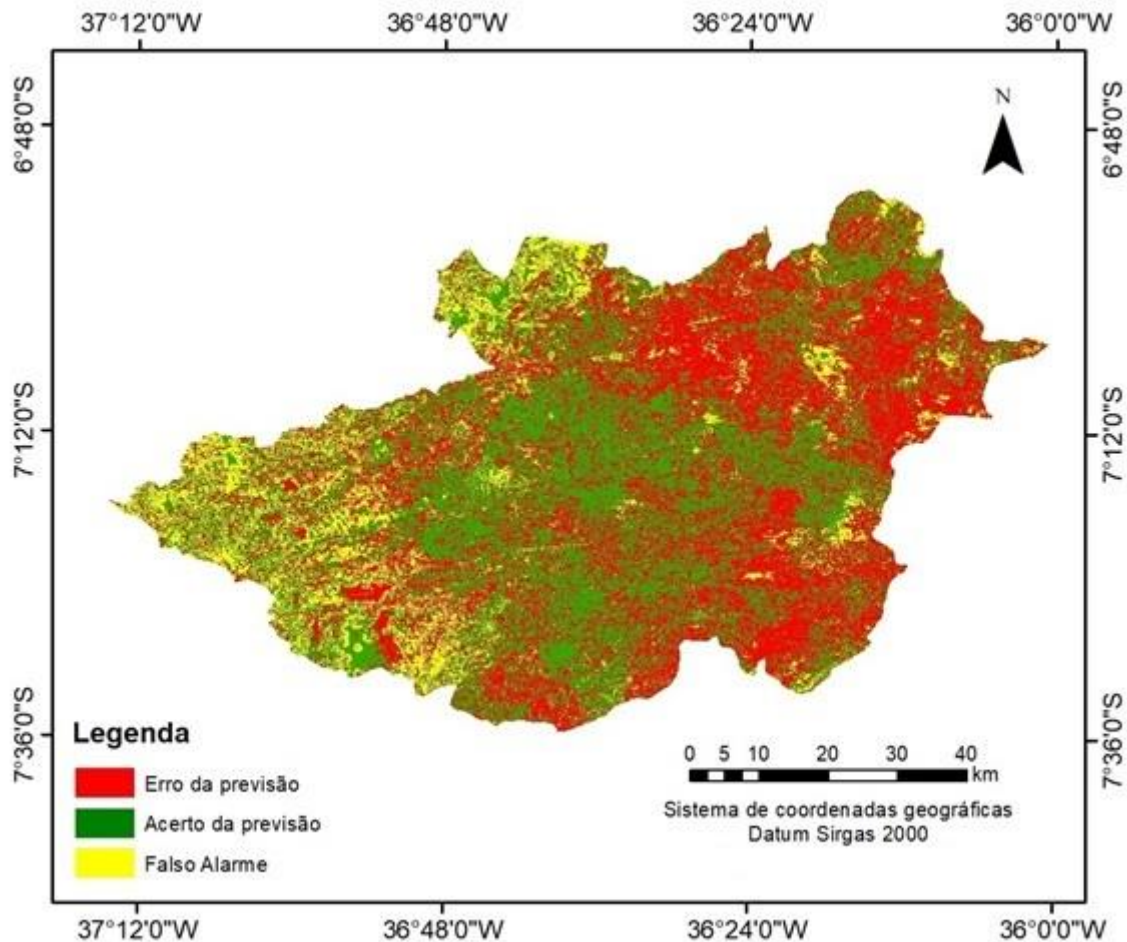


Figura 18 - Validação do uso e cobertura da terra para o ano de 2002.

5.3 Modelagem dos Processos Hidrossedimentológicos: calibração e validação do modelo SWAT

Para a modelagem no modelo SWAT são necessários dados de precipitação para a realização desse trabalho. Assim, dados diários de 12 postos pluviométricos que estão inseridos na bacia foram utilizados. Na Figura 19, pode-se observar o comportamento pluviométrico na bacia no período estudado, onde pode-se visualizar que a maior precipitação ocorreu no ano de 1985, com um valor de aproximadamente 1070 mm e a menor chuva ocorreu no ano de 1990 (198 mm). Os resultados apontam que a precipitação média no período analisado foi de 511,62 mm e mostram também uma alta variabilidade temporal da chuva.

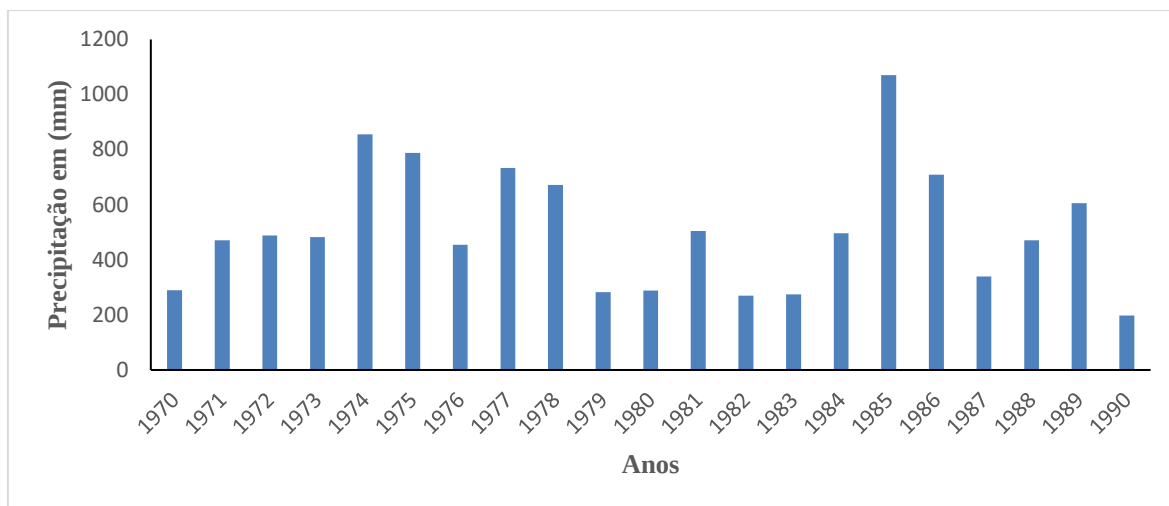


Figura 19 - Precipitação média anual na bacia do Rio Taperoá no período entre 1970 e 1990.

No que tange ao comportamento na escala mensal, nota-se na Figura 20 que o período de fevereiro a abril é o período chuvoso da bacia e que os meses entre agosto e novembro são os mais secos, com precipitações médias mensais que não ultrapassam 10 mm/mês, sendo novembro o mês com a menor pluviometria (4 mm).

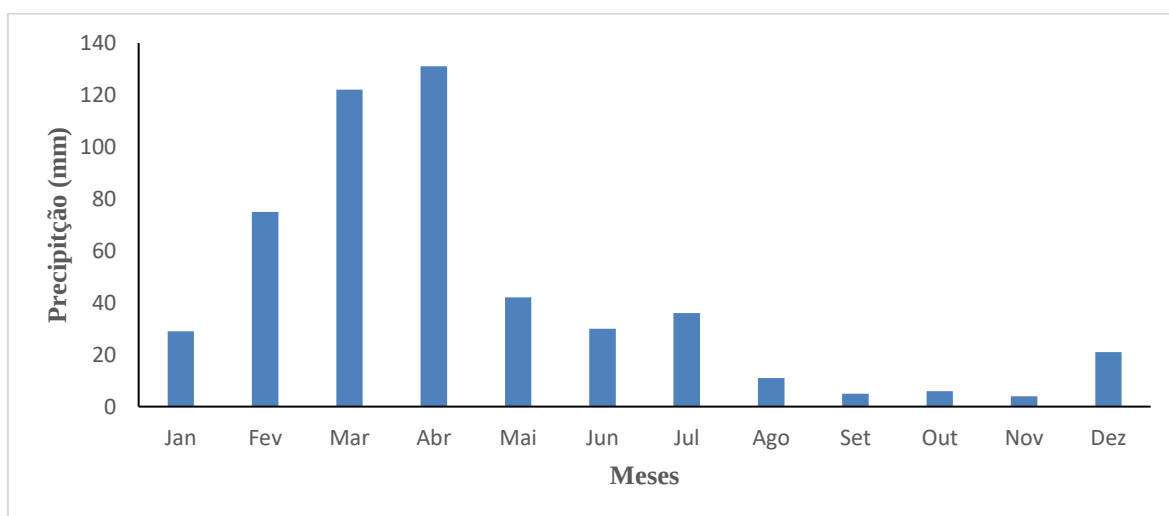


Figura 20 - Precipitação total mensal na bacia do Rio Taperoá no período de 1970 a 1990.

Em termos de modelagem, o período do estudo foi dividido em dois subperíodos, a saber: (a) Período I: 1980–1998 (calibração) e (b) Período II: 1999–2005 (validação). Com relação aos resultados obtidos com a calibração automática utilizando o SWAT-CUP, os resultados da modelagem podem ser conferidos na Figura 21. A Tabela 22 mostra os resultados das análises estatísticas da calibração e validação da modelagem hidrológica.

Usando a simulação de longo prazo (1970–1990), foram obtidas as vazões médias mensais observadas e calculadas para os períodos de calibração e validação no posto Poço de Pedras (Figura 21).

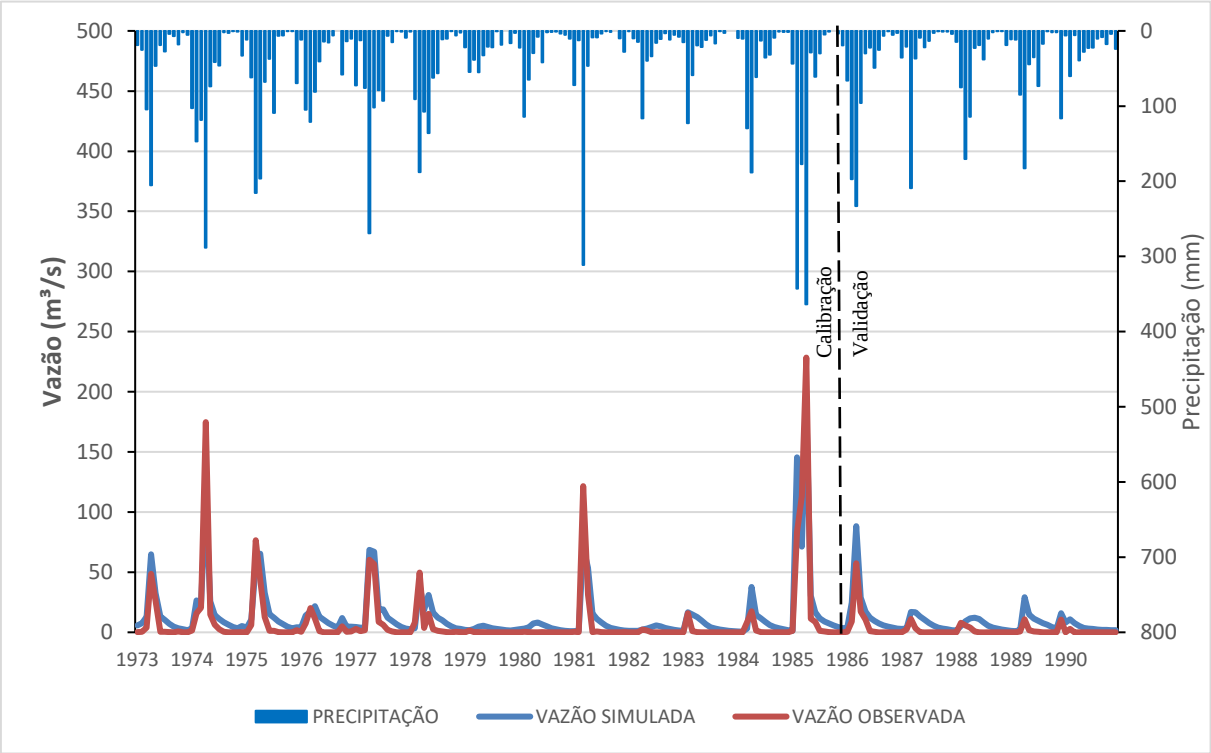


Figura 21- Comparação dos fluxos mensais simulado e observado para o posto de Poço de Pedras.

Tabela 22 - Resultados dos testes estatísticos dos períodos de calibração e validação do modelo levando em consideração a vazão e a produção de sedimentos do posto Poço de Pedras

Estatísticas	Calibração (1973–1985)		Validação (1986–1990)	
	Vazão (m³/s)	Produção de sedimentos (ton/ha/ano)	Vazão (m³/s)	Produção de sedimentos (ton/ha/ano)
R²	0,85	–	0,90	–
Nash	0,82	–	-0,02	–
Média simulada	13,38	1,65	8,84	0,92
Média observada	8,87	–	2,66	–

Pode-se observar na Figura 21 que o modelo conseguiu realizar uma simulação de vazão satisfatória em relação a vazão observada no período de calibração, atingindo bons resultados de R² e Nash (Tabela 22), apesar de apresentar uma superestimação em alguns

picos simulados, mostrando uma correlação positiva muito forte foi observada para vazão (calibração), apresentando $R^2 = 0,85$ e $0,90$, respectivamente. Assim, os resultados também podem ser considerados satisfatórios, mesmo se comparados com a média observada e a simulada e a subestimação da vazão estimada pelo modelo. Em contraste, no que se refere ao período de validação, foi observada uma relação negativa do Nash no período de validação ($-0,02$).

Pode-se observar que no período de validação a vazão mensal diminuiu drasticamente devido a diminuição da precipitação, mostrando alta variabilidade do fluxo mensal, o que dificultou a calibração e a validação do modelo. Os resultados obtidos mostram ainda que os valores máximos (picos) de vazão mensal simulados pelo modelo ocorreram nos anos de 1978, 1987, 1999 e 2007, quando atingiram vazões mensais de 595,7, 618,2, 510,6 e 525,7 mm, respectivamente. Os valores estimados nos anos 1974, 1981 e 1985 não foram bem representados pelo modelo.

Sobre as vazões, como esperado, pode-se auferir que a ocorrência da vazão na bacia segue o mesmo comportamento da precipitação, isto é, as vazões ocorrem apenas nos meses onde há registro de precipitação na região. Como pode ser conferido ainda na Tabela 22, os coeficientes de determinação e o coeficiente de Nash do fluxo mensal entre os valores simulados e observados foram maiores que 0,8 (nível de significância $\alpha = 0,01$), exceto no período de validação, que pode ser atribuído a falta de dados na bacia e/ou ao período selecionado não ter sido bem representativo para a simulação. Além disso, outro aspecto que pode ter influenciado nos resultados é a falta de informações mais detalhadas sobre a existência de pequenos barramentos construídos nesse período, que alteraram o fluxo natural do escoamento e, portanto, podem ter influenciado nas simulações, como constatado por Dantas (2018).

No que se refere a produção de sedimentos mensal, os maiores valores estimados foram obtidos para eventos chuvosos ocorridos nos anos de 1978, 1987, 1999 e 2007. Os valores variaram de 510,9 a 697,1 ton/ha/ano. Embora o desempenho geral do modelo tenha sido satisfatório, houve uma diferença significativa entre os valores mensais de sedimentos para 1977/07, 1980/08, 1982/07, 1987/07 e 1989/07. A estimativa de sedimentos usando o modelo mostra que os valores podem ser considerados elevados quando comparados com os resultados de Dantas et al. (2015) e Santos et al. (2007).

Os resultados alcançados sofrem influência direta da cobertura vegetal da caatinga e pelo comportamento da precipitação. Silva et al. (2014) ao estudarem a relação entre perdas de solo e cobertura superficial em parcelas de 100 m² localizadas em região hidrologicamente homogênea (Sumé e São João do Cariri), evidenciaram que uma parcela com solo revolvido gerou vazão aproximadamente cinco vezes maior que uma parcela com a presença da vegetação de caatinga nativa. Isso mostra a importância da preservação da vegetação do tipo caatinga no que tange a proteção do solo quanto a erosão do solo.

Na prática, chuvas de alta intensidade e até de curta duração podem gerar mais sedimentos do que o indicado pelo modelo baseado na precipitação diária. No geral, a consistência entre os resultados da simulação e os valores medidos, bem como os altos valores de Nash e R², indicaram que o modelo calibrado poderia descrever o fluxo mensal.

5.4 Efeitos da fonte de dados do *downscaling* da precipitação

Nesta seção, são apresentados os resultados do comportamento das chuvas observadas, dos modelos CNRM-CM3 e MIROC3.2 (precipitação normalizada diária) entre 1970 e 1990 (Figura 22). Pode-se observar que o comportamento das precipitações de ambas as séries de dados mostra uma diminuição nos valores anuais, como são representados nas linhas de tendência. Nesse sentido os resultados mostram que os anos de 1973, 1974, 1977, 1984, 1985 e 1988 foram os que apresentaram os maiores valores da precipitação normalizada. Os anos de 1978, 1981 e 1989 apresentaram os menores valores de precipitação normalizada, abaixo de -1 e, portanto, podem ser classificadas como anos muito secos para a bacia.

Os resultados mostram tendências temporais modestas, mas no que tange aos resultados espaciais são consideradas fortes e coerentes com relação aos dados pluviométricos da bacia do Rio Taperoá. Em suma, os resultados obtidos estão em consonância com outros trabalhos realizados em outras regiões semiáridas, como os de Alves et al. (2012), Magalhães et al. (2018) e De Medeiros et al. (2018), que destacam a variabilidade intra e interanual das chuvas. Assim, analisando os resultados, pode-se destacar que, embora variações anuais de precipitação de cerca de 100 mm sejam consideradas baixas em algumas regiões climáticas, tais variações podem significar a diferença entre uma boa colheita e a completa quebra de safra em ambientes semiáridos.

Os resultados são normalizados para a linha de base para os modelos CNRM-CM3 e MIROC3.2.

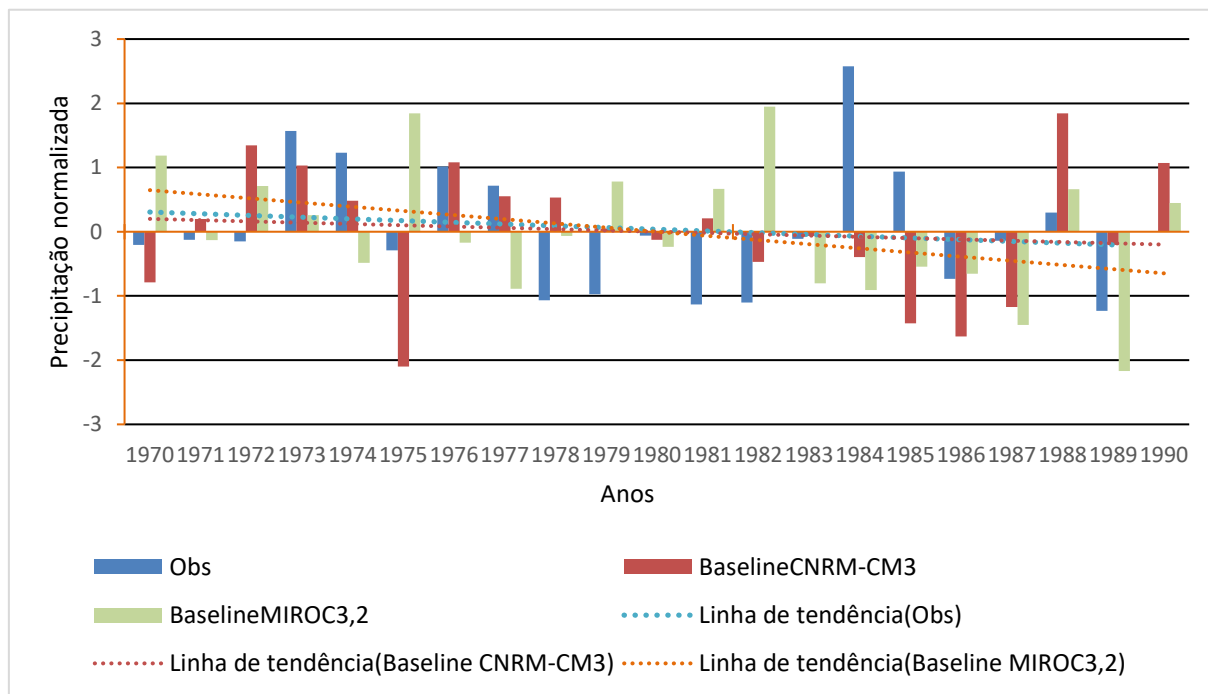


Figura 22 - Precipitações anuais normalizadas para a bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990.

5.5 Efeitos da Fonte de Dados Sobre a Vazão e a Produção de Sedimentos Entre 2046–2064

A bacia do Rio Taperoá é caracterizada pelas condições climáticas de uma região semiárida. Essas características apontam para uma irregularidade na distribuição pluviométrica em escala espacial e temporal, com alto grau de insolação e temperaturas. Esses fatores são os principais agentes climáticos responsáveis pelo comportamento da vazão e da erosão na região e podem apresentar um comportamento instável ou anômalo.

As Figuras 23 e 24 mostram a comparação dos valores simulados da vazão mensal e produção de sedimentos simulado para o posto Poço de Pedras usando os modelos MIROC3.2 e CNRM-CM3.

Os resultados obtidos mostram que as taxas de vazão média registradas para a bacia são de 15,00 m³/s para o modelo CNRM-CM3 no cenário otimista, 19,42 m³/s para o cenário normal e 22,51 m³/s para o cenário pessimista. Já para o modelo MIROC3.2 a

vazão média no cenário otimista foi de 9,11 m³/s, no cenário normal 8,38 m³/s, e para o cenário pessimista foi de 7,94 m³/s. Esses resultados apontam que as médias no modelo CNRM-CM3 foram mais altas que o modelo MIROC3.2, sendo o cenário pessimista do modelo CNRM-CM3 aquele que apresentou a maior vazão média, como podem ser conferidas nas Figuras 23 e 24.

Os resultados mostram ainda que o comportamento da vazão no período de simulação com o modelo MIROC3.2, foi aquele que apresentou uma maior variação entre os cenários, onde o cenário otimista superestimou a vazão nos anos de 2049, 2051, 2057, 2058 e 2064. Já o cenário pessimista superestimou a vazão nos anos 2053, enquanto o cenário normal superestimou a vazão nos anos de 2059, 2062, 2064, mostrando uma maior sensibilidade em relação ao modelo CNRM-CM3.

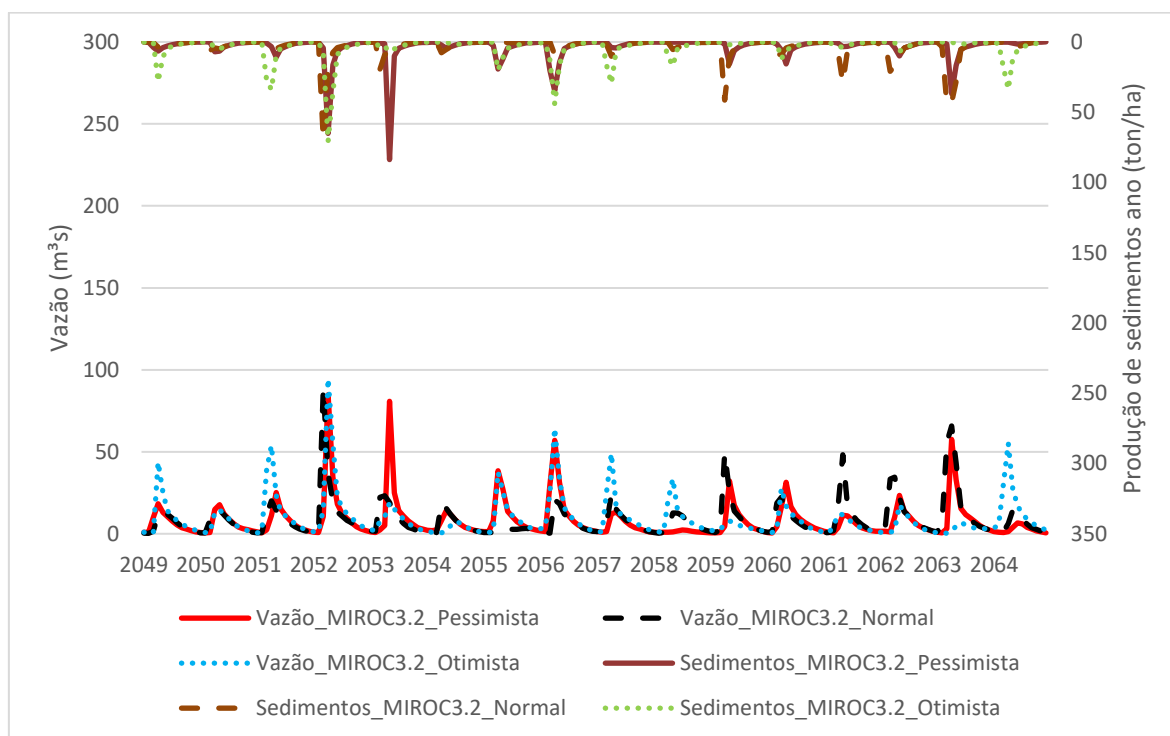


Figura 23 - Comparação dos valores simulados da vazão mensal e produção de sedimentos simulado para o posto Poço de Pedras usando o modelo MIROC3.2

Comparando a vazão no período de simulação entre os modelos CNRM-CM3 e MIROC3.2, percebe-se que houve um comportamento similar nas tendências de ambos os modelos, havendo poucas discrepâncias no cenário normal entre os modelos, como percebido nos anos 2049, 2051 e 2057, enquanto no cenário pessimista, os resultados apresentaram uma superestimava da vazão nos anos de 2050 e 2062. Para o cenário

otimista os resultados mostram que a vazão do modelo CNRM-CM3 superestimou os resultados do modelo MIROC3.2, especificamente nos anos de 2053, 2063 e 2064.

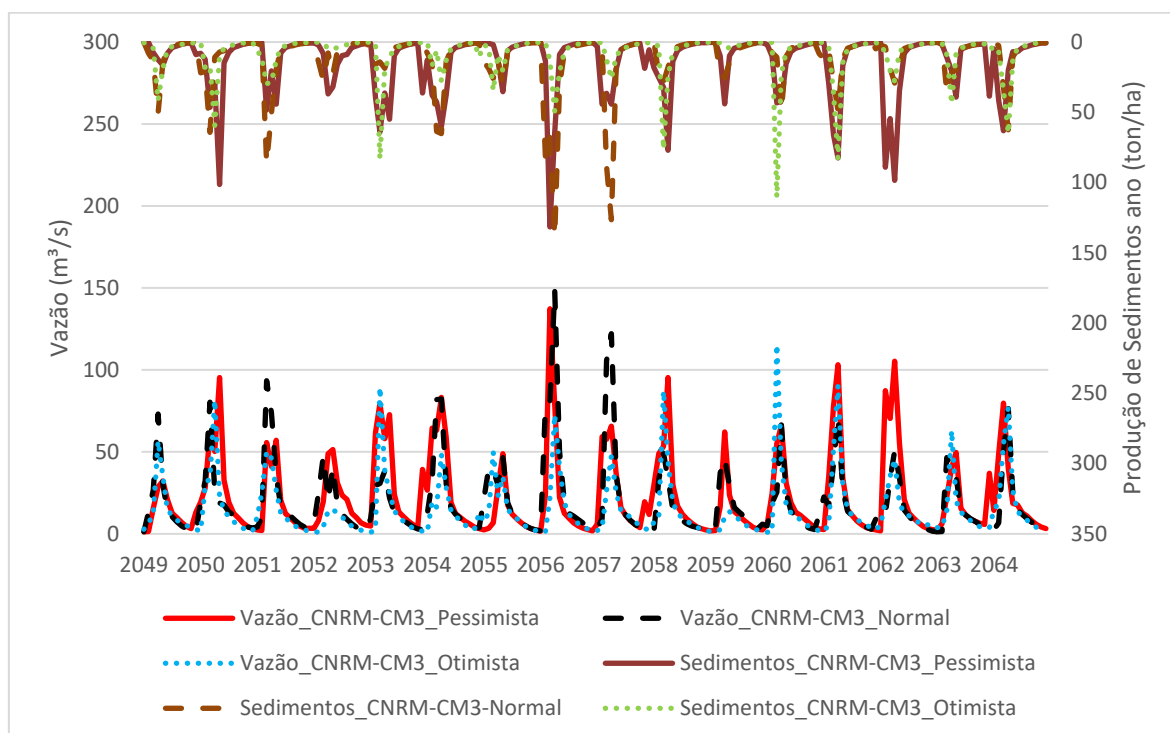


Figura 24 - Comparação dos valores simulados da vazão mensal e produção de sedimentos simulado para o posto Poço de Pedras usando o modelo CNRM-CM3.

Assim como a vazão, foi realizada também uma estimativa da produção de sedimentos para a bacia do Rio Taperoá para o período de 2049 a 2064, com a finalidade de analisar as mudanças ocorridas nesse processo para cada tipo de uso e cobertura da terra. Os resultados do comportamento da produção de sedimento também são apresentados nas Figuras 25 e 26.

Para a simulação com o modelo MIROC3.2 no cenário pessimista, a produção de sedimentos média na bacia foi estimada em 38,30 ton/ha/ano, e para o cenário normal, a produção estimada foi de 39.76 ton/ha/ano. Para o cenário otimista, a produção de sedimentos média na bacia foi de 38,30 ton/ha/ano, mostrando que a produção de sedimentos no cenário otimista foi maior que a verificada nos períodos normal e pessimista, respectivamente.

No que tange aos dados de produção de sedimentos gerados pela simulação da precipitação estimada pelo modelo MIROC3.2, os resultados obtidos mostram que a produção de sedimentos foi menor utilizando a chuva prevista pelo modelo CNRM-CM3.

Com relação ao cenário pessimista, a produção de sedimentos média estimada na bacia usando dados do MIROC3.2 foi de 170,56 ton/ha/ano, enquanto no cenário normal, a produção de sedimentos foi de 136,46 ton/ha/ano, enquanto no cenário normal, foi de 93,05 ton/ha/ano. Esses resultados mostram a influência da precipitação na alta variabilidade dos processos hidrossedimentológicos. Com relação a espacialização da produção de sedimentos dos resultados utilizando os dados do modelo MIROC3.2 no cenário pessimista, as sub-bacias com maior produção de sedimentos foram as 89, 224, 251. Essas sub-bacias geraram de 50 a 200 ton/ha/ano e a 307 gerou acima de 200 ton/ha/ano.

A Tabela 23 resume as mudanças na precipitação, bem como a vazão e a produção de sedimentos no posto Poço de Pedras para os dois períodos. De acordo com os dados estatísticos, a precipitação média anual do modelo CNRM-CM3 diminuiu quando comparada com a do MIROC3.2 Consequentemente, a vazão e a produção de sedimentos também diminuíram na mesma proporção para os cenários de simulação, como era esperado.

Tabela 23 - Dados de estatísticos de vazão e produção de sedimento para a bacia 2049 a 2064

Modelos Climáticos/ Cenários	Vazão (m³/s)			Produção de sedimentos (ton/ha/ano)		
	Média	DP ¹	CV ²	Média	DP ¹	CV ²
CNRM-CM3_P	22,51	25,37	89%	22,74	170,56	13%
CNRM-CM3_N	19,42	23,68	82%	18,23	136,46	13%
CNRM-CM3_O	15,00	19,24	78%	12,67	93,05	14%
MIROC3.2_P	7,94	11,86	67%	5,36	38,30	14%
MIROC3.2_N	8,38	11,62	72%	5,62	39,76	14%
MIROC3.2_O	9,11	12,70	72%	5,99	43,34	14%

¹ Desvio padrão, e ² Coeficiente de variação.

Para o modelo MIROC3.2 no cenário otimista as sub-bacias com maior produção de sedimentos foram a 307 que gerou acima de 200 ton/ha/ano, e as sub-bacias 277, 251, 252, 224, 89, que geraram de 50 a 200 ton/ha/ano.

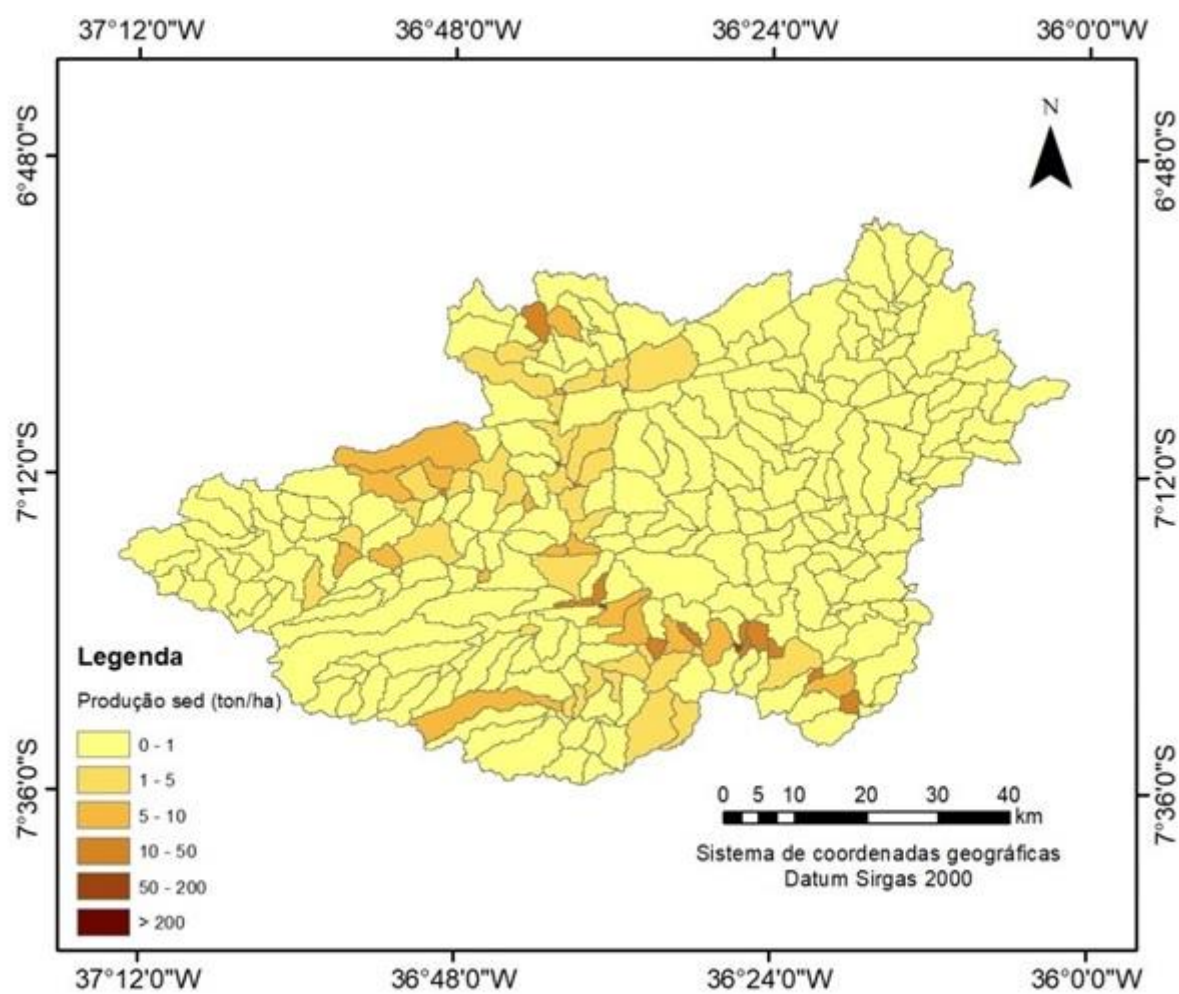


Figura 25 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulada entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário pessimista.

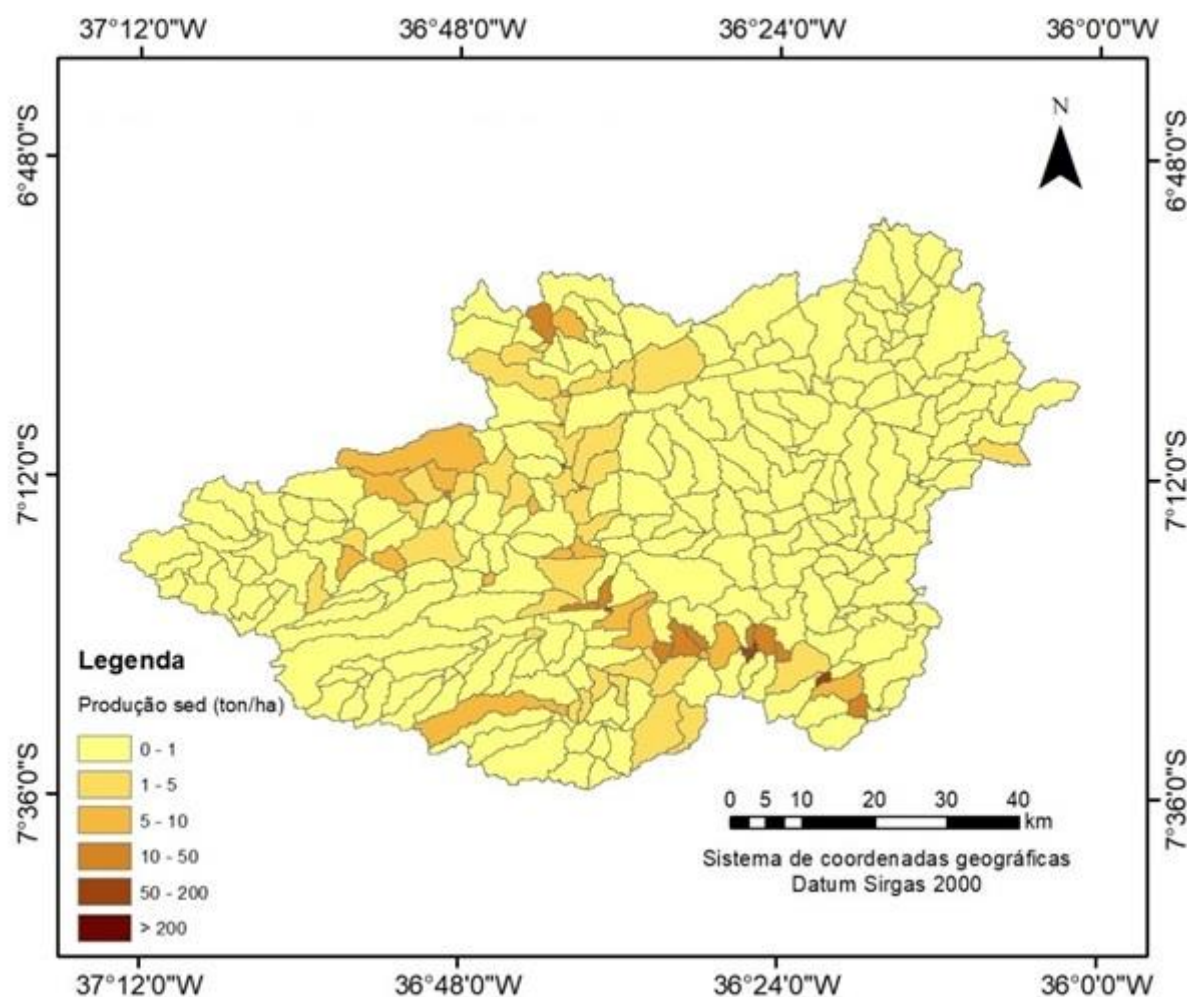


Figura 26 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulada entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário otimista.

Os resultados da produção de sedimentos obtidos com a precipitação do modelo MIROC3.2 para o cenário normal apresentaram os seguintes resultados: as sub-bacias com maior carga de sedimentos geradas foi na 307 que gerou mais de 200 ton/ha/ano. Enquanto as sub-bacias 251, 244, 89 foram responsáveis pela produção de sedimentos que variaram de 50 a 200 ton/ha/ano. Essas sub-bacias estão localizadas na porção sudeste da bacia, que são influenciadas pelas maiores declividades que variam de 0 a 8%, e por possuírem o tipo de solo Latossolos que são os mais propensos ao processo de erosão na bacia (Figura 27).

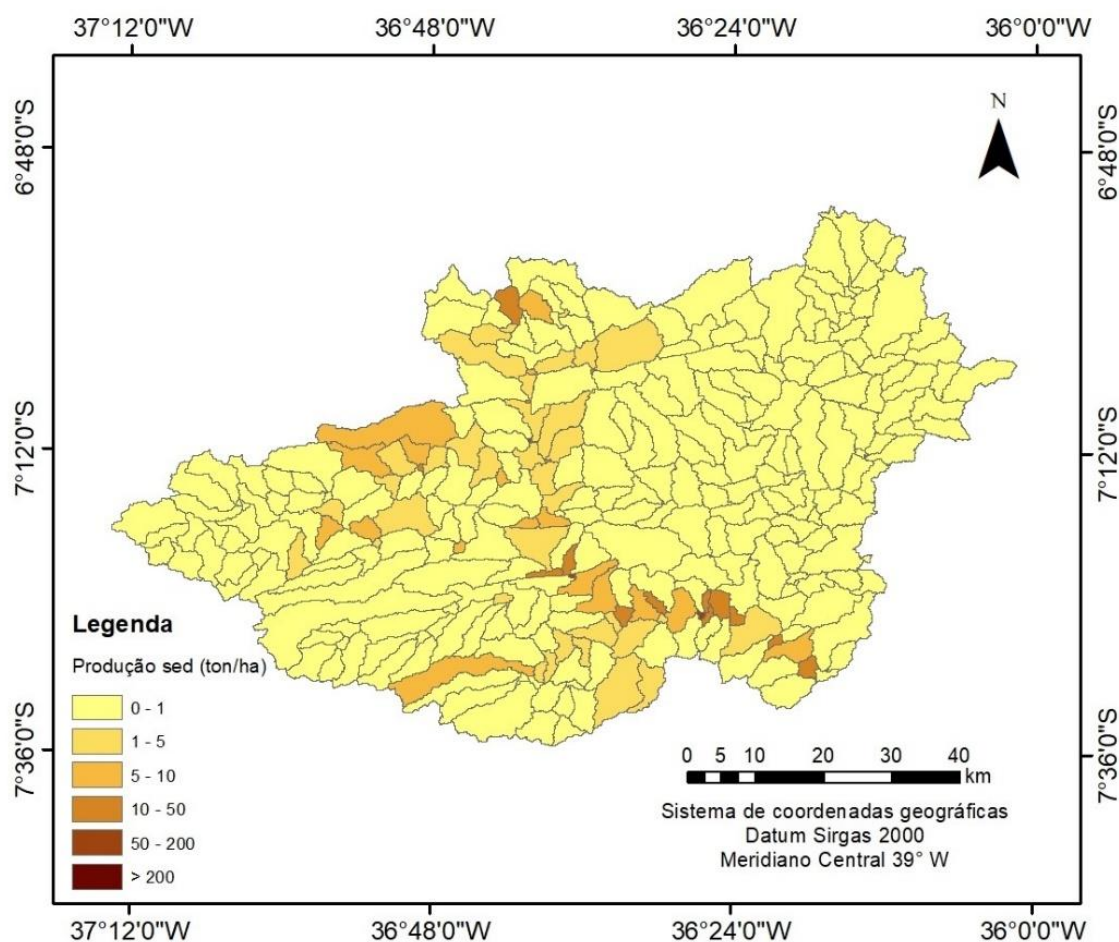


Figura 27 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo MIROC3.2 no cenário normal.

Com relação aos resultados da previsão climática utilizando o modelo CNRM-CM3 no cenário pessimista, as sub-bacias com a maior produção de sedimentos foram as 251, 224, 89, e 307, que geraram acima de 200 ton/ha/ano (Figura 28). A região sul da bacia e pequenas sub-bacias a noroeste são aquelas com as maiores taxas de produção de sedimentos. No caso da sub-bacia 307, a forte presença de vegetação herbácea e também a ocorrência de Neossolos Litólicos, solo esse que possuem baixos teores de matéria orgânica e ocorrem, geralmente, em áreas semiáridas de declives mais acentuados (SILVA e SILVA, 1997), fazem com que os processos de erosão nessa área sejam intensificados, visto que o terreno apresenta pouca cobertura da terra e o solo possui baixa capacidade de infiltração.

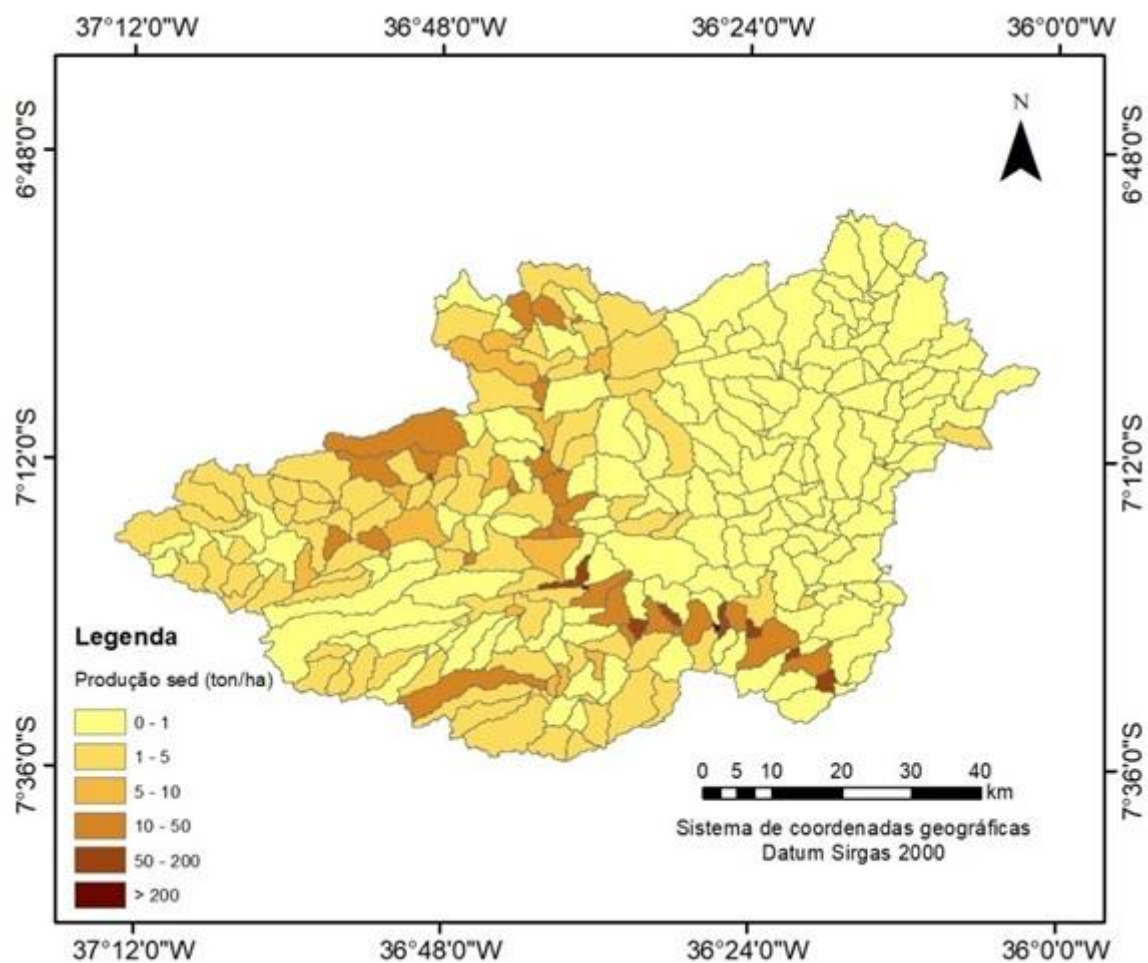


Figura 28 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo o CNRM-CM3, cenário Pessimista.

A Figura 29 apresenta a espacialização da produção de sedimentos simulada entre 2046 e 2064 para o modelo CNRM-CM3 no cenário otimista. A maior produção de sedimentos calculada variou de 50 a 200 ton/ha/ano e ocorreu nas sub-bacias ao longo do curso rio principal na porção sul da bacia. Esses resultados apontam que a produção de sedimentos pode estar associada à presença de altas declividades em determinadas áreas da sub-bacia e também com a ocorrência de Neossolos Litólicos.

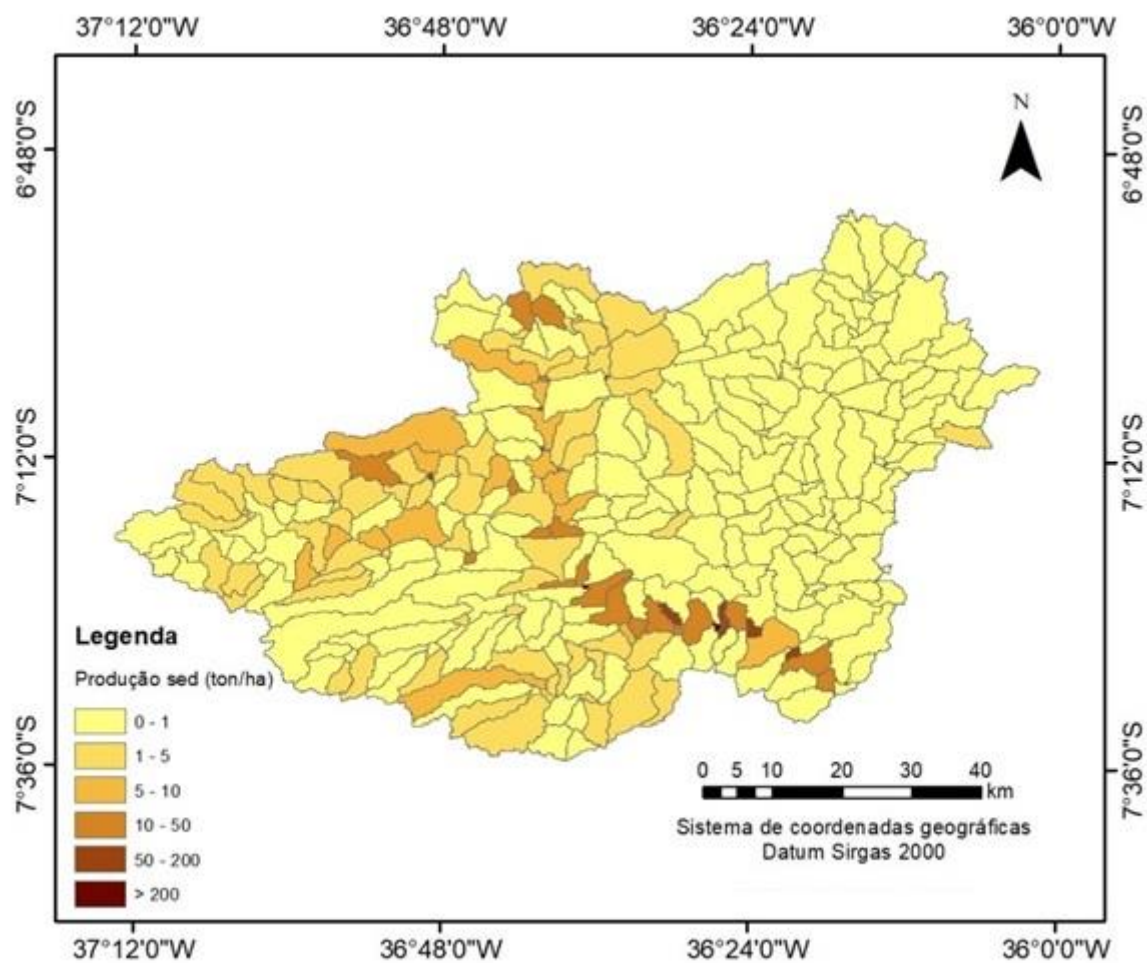


Figura 29 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo CNRM-CM3 no cenário otimista.

Os resultados gerados da produção de sedimentos pelo modelo CNRM-CM3 no cenário otimista mostraram que apenas três sub-bacias geraram descarga de sedimentos acima de 200 ton/ha/ano, sendo essas sub-bacias também localizadas na porção norte. A segunda classe que apresentou a maior produção de sedimentos registrou descarga de sedimentos entre 50 a 200 ton/ha/ano e estão localizadas ao longo do rio principal (Figura 30).

No mesmo modelo no cenário normal, quatro sub-bacias apresentaram a maior produção de sedimentos (valores acima de 200 ton/ha/ano), enquanto 12 sub-bacias também localizadas ao longo do curso rio principal na porção sul da bacia, geraram produção de sedimento que variaram de 50 a 200 ton/ha/ano.

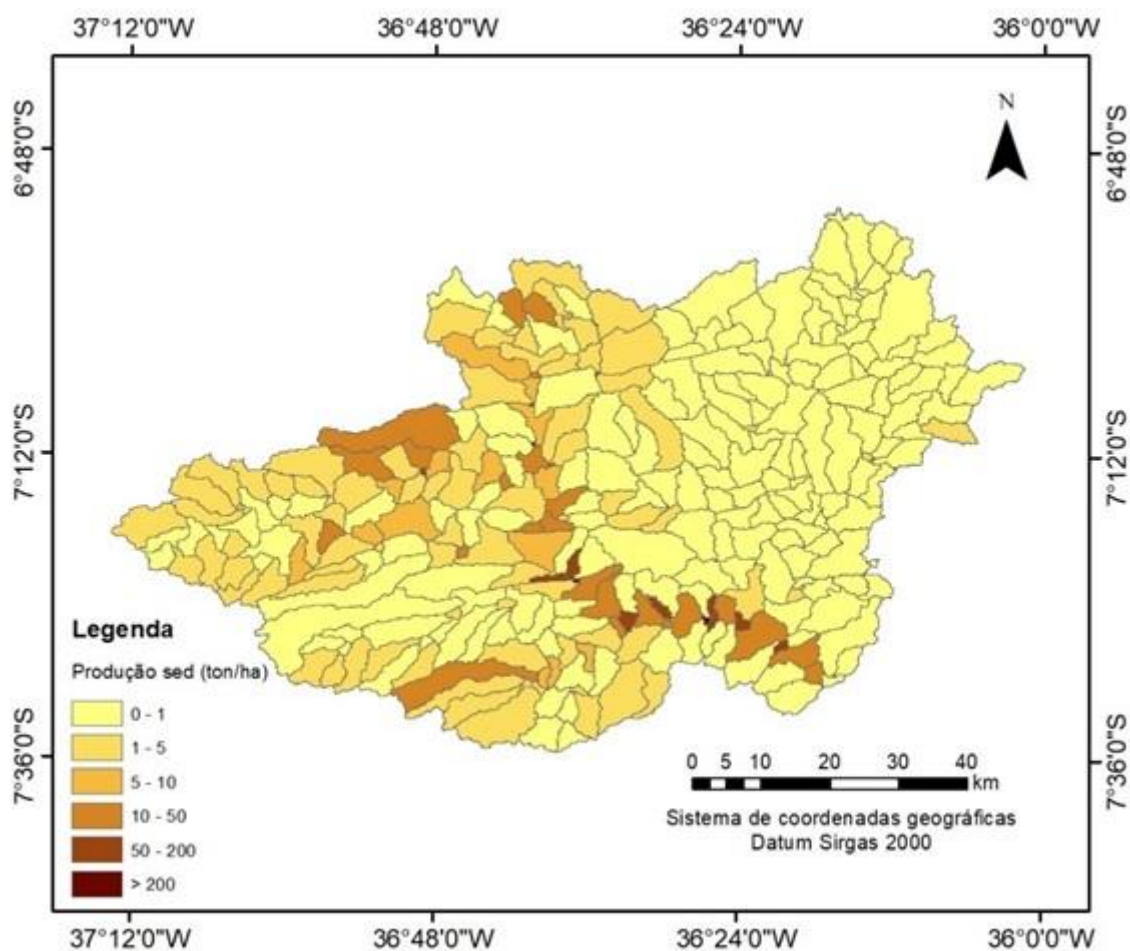


Figura 30 - Distribuição espacial da produção de sedimentos simulado entre 2046 e 2064 com o modelo CNRM-CM3 cenário normal.

Na comparação dos dois modelos, observou-se que o modelo CMRM-CM3 produziu mais sedimentos do que o modelo MIROC3.2 nos três cenários. Ficou evidente que em todas as simulações independente do modelo ou cenário a área da bacia que mais produziu sedimento foi a porção noroeste da bacia seguido, da porção sudoeste, mais precisamente seguindo o curso principal. Segundo Silva e Silva (1997) isso ocorre devido à forte presença de vegetação rasteira e também a ocorrência de Neossolos Litólicos e solos que possuem baixos teores de matéria orgânica. Já a porção nordeste da bacia foi a que menos produziu sedimentos, independente do cenário ou modelo, onde se concentra uma produção é de menos de 1 ton/ha/ano.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou a influência da variabilidade de cenários climáticos futuros e cobertura da terra nos processos hidrossedimentológicos para a bacia do Rio Taperoá no período entre 2046 e 2064.

A pesquisa foi pautada na hipótese de que os estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que as regiões áridas e semiáridas são mais expostas aos impactos das mudanças no clima e devem sofrer com a disponibilidade de água devido a diminuição das chuvas nas próximas décadas. Face ao exposto, esta pesquisa constatou que nos cenários climáticos otimista e pessimista utilizando os modelos MIROC3.2 e CNRM-CM3 haverá diminuição das vazões e grande volume de sedimentos produzidos na bacia do Rio Taperoá entre 2046 e 2064.

Mais especificamente, pode-se concluir com este estudo que a bacia do Rio Taperoá apresentou alta variabilidade espaço-temporal da precipitação e da vazão nos períodos de 1970 a 1990 e de 2046 a 2064.

No que tange as alterações na cobertura da terra identificadas na bacia nos anos de t1 (1990), t2 (1999) e t3 (2002), em que as principais alterações no uso e cobertura da terra de 2002 quando comparado com o ano de 1990 foi a diminuição da classe vegetação arbórea arbustiva para vegetação arbustiva, esse comportamento foi observado principalmente na porção leste da bacia. A modelagem dinâmica do uso e cobertura da terra baseada em RNMLP mostrou resultados satisfatórios para a bacia do Rio Taperoá com acurácia de 89,69% após 10.000 iterações e índice Kappa de 0,61, classificado por Landis e Koch (1977) como de qualidade muito boa. O cenário previsto para t4 (2060) apresentou aumento considerável da classe de vegetação arbustiva herbácea.

Sobre a estimativa das vazões percebeu-se que no período de calibração que o modelo estimou uma vazão média de 13,38 m³/s, enquanto, no período de validação apresentou um valor de 8,84 m³/s, também superestimando a vazão média. Os resultados encontrados para ambos os períodos, tanto o de calibração como o de validação mostram que o SWAT superestimou a vazão média observada, que foi 8,87 m³/s na calibração e 2,66 m³/s na validação. Os resultados das vazões estimadas com base nos cenários climáticos futuros, otimista e pessimista, entre os anos de 2046 e 2064 para a bacia do Rio Taperoá mostraram uma diminuição das vazões em ambos os cenários analisados.

No que tange as estimativas da produção de sedimentos com base nos cenários climáticos futuros (otimista e pessimista), entre os anos de 2046 e 2064, pode-se concluir que os maiores valores ocorrem na porção sudoeste da bacia para os dois modelos e nos seis cenários, enquanto que as porções oeste e nordeste possuem as menores taxas de produção de sedimentos para os dois modelos e nos seis cenários também. Essa configuração deve-se, principalmente, a uso e cobertura da terra, que se configura a vegetação herbácea, e aos tipos de solos, bem como em decorrência dessa área possuir as maiores declividades que compõem a bacia do Rio Taperoá. O modelo estimou a maior produção de sedimentos no CNRM-CM3 no cenário pessimista em 22,74 ton/ha/ano, já a menor produção de sedimentos no MIROC3.2 no cenário pessimista foi de 5,36 ton/ha/ano.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se testar outras combinações de bandas dos sensores TM, buscando por combinações de bandas para diminuir a probabilidade de erro na classificação das imagens, bem incorporar cenas dos outros satélites além do LANDSAT, avaliar o desempenho de outros classificadores além do máxima Verossimilhança (MAXVER), e associação do uso de técnica do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), além disso se apoiar mais em trabalhos de campo para coleta de amostras para a validação das classificações.

Recomenda-se ainda que sejam usados novos cenários climáticos como o *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Pois esses cenários possuem uma nova tipologia de cenários onde (RCPs) representam um amplo espectro de realizações de clima aos SRES.

Aconselha-se com relação ao melhoramento da calibração do modelo SWAT, uma maior discretização possível para a bacia, para que seja obtida maior complexidade de cobertura e tipos de solo que ocorrendo na bacia, sugere-se também uma avaliação mais detalhada da parametrização do modelo SWAT, fazendo novas análises de sensibilidade de outros parâmetros além dos utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413-430, 2007.

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs. [s.l.] Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2015.

AESA. Agência Executiva e de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado da Paraíba. 2015. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Acesso em: 17 de jun. 2015.

ALLEN, R.G.; JENSEN, J.L.; BURMAN, R.D. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal*, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, H. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. Anais... SBG, 1977.

ALVES, J.M.B.; CAMPOS, J.N.B.; SERVAIN, J. Reservoir Management Using Coupled Atmospheric and Hydrological Models: The Brazilian Semi-Arid Case, *Water Resources Management*, v. 26, p. 1365-1385, 2012.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.S.; DE AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; DE FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Sensitivity analysis of the parameters of the SWAT model and simulation of the hydrosedimentological processes in a watershed in the northeastern region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, 2013.

ARAÚJO, J.C.; KNIGHT, D.W. A review of the measurement on sediment yield in different scales. *Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 3, p. 257-265, 2005.

ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R. SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

ATMOSPHERIC RESEARCH. CSIRO-Mk 3.0 - Model Information of otential Use to the IPCC Lead Authors and the AR4. 8 p. Relatório Técnico. Disponível em: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/CSIRO-Mk3.0.pdf. Acesso em novembro de 2015.

BAE, D.-H.; JUNG, I.-W.; LETTENMAIER, D.P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 MCG simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*, v. 401, n. 1-2, p. 90-105, 2011.

BAGNOLD, R. A. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, v. 13, n. 1, p. 303-312, 1977.

BARFUS, K.; BERNHOFER, C. Assessment of MCG performances for the Arabian Peninsula, Brazil, and Ukraine and indications of regional climate change. *Environmental Earth Sciences*, v. 72, n. 12, p. 4689-4703, 2014.

BARROS, J. D.; MONTEIRO, T. R. R.; CESTARO, L. A.. A região natural Planalto da Borborema no semiárido do Rio Grande do Norte. In: Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido, 2018, Natal/RN. Anais do Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido. Campina Grande: Realize Eventos Científicos & Editora, 2018. v. 1. p. 1-12.

BEZERRA, N.F. Água e desenvolvimento sustentável no semiárido. FUNCEME. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, Série Debates n. 24, 2002.

BLOCK, P.; RAJAGOPALAN, B. Statistical–Dynamical Approach for Streamflow Modeling at Malakal, Sudan, on the White Nile River, *J. Hydrol. Eng.*, v. 14, p. 185-196, 2009.

BOTELHO, R.G.M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; e BOTELHO, R. G. M. (org). Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro, Ed. Bertrand Brasil, 1999.

BRAGA, A.C.F.M.; GALVÃO, C.O.; SOUZA, E.P.; CAVALCANTI, E.P.; FERNANDES, R.O.; FORTE, K. Integrated atmospheric and hydrologic modelling for short-term and basin-scale forecasts in a tropical semi-arid context. *IAHS-AISH Publication*, v. 313, 134-140, 2007.

BRAGA, A.C.F.M.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C.O.; NOBRE, P. Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: a case study of Pirapama Basin, Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 498, n. 1, p. 46-58, 2013.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais a mudança do clima no Brasil. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

BRESSIANI, D.A.; GASSMAN, P.W.; FERNANDES, J.G.; GARBOSSA, L.H.P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N.B.; MENDIONDO, E.M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agriculture & Biological Engineering*, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015b.

BRESSIANI, D.A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C.A.; MENDIONDO, E.M. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *International Journal of Agriculture & Biological Engineering*, v. 8, n. 3, p. 125-139, 2015a.

BRITO, S.S.B.; CUNHA, A.P.M.A.; CUNNINGHAM, C.C.; ALVALÁ R.C.; MARENGO, J.A.; CARVALHO, M.A. Frequency, duration and severity of drought in the Semi-arid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 23, p. 200–213, 2017.

CÂMARA, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos. (Preliminar da Tese de Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, Amsterdam, v.20, n.3, p.395-403, May-jun. 1996.

CAMPOS, S. Diagnóstico físico conservacionista da bacia do Rio Lavapés - Botucatu (SP). Botucatu: 140p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1997.

CARVALHO, M.G.R.F. Classificação Geomorfológica do Estado da Paraíba. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 1982, 72 p.

CARVALHO, T.S.; DOMINGUES, E.P.; HORRIDGE, J.M. Controlling deforestation in the Brazilian Amazon: Regional economic impacts and land-use change. *Land Use Policy*, v. 64, p. 327-341, 2017.

CHAVES, I.B.; FRANCISCO, P.R.M.; LIMA, E.R.V.; SILVA, B.B.; BRANDÃO, Z.N.; CHAVES, L.H.G. Índices espectrais, diagnóstico da vegetação e da degradação da caatinga da bacia do Rio Taperoá -PB. In: SILVA, B.B. (Org.). Aplicações ambientais Brasileiras de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. 1. ed. Campina Grande: EDUFPG, v. 1, p. 23-47, 2013.

CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 12, p. 537-555, 2005.

CIRILO, J.A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido, *Estudos Avançados*, v. 22, p. 61-82, 2008.

CLARK, M.P.; WILBY, R.L.; GUTMANN, E.D.; VANO, J.A.; GANGOPADHYAY, S.; WOOD, A.W.; FOWLER, H.J.; PRUDHOMME, C.; ARNOLD, J.R.; BREKKE, L.D. Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports*, v. 2, n. 2, p. 55-64, 2016.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, p. 37-46, 1960.

CORRÊA, A. C. B. Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil. 2001. 386f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2001.

DA SILVA, V.P.R.; SILVA, M.T.; SINGH, V.P.; DE SOUZA, E.P.; BRAGA, C.C.; DE HOLANDA, R.M.; ALMEIDA, R.S.R.; DE SOUSA, F.A.S.; BRAGA, A.C.R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, v. 162, p. 166-176, 2018.

DA SILVA, V.P.R.; SILVA, M.T.; SOUZA, E.P. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the Sub-Middle of the São Francisco River Basin. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 6, 2016.

DANTAS, J.C. Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido. 2018. Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, 120 p.

DANTAS, J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.M.; VIANNA, P.C.G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências*, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DARREN, L. F.; LUO, Y.; LUEDELING, E.; ZHANG, M. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. V. 374. p. 16-29. 2009.

DE ANDRADE, C.W.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; LIMA, J.R.S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C.A. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. *Ecohydrology & Hydrobiology*, Available online, 2018.

DE FREITAS, M.W.D.; MUÑOZ, P.; DOS SANTOS, J.R.; ALVES, D.S. Land use and cover change modelling and scenarios in the Upper Uruguay Basin (Brazil). *Ecological Modelling*, v. 384, p. 128-144, 2018.

DE MEDEIROS, I.C.; SILVA, J.F.C.B.C.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Run-off-erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 15, 1-14, 2018.

DELGADO, J.M.; VOSS, S.; BÜRGER, G.; VORMOOR, K.; MURAWSKI, A.; RODRIGUES, M.; MARTINS, E.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.; FRANCKE, T. Seasonal Drought Prediction for Semiarid Northeast Brazil: Verification of Six Hydro-Meteorological Forecast Products. *Hydrology and Earth Systems Science*, v. 22, p. 5041-5056, 2018.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. Integration of Watershed Tools and SWAT Model into BASINS. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, n. 12, p. 1127-1141, 2002.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos. Miscelânea 1*, Rio de Janeiro: 1979, 83 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006, 306 p.

ENOMOTO, C.F. Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná. 2004. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FRANCISCO, P.R.M. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.

FRANCISCO, P.R.M.; CHAVES, I.B.; LIMA, E.R.V.; BANDEIRA, M.M.; SILVA, B.B. Mapeamento da caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, n. 3, p. 676-693, 2012.

GALVÃO, C.O.; NOBRE, P.; BRAGA, A.C.F.M.; OLIVEIRA, K.F.; SILVA, R.M.; SILVA, S.R.; LACERDA, F.F.; MONCUNILL, D.F. Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil. *IAHS-AISH Publication*, v. 295, 211-220, 2005.

GAO, J.; SHESHUKOV, A.Y.; YEN, H.; DOUGLAS-MANKIN, K.R.; WHITE, M.J.; ARNOLD, J.G. Uncertainty of hydrologic processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology*, v. 568, p. 551-561, 2019.

GARCIA, Y.M. Conflitos de uso do solo em APPs na bacia hidrográfica do córrego Barra Seca (Pederneiras/SP) em função da legislação ambiental – Botucatu: [s.n.], 2014.

GOLMOHAMMADI, G.; RUDRA, R.; DICKINSON, T.; GOEL, P.; VELIZ, M. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 375–386, 2017.

GOMBAULT, C.; SOTILLE, M.F.; NGWA, F.F.; MADRAMOOTOO, A. A.; MICHAUD, A.R.; BEAUDIN, I.; CHIKHAOU, M. Modelling climate change impacts on hydrology in agricultural watershed in southern Québec. *Canadian Water Resources Journal*. V.40 p. 71-86. 2015.

GORDON, H. B.; ROTSTAYN, L. D.; MCGREGOR, J. L.; DIX, M. R.; KOWALCZYK, E. A.; O'FARRELL, S. P.; WATERMAN, L. J.; HIRST, A. C.; WILSON, S. G.; COLLIER, M. A.; WATTERSON, I. G.; ELLIOTT, T. I. The CSIRO Mk3 Climate System Model. Aspendale: CSIRO Atmospheric Research; 2002. <https://doi.org/10.4225/08/585974a670e09>

GOODCHILD, M.; PARKS, B.; STEYART, L. *Environmental Modelling with GIS*, Oxford: Oxford University Press, 1993.

GOSAIN, A.K.; RAO, S.; BASURAY, D. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science*, v. 90, n. 3. 2006.

GUERRA, A.J.T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 16, n. 1, p. 32-37, 2005.

GUIMARÃES, A.P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2009.

GUZHA, A.C.; RUFINO, M.C.; OKOTH, S.; JACOBS, S.; NÓBREGA, R.L.B. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 15, p. 49-67, 2018.

HAMDY, O.; ZHAO, S.; SALHEEN, M.A.; EID, Y.Y. Analyses the driving forces for urban growth by using IDRISI Selva Models Abouelreesh – Aswan as a Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 9, n. 3, p. 226-232, 2017.

- HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Climatic Change*, v. 112, p. 243-251, 2012.
- HAWKINS, E.; SUTTON, R. Time of emergence of climate signals. *Geophysical Research Letters*, Washington, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2012.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais*. Porto Alegre: Bookman, 2ª edição, p. 900, 2001.
- HE, X.; ZHOU, J.; ZHANG, X.; TANG, K. Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. *Regional Environmental Change*, v. 6, p. 62-70. 2006.
- HTUT, A.Y.; SHRESTHA, S. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change of the Bago River Basin in Myanmar. *Excellent Science in Asean*, p. 26. 2015.
- INES, A.V.M.; HANSEN, J.W. Bias correction of daily MCG rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 138, n. 1-4, p. 44-53, 2006.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA). 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 15 de jun. 2015.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. Novos cenários climáticos. 2007. Disponível em <[http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC pdf](http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC%20pdf)>. Acesso em jul. 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PLACE ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 2007.
- JAIN, M.K.; DAS, D. Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and Remote Sensing. *Water Resources Management*, v. 24, n. 10, p. 2091-2112, 2009.
- JENSON, S.K.; DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- JOSEPH, J.; GHOSH, S.; PATHAK, A.; SAHAI, A.K. Hydrologic impacts of climate change: Comparisons between hydrological parameter uncertainty and climate model uncertainty. *Journal of Hydrology*, v. 566, p. 1-22, 2018.
- KIM, J.; CHOI, J.; CHOI, C.; PARK, S. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of The Total Environment*, v. 452-453, p. 181-195, 2013.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LIEBERTRAU, A.M. Measures of association. Newbury Park, CA: Sage Publications. Quantitative, 1983.

LIMA, A.G.M.; MELO, A.M.B.L. Relevô In: Governo do Estado da Paraíba/Secretaria da Educação/UFPB. Atlas Geográfico do Estado da Paraíba. Ed. Grafiset, 1985.

LU, X.-X.; RAN, L.-S.; LIU, T.; JIANG, S.-R.; ZHANG, S.-R.; WANG, J.-J. Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, v. 28. n. 1, p. 1-14. 2013.

MA, Z.; REDMOND, R.L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 61, n. 4, p. 435-439, 1995.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 4, p. 735-741, 2003.

MAGALHÃES, A.G.; MONTENEGRO, A.A.A.; ANDRADE, C.W.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. *Revista Ambiente e Água*, v. 13, n. 6, p. 1-19, 2018.

MANZATTO, H. R. H; CUNHA, T. J. F; SILVA, C. A; MATOS, J. A. DE; RAMOS, D. P. Diagnóstico ambiental como subsídio ao desenvolvimento sustentável para produção rural em comunidades das microbacias hidrográficas no estado do Rio de Janeiro. *Embrapa Solos - CNPS*, n. 8, 1998, 4p.

MARENGO, J.; JONES, R.; ALVES, L.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modelling system, *International Journal of Climatology*, v. 30, p. 1-15, 2009.

MARENGO, J.A., JONES, R., ALVES, L.M., VALVERDE, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, V. 29 n.15, p. 2241-2255. 2009.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALÁ, R.C.S.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; MORAES, O.L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 23, p. 1-21, 2017b.

MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, v. 128, n. 1, p. 23-34, 2014.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017a.

MEGAHED, Y.; CABRAL, P.; SILVA, J.; CAETANO, M. Land cover mapping analysis and urban growth modelling using Remote Sensing techniques in Greater Cairo Region – Egypt. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 4, n. 3, p. 1750-1769, 2015.

MELO NETO, J. de O.; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de; MELLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

MILLER, S.N.; SEMMENS, D.J.; GOODRICH, D.C.; HERNANDEZ, M.; MILLER, R.C.; KEPNER, W.G.; GUERTIN, D.P. The automated geospatial watershed assessment tool. *Environmental Modelling and Software*, v. 22, n. 3, p. 365-377, 2007.

MOHOR, G.S.; MENDIONDO, E.M. Economic indicators of hydrologic drought insurance under water demand and climate change scenarios in a Brazilian context. *Ecological Economics*, v. 140, p. 66-78, 2017.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUKUNDAN, R.; PRADHANANG, S.M.; SCHNEIDERMAN, E.M.; PIERSON, D.C.; ANHANDI, A.; ZION, M. S.; MATONSE, A.H.; LOUNSBURY, D.G.; STEENHUIS, T.S. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology* V.183. p. 110–119. 2012.

MULLAN, D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *Catena*, v. 109. p. 234-246, 2013.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. Special report on emissions scenarios. Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, Relatório Técnico. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000, 612p.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part i-a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282–290, 1970.

NASUTI, S.; LITRE, G. Relatório Síntese do Projeto. Estudos Relativos às Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos para embasar o Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas, 2014.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation - version 2009. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas AgriLife Research, 2011. 618 p.

NIGEL, R.; RUGHOOPUTH, S.D.D.V. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *Catena*, v. 82, n. 2, p. 191-205, 2010.

NOLLA, D. Erosão do solo o grande desafio. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Departamento de Zoologia, 1982.

NOVO, E.M.L.M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 308p.

O'NEAL, M.R.; NEARING, M.A.; VINING, R.C.; SOUTHWORTH, J.; PFEIFER, R.A. Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena*, v. 61, n. 2, p. 165-184, 2005.

OLIVEIRA, L.B.; RIBEIRO, M.R.; FERRAZ, F.B.; JACOMINE, P.K.T. Classificação de solos Planossólicos do sertão do Araripe. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n.4, v.27, p.685-693, 2003.

OUYANG, F.; ZHU, Y.; FU, G.; LÜ, H.; ZHANG, A.; YU, Z.; CHEN, Y. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, v. 29, p. 1781-1795. 2015.

PACHECO, J.D.; HEWITT, R.J. Modelado del cambio de usos del suelo urbano a través de Redes Neuronales Artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *Geofocus*, v. 14, n. 1, p.1-22, 2014.

PARAÍBA Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, Brasília, 2006.

PASCUAL, D.; PLA, E.; LOPEZ-BUSTINZ, J.A.; RETANA, J.; TERRADAS, J. Impacts of climate change on water resources in the mediterranean basin: a case study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*. V. 60 p. 2132-2147. 2015.

PBMC, 2013: Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 28 p.

PENG, D.Z.; XU, Z.X. Simulating the impact of climate change on streamflow in the Tarim River basin by using a modified semi-distributed monthly water balance model. *Hydrological processes*, v. 24, n. 2, p. 209-216, 2010.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFFMAN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*. V. 58. p. 77 – 87. 2013.

PEREIRA, D.R.; ALMEIDA, A.Q.; MARTINEZ, M.A.; ROSA, D.R.Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 4, p. 1350-1358, 2014.

PEREIRA, D.R.; MARTINEZ, M.A.; SILVA, D.D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 5, p. 149–163, 2016.

PILZ, T.; DELGADO, J.M.; VOß, S.; VORMOOR, K.; FRANCKE, T.; COSTA, A.C.; MARTINS, E.; BRONSTERT, A. Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil: About the added value of a process-based hydrological model. *Hydrology and Earth Systems Science Discussion*, 2018.

PIMENTEL, D. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, v. 8, n. 1, p. 119-137, 2006.

PIRES, G.F.; ABRAHÃO, G.M.; BRUMATTI, L.M.; OLIVEIRA, L.J.C.; COSTA, M.H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R.J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 228-229, n. 15, 286-298, 2016.

PONTIUS Jr., R.G., Si, K. The total operating characteristic to measure diagnostic ability for multiple thresholds. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 28 (3), 570–583. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.862623>, 2014.

PRATI, R.C.; BATISTA, G.E. A.P.A.; MONARD, M.C. Curvas ROC para avaliação de classificadores. *IEEE Latin America Transactions*, v. 6, n. 2, p. 215-222, 2008.

RENNÓ, C.R.; SOARES, J.V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Relatório técnico parcial. São José dos Campos: INPE, 2001, 65p.

ROCHA, J.S.M.; KURTS, S.M.J.M. Manual de manejo integrado de bacias Hidrográficas. 4 ed. Santa Maria: UFSM/CCR, p. 13-120, 2001.

ROFFE, T. G. (2012). Dinâmica da produção de sedimentos devido a mudanças no uso da terra: estudo de caso na bacia de Chambas, província Ciego de Ávila, Cuba. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia, Ambiente e Planejamento. São Paulo, Editora Contexto, 2005p.

SABÓIA, M.A.M.; SOUZA FILHO, F.A.; ARAÚJO JÚNIOR, L.M.; SILVEIRA, C.S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, 2017.

SAHARIA, A.M.; SARMA, A.K. Future climate change impact evaluation on hydrologic processes in the Bharalu and Basistha basins using SWAT model. *Natural Hazards*, v. 92, n. 3, p. 1463-1488, 2018.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B.; Araújo, S. B.; SAMPAIO, G. R. Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência. Recife: Ed. Universitária, 2003, 202p.

SANTANA, E.F.; VIDAL BATISTA, L.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Multispectral image unsupervised segmentation using watershed transformation and cross-entropy minimization in different land use. *GIScience and Remote Sensing*, v. 51, n. 6, p. 613-629, 2014.

SANTOS, A. F. dos. Estudo agroambiental de uma microbacia hidrográfica, visando sua sustentabilidade. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.; SRINIVASAN, V.S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. *Okara: Geografia em Debate (UFPB)*, v. 1, p. 16-32, 2007.

SANTOS, J.Y.G. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2015.

SCHMUGGE, T.J.; KUSTAS, W.P.; RITCHIE, J.C.; JACKSON, T.J.; RANGO, A. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, v. 25, n. 12, p. 1367-1385, 2002.

SEABRA, V.S, XAVIER, R.A.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P.C. Mapeamento do uso e cobertura do solo da bacia do Rio Taperoá: região semiárida do estado da Paraíba. *Caminhos de Geografia*, v. 15, n. 50, p.127-37, 2014.

SETEGN, S.G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI, B.; MELESSE, A.M. Delimitação Espacial da Vulnerabilidade à Erosão do Solo na Bacia do Lago Tana, Etiópia, *Processos Hidrológicos*, v. 23, n. 26, p. 3738-3750, 2009.

SHRESTHA, M.K.; RECKNAGEL, F.; FRIZENSCHAF, J.; MEYER W. Future climate and land uses effects on flow and nutrient loads of a Mediterranean catchment in South Australia. *Science of The Total Environment*, v. 590-591, p. 186-193, 2017.

SILVA, F. J.; SILVA, J. R. C. Produtividade de um solo litólico associada ao controle da erosão por cordões de pedra em contorno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, n. 3, p. 435-440, 1997.

SILVA, K. S. T.; ALMEIDA, A. M.; SILVA, T. S. F. Influência de determinantes ambientais na vegetação da caatinga. *Sociedade e Território*, v. 29, p. 183-198, 2017.

SILVA, L.P. Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá, Dissertação, PPGEU/UFPB João Pessoa, 2007.

SILVA, Marcela Alves da. Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do Rio Taperoá - PB. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SILVA, R.M.; MEDEIROS I.C. Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT. *Geofocus*, v. 14, n. 3, p. 211-231, 2014.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. v. 12, n. 5, p. 520-526, 2008.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; DOS SANTOS, J.Y.G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, v. 33, p. 117-125, 2018a.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; DOS SANTOS, J.Y.G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, v. 33, p. 117-125, 2018.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MARANHÃO, K.U.A.; SILVA, A.M.; LIMA, V.R.P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. *Earth Sciences Research Journal*, v. 22, n. 3, p. 175-186, 2018b.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, L.P. Spatial analysis of vegetal cover and sediment yield in Tapacurá river catchment based on remote sensing and GIS. *Land Reclamation*, v. 42, n. 1, p. 5-16, 2010.

SILVA, V.A.; MOREAU, M.S.; MOREAU, A.M.S.S.; REGO, N.A.C. Uso da terra e perda de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Colônia, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n.3, p. 1350-1358, 2011.

SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. Processos Erosivos in: *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2003.

SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceará, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm. *Water Resources Research*, v. 39, 1307, 2003.

SOUZA, B.I.; SUERTEGARAY, D.M.A.; LIMA, E.R. V. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do Cariri Paraibano. *Mercator*, v. 8, n. 16, p. 217-232, 2009.

SRINIVASAN, V.S.; PAIVA, F.M.L. Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. *Science China Technological Sciences*, v. 52, n. 11, p. 3348-3356, 2009.

STEPHENS, C.M.; JOHNSON, FM; MARSHALL, L.A. Implications of future climate change for event-based hydrologic models. *Advances in Water Resources*, v. 119, p. 95-110, 2018.

TANG, L.; YANG, D.; HU, H.; GAO, B. Detecting the effect of land-use change on streamflow, sediment and nutrient losses by distributed hydrological simulation. *Journal of Hydrology*, v. 409, p. 172-182, 2011.

TAVEIRA, B.D.A. Processos hidrossedimentológicos em cenários climáticos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, Serra do Mar Paranaense. *Dissertação (Mestrado em Geografia)*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R.M.S.P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D.A.; SANTANA, M.O.; SESTINI, M.F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p. 197-206, 2018.

TORRES, R.R.; LAPOLA, D.M.; GAMARRA, N.L.R. Future climate change in the Caatinga. In: DA SILVA, J.M.C.; Leal, I.R.; TABARELLI, M. (Eds.) *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*. Springer-Verlag, 2017.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade (UFRGS), ABRH, Porto Alegre, 1997.

TUCCI, C.E.M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 669 p.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D., Mendes, J. N., LIMA, D. J., Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data, Computers & Geosciences, Volume 32, Issue 8, 2006, Pages 1169-1181, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.10.019>

VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. Rev. bras. meteorol. [online]. 2010, vol.25, n.1, pp.125-145. ISSN 0102-7786. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100011>.

VEGA, J.M.; DIAZ, A.; NAVA, J.M.; GALLARDO, M.; ECHAVARRÍA, P. Assessing Land Use-Cover Changes and Modelling Change Scenarios in Two Mountain Spanish National Parks. Environments, v. 4, n. 4, p. 79-93, 2017.

VITAL, R. S. O.; GIRÃO, O. Análise da suscetibilidade da paisagem à erosão na bacia do alto curso do Rio Taperoá (PB). OKARA:Geografia em debate, v.9, n.1, p. 4-25, 2015.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.O.; KOMURO, Y.; WATANAB, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate. V. 23 p.6312-6335. 2010.

WAYNE, G.P. Representative Concentrations Pathway. The begginers guide. Skepticals Science. V. 25. 2013.

WILLIAMS, J.R. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resources Bulletin, v. 11 n. 5, p. 965-974, 1975. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>

XAVIER-DA-SILVA, J. Geoprocessamento e Análise ambiental. Revista Brasileira de Geografia, v. 54, n. 3, p. 47-61, 1992.

XAVIER-DA-SILVA, J. Geoprocessamento para a Análise Ambiental. 1. ed. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, 2001.

XAVIER-DA-SILVA, J.; CARVALHO FILHO, L.M. Sistemas de Informação Geográfica: uma proposta metodológica. In: Conferência Latino-Americana sobre Sistemas de Informação Geográfica, 4 Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, Anais... São Paulo: USP, p. 609-628, 1993.

XU, Y.-P.; ZHANG, X.; RAN, Q; TIAN, Y. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. Journal of Hydrology, v. 483, p. 51-60, 2013.

YANG, D.; KANE, D.; ZHANG, Z.; LEGATES, D.; GOODISON, B. Bias corrections of long-term (1973–2004) daily precipitation data over the northern regions. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L19501, 2005.

YU, H.; CHEN, S.T.; BROWN, B. Operational tropical cyclone forecast verification practice in the western north pacific region. *Tropical Cyclone Research and Review*, v. 1, n. 3, p. 361-371, 2012.

ZHANG, X.; XU, Y.; FU, G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change, *Journal of Hydrology*, v. 515, p. 205-222, 2014.

ZHANG, X.; ZWIERS, F.W.; HEGERL, G. The influence of data precision on the calculation of temperature percentile indices. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 3, p. 321-327, 2009.

ZHENG, H.; CHIEW, F.H.S; CHARLES, S.; PODGER, G. Future climate and runoff projections across South Asia from CMIP5 global climate models and hydrological modelling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 18, p. 92-109, 2018.