



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO

INVESTIGANDO OS IMPACTOS DO CLIMA FUTURO E DO USO E
COBERTURA DA TERRA NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA DO BIOMA
CAATINGA

IRLA GABRIELE NUNES HENRIQUES

João Pessoa-PB
Fevereiro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO

INVESTIGANDO OS IMPACTOS DO CLIMA FUTURO E DO USO E
COBERTURA DA TERRA NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA DO BIOMA
CAATINGA

IRLA GABRIELE NUNES HENRIQUES

Relatório apresentado em cumprimento às exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (PPGG/UFPB), para obtenção do título de mestre em Geografia. Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente.

LINHA DE PESQUISA: Gestão do Território e Análise Geoambiental

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa-PB
Fevereiro de 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

H519i Henriques, Irla Gabriele Nunes.

Investigando os impactos do clima futuro e do uso e cobertura da terra nos processos hidrossedimentológicos em uma bacia do bioma Caatinga / Irla Gabriele Nunes Henriques. - João Pessoa, 2022.
93 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Mudança climática. 2. Modelagem hidrossedimentológica. 3. Modelo SWAT. 4. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 5. Sensoriamento remoto. 6. Uso da terra - Mudança. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 551.583(043)

“INVESTIGANDO OS IMPACTOS DO CLIMA FUTURO E DO USO E COBERTURA DA TERRA NOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA DO BIOMA CAATINGA”

por

Irla Gabriele Nunes Henriques

Dissertação de Mestrado apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito total para obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Área de concentração: **Território, trabalho e Ambiente**

Aprovado por:


Prof. Dr. Richarde Marques Da Silva
Orientador – UFPB


Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Examinador interno – UFPB


Prof. Dr. José Yure Gomes Dos Santos
Examinador externo – UFRN

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Cursos de Mestrado e Doutorado em Geografia
Fevereiro/2022**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Delimitação do Semiárido Brasileiro.....	19
Figura 2-Representação do Ciclo Hidrológico	23
Figura 3-Discretização espacial dos processos de um Modelo de Circulação Global. (GCM).....	33
Figura 4- Evolução das emissões radioativas para cada cenário ao longo do tempo	36
Figura 5 - Mapa de localização da Bacia Representativa de Sumé-PB.....	39
Figura 6 - Mapa do tipo de solo da BRS	42
Figura 7 - Imagens de Satélite	43
Figura 8 - Esquema com as etapas e dados utilizados na modelagem	49
Figura 9 - Mapa de declividade da Bacia Representativa de Sumé-PB	52
Figura 10- Mapas de uso da terra dos anos de 1984 e 2019 da Bacia Representativa de Sumé-PB	61
Figura 11 - Espacialização da Precipitação na BRS, no período de 1976 à 1979	62
Figura 12 - Espacialização da Precipitação na BRS, no período de 1995 à 2017	63
Figura 13- Gráfico com a comparação da vazão observada e calculada na 1ª simulação	64
Figura 14 - Gráfico com a comparação da vazão observada e calculada na 2ª simulação	65
Figura 15 - Mapa com a distribuição do escoamento superficial na BRS, sendo o mapa A referente a simulação para o uso de 1984 e o mapa B referente a simulação com o uso de 2019.	67
Figura 16-Mapa com a distribuição da produção de sedimentos na BRS, sendo o mapa A referente a simulação para o uso de 1984 e o mapa B referente a simulação com o uso da terra de 2019.	69
Figura 17-Mapa com o cenário de uso da terra regular	70
Figura 18-Mapa com o cenário de uso da terra otimista	72
Figura 19- Mapa com o cenário de uso da terra pessimista.....	73

Figura 20– Espacialização do escoamento superficial nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE intermediário (RCP 4.5)	75
Figura 21-Espacialização do escoamento superficial nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE altas (RCP.8.5).....	76
Figura 22-Espacialização da produção de sedimento nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE baixo (RCP.4.5).....	78
Figura 23-Espacialização da produção de sedimento nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE altas (RCP 8.5).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cenários RCP (Representative Concentration Pathways) climáticos futuros	35
Tabela 2 - Classificação dos solos da BRS	41
Tabela 3 - Descrição dos postos que foram utilizados na primeira simulação.....	44
Tabela 4 - Descrição dos postos que foram utilizados na segunda simulação	45
Tabela 5- Parâmetros climáticos utilizados no WGEN	46
Tabela 6-Associação das classes de uso do solo da Bacia Representativa de Sumé com as classes existentes no banco de dados do SWAT	50
Tabela 7-Descrição dos perfis da Embrapa utilizados na pesquisa	51
Tabela 8- Parâmetros utilizados para a calibração do SWAT para a BRS.....	54
Tabela 9 – Localização geográfica do centroide da grade do modelo climático utilizado.....	58
Tabela 10 - Variação das classes de uso da terra da BRS	59
Tabela 11 - Resultados estatísticos da calibração.....	64
Tabela 12 -Tabela com a Variação das classes.....	71
Tabela 13 - Tabela com a Variação das classes entre os cenários de uso da terra 2019 e otimista	71
Tabela 14-Tabela com a Variação das classes entre os cenários de uso da terra 2019 e pessimista	72

LISTA DE SIGLAS

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

APP – Área de Proteção Permanente

ARS – *Agricultural Research Service*

AR5 – Quinto Relatório do IPCC

AR6 – Sexto Relatório do IPCC

ASA – Articulação do Semiárido Brasileiro

BRS – Bacia Representativa de Sumé

CN – Curva número

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

COE – Coeficiente de eficiência

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

GCM – *General Circulation Model*

GEE – Gases do Efeito Estufa

HRU – *Hidrologic Response Units*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IIASA – *International Institute for Applied Systems Analysis*

IMAGE – *Integrated Model to Assess the Global Environment*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – *Intergovernmental Painel on Climate Change*

ISI-MIP – *Inter-Sectoral Impact Model Inter-Comparison Project*

JGCRI – *Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute*

MDE – Modelo digital de elevação

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MCGs – Modelos de Circulação Global

MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*

MWO – Organização Meteorológica Mundial

NEB – Nordeste do Brasil

OLI – *Operational Land Imager*

PTDRS – Plano Territorial Desenvolvimento Rural Sustentável

RCP -*Representative Concentration Pathways*

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste.

SUFI-2 – *Sequential Uncertainty Fitting 2*

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

SWAT-CUP – *SWAT Calibration and Uncertainty Programs*

TM – *Thematic Mapper*

TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

USDA – *United States Department of Agriculture*

USGS – *United States Geological Survey*

USLE – *Universal Soil Loss Equation*

UTM – *Universal Transversa de Mercator*

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE SIGLAS	7
AGRADECIMENTOS	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT	13
CAPÍTULO 1	14
1. INTRODUÇÃO	14
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	16
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 A Ciência Geográfica e a Pesquisa	17
2.2 Região Semiárida do Brasil e o Bioma Caatinga	18
2.3 A Bacia Hidrográfica e o Ciclo Hidrológico	21
2.4 Erosão e Cobertura Vegetal	25
2.5 A Modelagem Hidrossedimentológica	28
2.6 Mudanças Climáticas	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Caracterização da Área de Estudo	38
3.2 Dados Utilizados.....	40
3.2.1 <i>Tipos do Solo</i>	40
3.2.2 <i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i>	42
3.2.3 <i>Uso e Cobertura da Terra</i>	43
3.2.4 <i>Dados Hidrometeorológicos</i>	44
3.3 Descrição do Modelo <i>Soil and Water Assessment Tool (SWAT)</i>	46
3.3.1 <i>Escoamento Superficial</i>	47
3.3.2 <i>Produção de Sedimentos</i>	48
3.3.3 <i>Construção do Banco de Dados de Entrada no Modelo</i>	48
3.3.4 <i>Discretização da Bacia Hidrográfica</i>	49
3.3.5 <i>Unidades de Resposta Hidrológica (HRU)</i>	49
3.3.6 <i>Classes de Uso da Terra e Tipos do Solo</i>	50

3.3.7 Classes de declividade	51
3.4 Análise Estatística de Desempenho do SWAT	52
3.5 Calibração do Modelo SWAT	53
3.6.1 Cenários Hipotéticos de Uso e Cobertura da Terra	55
3.6.2 Projeções dos Cenários Climáticos Futuros	57
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Mapeamento e Análise do Uso da Terra na BRS	59
4.2 Espacialização da Precipitação Histórica	62
4.3 Resultado da Calibração	63
4.4 Análise das Mudanças de Uso da Terra no Processo de Escoamento Superficial	65
4.5 Mudança do Uso da Terra e a Produção de Sedimentos.....	68
4.6 Cenários Futuros	70
4.6.1 Análise dos Cenários Uso da Terra na BRS.....	70
4.6.2 Análise do Processo de Escoamento Superficial em diferentes Cenários de Uso da Terra e com Diferentes Cenários Climáticos	74
4.6.3 Análise do Processo de Produção de Sedimentos em diferentes Cenários de uso da Terra e com Diferentes Cenários de Clima.....	77
6. CONCLUSÃO.....	81
7. REFERÊNCIAS	82
Apêndice (A): Dados utilizados no Gerador Climático – WGEN	93
Apêndice (B): Valores dos parâmetros de calibração	94

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela bênção da vida, pelas pessoas que Ele escolheu para contribuir na minha caminhada até aqui e por ser o meu maior pilar nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais Inácio Henriques de Sousa (*In Memoriam*) e Girleide Nunes Henriques por todo amor, cuidado, ensinamentos e por me apoiarem em todos os momentos da minha vida. Obrigada Mainha, por ser minha melhor amiga e a pessoa mais importante da minha vida, amo-te!

Agradeço aos meus irmãos Íkallo George e Ingrid Gisely pelo incentivo e apoio na concretização dos meus sonhos e por me dar a graça de ser tia. Otávio, Guilherme e Laís são luz e esperança nas nossas vidas.

Gratidão à minha família Nunes por todo o amor e motivação para a finalização dessa etapa. Em especial à minha tia Terezinha por sempre me encorajar nas conquistas dos meus sonhos. Agradeço à Neta e família por serem minha segunda casa em João Pessoa-PB. Amo vocês!

Agradeço ao meu orientador Richarde Marques por ter acreditado em mim desde o segundo período da graduação e ter me dado a oportunidade de participar do LEPPAN. Gratidão por todo o conhecimento compartilhado e pela paciência durante essa trajetória. Sem sua ajuda eu não teria conseguido. Agradeço também a todos os professores que participaram da minha vida acadêmica.

Obrigada aos meus amigos, em especial Nádja pela amizade, apoio e por sempre estar disponível a me ajudar quando eu preciso. Agradeço também à Marcella, minha amiga de toda a vida, pelo amor e parceria todos esses anos.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram com essa etapa tão importante da minha vida. Esse “caminho” foi longo e de grande crescimento e vai ficar marcado pra sempre na minha vida! Obrigada!

RESUMO

A erosão hídrica do solo é um processo natural, mas pode ser intensificado pela ação humana que ao retirar a cobertura vegetal provoca a diminuição da infiltração e o aumento do escoamento superficial. Os estudos voltados para esse tema têm grande relevância para a preservação de solos e dos recursos hídricos, principalmente em bacias localizadas no bioma Caatinga no Brasil, que se caracterizam por recorrentes secas e eventos extremos, que afetam milhões de pessoas todos os anos. Assim, investigar os impactos do clima futuro e do uso e cobertura da terra nos processos hidrossedimentológicos nesse bioma são fundamentais para o gerenciamento dos recursos hídricos da região. Uma das formas de estudar os processos hidrossedimentológicos futuros é através do acoplamento entre séries temporais simuladas de dados de precipitação e temperatura em modelo hidrológico. No presente estudo foi utilizado o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) para avaliar os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos em dois períodos distintos na Bacia Representativa de Sumé que possui uma área total de 146,5 km² e está localizada na região semiárida da Paraíba. Para a ocorrência da modelagem foi necessário utilizar dados físicos da região, como dados climatológicos, dados de uso da terra, tipo do solo e o modelo digital de elevação; com isso, foi feita a modelagem para diferentes realidades (com base no uso da terra dos anos 1984 e 2019) e diferentes cenários futuros de uso da terra (regular, otimista e pessimista) e cenários de clima futuro com base em diferentes níveis de emissões de gases do efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5). Para a calibração do modelo, foram utilizados o software SWAT-CUP e um período de vazão diária, que foi de 27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978 da sub-bacia Gangorra. Foi obtido um resultado de calibração considerado aceitável com o coeficiente eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) igual a 0,59 e o R² igual a 0,65. Os resultados mostraram o quanto a cobertura vegetal reduz o escoamento superficial e a produção de sedimentos nos diferentes cenários estudados e o quanto essas variáveis são influenciadas pelo uso da terra, tipo do solo e clima.

Palavras-chave: Semiárido, modelagem hidrossedimentológica, modelo SWAT, SIG, sensoriamento remoto, mudança no uso da terra.

ABSTRACT

Soil erosion by water is a natural process, but it can be intensified by human action such as when removing the vegetation cover, which causes a reduction in infiltration and an increase in surface runoff. Studies focused on this topic are of great relevance for the preservation of soils and water resources, especially in basins located in the Caatinga biome in Brazil, which are characterized by recurrent droughts and extreme events, which affect millions of people every year. Thus, investigating the impacts of future climate as well as the use and cover on hydro sedimentological processes in this biome are fundamental for managing the region's water resources. One of the ways to study future hydro sedimentological processes is through the coupling between simulated time series of precipitation and temperature data in a hydrological model. In the present study, the hydro sedimentological model Soil and Water Assessment Tools was used to assess the processes of surface runoff and sediment production in two different periods in the Sumé Representative Basin, which has a total area of 146.5 km² and is located in the semi-arid region of Paraíba. For the occurrence of modeling was necessary to use physical data of region, such as weather data, data about the use of land, soil type and digital elevation model; As a result, modeling was carried out for different realities (based on land use in the years 1984 and 2019) and different future land use scenarios (regular, optimistic and pessimistic) and future climate scenarios based on different levels of emissions of greenhouse gases (RCP 4.5 and RCP 8.5). To calibrate the model, SWAT-CUP software and a daily flow period, from March 27, 1977 to January 13, 1978 of the Gangorra sub-basin were used. A calibration result considered acceptable was obtained with the Nash-Sutcliffe's coefficient of efficiency (COE) of 0.59 and the R² of 0.65. The results showed how much vegetation cover reduces surface runoff and sediment production in the different scenarios studied and how much these variables are influenced by land use, soil type and climate.

Keywords: Semi-arid, runoff-erosion modelling, SWAT model, GIS, remote sensing, land use change.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já são uma realidade nos dias atuais, segundo o relatório mais recente do *Intergovernmental Painel on Climate Change* (IPCC), que consta no AR6 (IPCC, 2021). Desde a década de 1950 o planeta vem precisando um aumento da temperatura da superfície e esse aquecimento foi muito influenciado pelas ações humanas, devido às emissões de gases do efeito estufa (GEE), ao desmatamento e às queimadas (IPCC, 2021). Nas projeções futuras do IPCC, são apontadas a intensificação das mudanças climática, o que poderá acarretar implicações diretas no regime de chuvas de todas as regiões do planeta (IPCC, 2021).

As mudanças climáticas afetam os ciclos biogeoquímicos do planeta, e, consequentemente, a precipitação (NOBRE e MARENGO, 2017). Essa por sua vez desempenha um papel significativo no ciclo hidrológico, principalmente em regiões semiáridas, pois, a chuva é um recurso natural essencial para as atividades socioeconômicas globais. Como afirma Marengo et al. (2011) ao citar que as mudanças climáticas iram afetar diretamente a região semiárida do Brasil, que historicamente já é afetada com a escassez de chuva, podendo ocorrer a intensificação da dificuldade do acesso a água, principalmente para a população mais vulnerável socioeconomicamente. Nesse sentido, conhecer o comportamento futuro dos processos hidrossedimentológicos é vital para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente no semiárido Nordeste do Brasil, onde existe um déficit hídrico significativo em grande parte do ano, devido a sazonalidade e a variabilidade temporal do regime pluviométrico (ZANELLA, 2014). Em decorrência desse comportamento climático, ocorrem eventos extremos esporádicos, que acarretam secas ou perdas de solo.

Nessa perspectiva, a erosão dos solos é um processo de desprendimento das partículas das camadas superiores do solo, sendo um dos fatores que contribuem para a degradação dos solos e esse, é um dos maiores problemas ambientais da atualidade. A erosão tem como consequências a perda de produtividade do solo, o assoreamento dos rios e a perda de qualidade da água dos rios (OLIVEIRA et al., 2018). Na região semiárida esse problema tem suas complexidades, pois, devido as condições físicas dessa região a erosão associada ao manejo irregular do solo vem provocando a perda de solo e o crescimento do processo de desertificação, que é um processo praticamente irreversível.

A erosão que ocorre nas vertentes das bacias hidrográficas é principalmente a erosão do tipo hídrica. Esse tipo de erosão é causado pela ação da precipitação e tem como principal consequência o

empobrecimento do solo agrícola (PISSARRA et al., 2005). Para entender como ocorre esse tipo de erosão e principalmente onde está ocorrendo, são necessários estudos hidrossedimentológicos.

O estudo dos processos hidrossedimentológicos de uma bacia localizada na região semiárido do Brasil tem ainda maior relevância pela variabilidade climática e os problemas com abastecimento hídrico que a população dessa região ainda sofre. Como o desenvolvimento dessa região está diretamente ligado a reserva de recursos hídricos, qualquer problema que venha a afetar isso, precisa de atenção por parte de cientistas e tomadores de decisão de gerenciamento de recursos hídricos.

Atualmente, diversos estudos vêm tentando estimar vazões e a produção de sedimentos em cenários futuros em escala de bacias hidrográficas mediante simulações climáticas e de uso e cobertura da terra, como os trabalhos de Taveira e Santos (2019) que avaliaram o efeito das mudanças climáticas na vazão e no transporte de sedimento em uma bacia hidrográfica do estado do Paraná e de Silva, A. M. (2019) que analisou múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do Rio Salgado, localizada no semiárido nordestino. Segundo Santos et al. (2018) tais estudos auxiliam os tomadores de decisão para um melhor planejamento da qualidade e gestão dos recursos hídricos em uma bacia, pois esses estudos permitem a compreensão de forma genérica do sistema hidrológico como um todo, possibilitando a simulação das realidades e podendo predizer situações futuras.

Segundo Marengo et al. (2016), existe uma grande probabilidade de aumento da frequência de ocorrência de períodos secos e dos fenômenos de secas no futuro do Nordeste do Brasil além de um aumento da temperatura, o que pode atingir diretamente a produção de alimentos, os recursos hídricos, a renda e a subsistência da população e isso pode acarretar elevadas taxas de degradação ambiental na região. Diante desse prognóstico das mudanças climáticas, há uma crescente preocupação com o gerenciamento futuro da água e do solo no bioma Caatinga. De acordo com Marengo et al. (2017) esse bioma é um dos mais frágeis diante das alterações climáticas e o uso da terra sem planejamento. Assim, as mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade de água e aumentar a degradação das terras no bioma Caatinga.

Nesse sentido, este estudo tem como ponto norteador investigar dos impactos do clima futuro e do uso e cobertura da terra sobre nos processos hidrossedimentológicos na Bacia Representativa de Sumé (BRS), localizada na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB). Este estudo busca ainda contribuir para aumentar o conhecimento acerca do comportamento de eventos futuros de chuva-vazão-erosão em diferentes usos e coberturas da terra no bioma Caatinga, servindo como material de apoio a

tomadores de decisão da região, responsáveis pelo planejamento estratégico da água e do solo nessa região.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar os impactos das mudanças climáticas e do uso e cobertura da terra no escoamento superficial e na produção de sedimentos em uma bacia típica do bioma Caatinga.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mapear e analisar as mudanças no uso e cobertura da terra em dois períodos (1984 e 2019).
- Propor cenários hipotéticos (regular, pessimista e otimista) de uso e cobertura da terra na BRS.
- Simular o escoamento superficial e a produção de sedimentos (1984, 2019 e 2040) na BRS.
- Analisar as relações do escoamento superficial e da produção de sedimentos em diferentes cenários de uso e cobertura da terra na BRS.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado a fundamentação teórica e científica que embasou este trabalho. Com a descrição de conceitos básicos para o entendimento da pesquisa, sendo dividido da seguinte forma, o entendimento da ciência geográfica na pesquisa; a região semiárida e o bioma caatinga; bacia hidrográfica e o ciclo hidrológico; a erosão e a cobertura vegetal e por fim, uma breve abordagem sobre a modelagem hidrossedimentológica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Ciência Geográfica e a Pesquisa

Por ter como objeto de estudo o espaço geográfico, a ciência geográfica tem um campo de estudo amplo o que possibilita diversos estudos e abordagens. Uma das vertentes de estudo geográfico são os fenômenos físicos, como a erosão e a influência que esse fenômeno tem no meio e na sociedade. Com isso, essa pesquisa se encaixa no método de análise neopositivista, ou geografia quantitativa teorética. Visto que se utiliza de muitas técnicas matemático-estatísticas e pelo uso de modelo para a melhor compreensão da realidade. Pois, segundo Christofoletti (1982), uma das principais características desse método é o uso de técnicas matemático-estatísticas nas análises geográficas, por isso geografia quantitativa e teorética, devido ao aspecto teórico metodológico das análises quantitativas.

Quanto ao conceito, a pesquisa será analisada pelo conceito de paisagem. Pela possibilidade da análise na escala de bacia hidrográfica e pelos diversos aspectos integrados que podem ser analisados no conceito de paisagem para a análise do fenômeno da erosão em uma bacia hidrográfica. O conceito de Paisagem foi definido por Bertrand (2004), como uma entidade global em que ocorre uma aliança dinâmica entre os elementos, sendo esses elementos físicos, antrópicos e biológicos. Com isso, a paisagem é o resultado local da combinação de fatores como: declividade, clima, rocha, manto de decomposição, hidrologia das vertentes com uma mesma dinâmica de geomorfogênese, pedogênese e mesma degradação antrópica da vegetação.

2.2 Região Semiárida do Brasil e o Bioma Caatinga

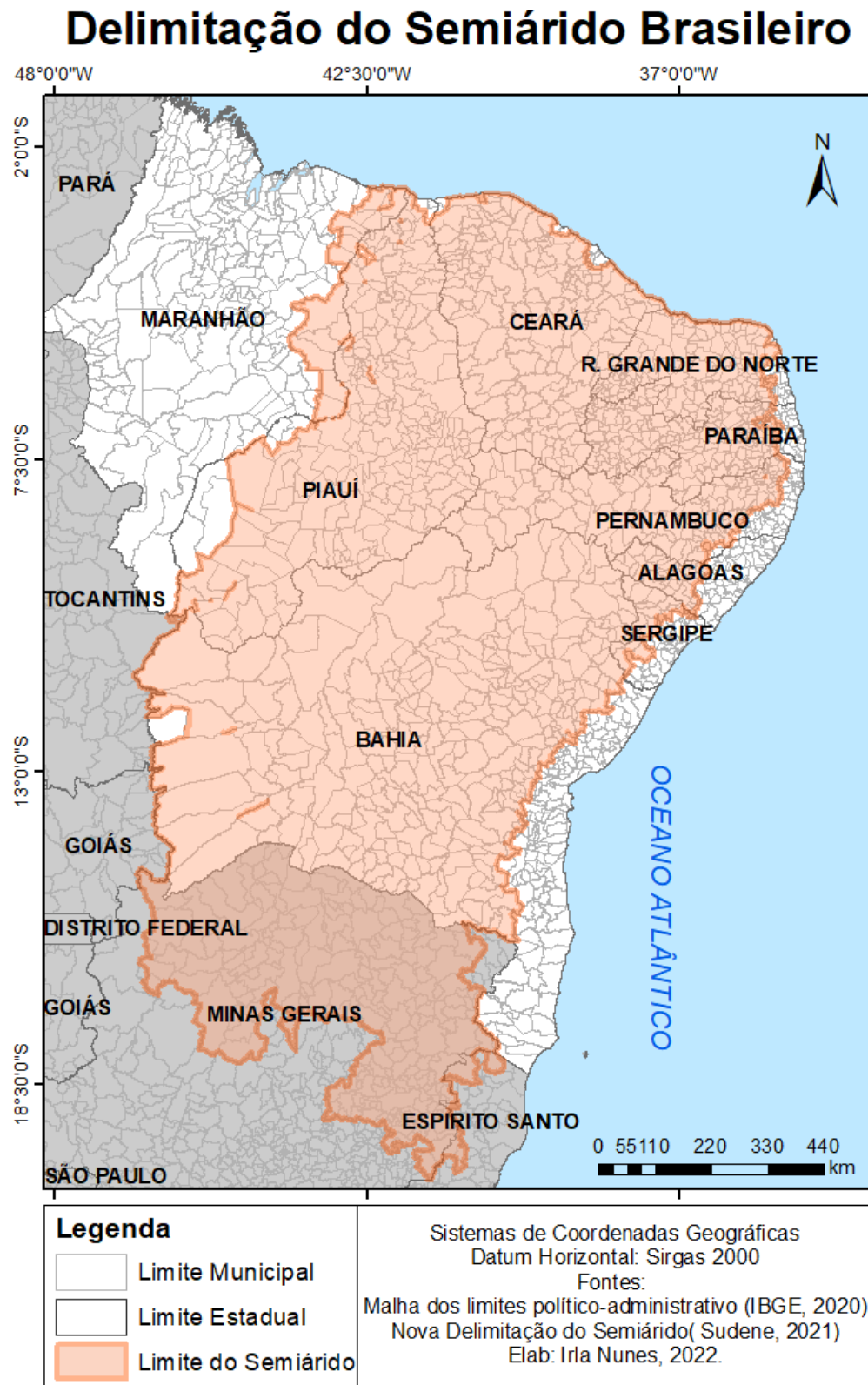
Uma região é dita como semiárida quando apresenta algumas características similares envolvendo aspectos climáticos, hídrico e fitogeográfico, dentre essas características estão: chuva distribuída de forma escassa e irregular ao longo do ano, umidade baixa, grandes períodos de insuficiência hídrica, falta de rios autóctones perenes e solos físico-quimicamente problemáticos, podendo ser parcialmente salinos ou carbonáticos (AB'SABER, 1999). Como também é considerado uma região semiárida quando o acúmulo da água precipitada é inferior a água perdida na evaporação e transpiração vegetal (ARAÚJO FILHO, 2013).

Segundo Ab'Saber (1999) existem três grandes regiões semiáridas existentes na América do Sul, a região Guajira, na Venezuela e na Colômbia; a diagonal seca do Cone Sul, na Argentina, Chile e Equador e o Nordeste seco do Brasil. Ainda segundo esse autor a região semiárida do nordeste brasileiro é uma das mais populosas do mundo. Com aproximadamente 27 milhões de habitantes, ou seja, 12% da população brasileira vivem nas terras semiáridas brasileira (ASA, 2020). De acordo com Araújo Filho (2013) essa região abrange cerca de 1,0 milhão de km².

Essa região foi delimitada pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), levando em consideração suas características físicas como o clima e a predominância das características de semiaridez, principalmente em relação a precipitação pluviométrica anual baixa. Como consequência dessa característica climática, a hidrografia é frágil, não conseguindo alimentar rios perenes durante os longos períodos de estiagem (IBGE, 2020).

De acordo com atualização aprovada nas Resoluções do Conselho Deliberativo da SUDENE de nº 150, de 13 de dezembro de 2021, 1.427 municípios pertencem ao semiárido brasileiro, incluindo os estados da Paraíba, Pernambuco, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo como pode ser observado na Figura 1. As principais características para a delimitação do Semiárido Brasileiro são, o índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm e o em relação a todos os dias do ano, o percentual diário de déficit hídrico ser igual ou superior a 60% (SUDENE, 2021).

Figura 1-Delimitação do Semiárido Brasileiro



Fonte: O autor.

Outra característica expressiva da região semiárida brasileira é pertencer quase que integralmente ao Bioma Caatinga. Este bioma é o único bioma exclusivamente brasileiro, mas é segundo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2009), um dos menos conhecidos cientificamente. Esse bioma ocupa aproximadamente 10% do território nacional, concentrando-se quase integralmente nos estados do Nordeste e em Minas Gerais. É um dos biomas mais degradados, apresentando segundo o MMA (2009) uma área de vegetação nativa de 441.117 km², o que equivale a apenas 53,38% de área remanescente. A principal causa dessa degradação intensa, seria a associação entre o corte da madeira para lenha, a abertura de pastos para a criação de bovinos e caprinos e a exploração dos recursos naturais na agricultura sem o devido manejo (TABARELLI; SILVA, 2004).

Além de que, em maior parte desse Bioma predomina o clima do tipo semiárido, com altas temperaturas médias anuais e com chuvas concentradas em quatro meses do ano e com uma grande variabilidade temporal e espacial. Assim, o desenvolvimento dessa região está diretamente ligado a disponibilidade de recursos hídricos (BRASIL, 2012). Dessa forma, fica evidente a importância da preservação das bacias hidrográficas para um melhor armazenamento desse recurso tão essencial para essa região nos períodos de estiagem.

Segundo o manual técnico da vegetação brasileira, o tipo de vegetação que predomina na Caatinga pode ser universalizado como Savana-Estépica, pois esse tipo de vegetação caracteriza bem os tipos de vegetação das áreas áridas. O tipo de vegetação é considerado “savânico” pode ter árvores, arbusto e ervas de forma relevante, porém não possui dominância fisionômica de árvores. Apesar dessa região ter a apresentação de uma florística endêmica a esse ambiente e com predominância de plantas espinhosas decíduais, apresenta também uma florística homologa de outras estépicas, como os encontrados nas regiões de clima temperados pré-andinos da Argentina e Bolívia (IBGE, 2012).

De acordo com Araújo Filho (2013), a maioria da vegetação de caatinga nativa já foi modificada em cerca de 60 a 70%. As principais atividades que contribuíram para isso foram a queimada para a preparação solo para a agricultura, abertura de pastagem de gramíneas para a pecuária e a extração de lenha. As mudanças climáticas e essa modificação do uso da terra sem um controle podem contribuir para intensificação da aridez da região e gerar grandes consequências para as gerações futuras (ARAÚJO FILHO, 2013).

2.3 A Bacia Hidrográfica e o Ciclo Hidrológico

Nesse trabalho, a escala de estudo será a escala de bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica foi descrita por Silveira (2001) como uma área natural de captação da precipitação, em que a rede de drenagem converge o seu escoamento para um único ponto, chamado de exutório (SILVEIRA, 2001). Sendo, uma importante escala de análise pela possibilidade interação entre os meios bióticos e abióticos.

A bacia hidrográfica também é definida como um meio de planejamento e gestão, como foi instituído na Lei de Número 9.433, de 8 de janeiro de 1997 que discerne sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos, onde no Art. 1º inciso V a bacia hidrográfica é definida como a unidade territorial de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e a atuação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Isso foi evidenciado e descrito por Pires, Santos, e Del Prette et al. (2002, p. 17), ao afirmar que:

O conceito de bacia hidrográfica tem sido cada vez mais expandido e utilizado como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental. Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de bacia hidrográfica envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes.

Dependendo do estudo, da função, da sua área; as bacias hidrográficas podem ser classificadas de diversas formas, podendo ser classificadas como sub-bacia, microbacias, bacias representativas, bacias experimentais e entre outras.

O tipo de classificação que foi utilizado nesse projeto é a classificação de bacia representativa, pois segundo Paiva e Paiva (2001), a bacia é classificada como representativa quando possui aparelhos de medição e registro dos fenômenos hidrológicos, que permitem o melhor entendimento desses fenômenos nessa bacia e em outras bacias próximas que possuem as mesmas características físicas, sendo assim, essa bacia uma representação dessa região homogênea. Além de ter uma avaliação climática, geológica, pedológica e hidrogeológica; outra característica que a bacias representativas tem que possuir é ter uma extensão entre 1 e 250 km² e o período de análise ser preferencialmente superior a 30 anos (PAIVA e PAIVA, 2001).

Araújo (2016) ainda enfatiza que para ser realizado um estudo em uma bacia representativa tem que haver a preservação das propriedades do solo e da cobertura vegetal durante a o estudo. Sendo o objetivo principal dos estudos em bacias representativas o levantamento de dados hidrológicos, principalmente de precipitação e vazão em grandes séries históricas (ARAÚJO, 2016).

Para entender bem os estudos hidrológicos e a ocorrência dos processos que atuam em uma bacia hidrográfica é preciso ter o conhecimento do funcionamento do ciclo hidrológico (Figura 2). O ciclo hidrológico é um importante fenômeno de análise dos estudos hidrológicos e foi definido por Silveira (2001) como um “fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre” (SILVEIRA, 2001, p.35). Como é corroborado pela afirmação de Guimarães (2017, p. 1) ao afirmar que o ciclo hidrológico pode ser descrito como, “Sequência fechada de fenômenos naturais pelos quais a água passa da atmosfera ao globo terrestre, na fase líquida ou sólida, e volta novamente a ela, na fase de vapor. A energia necessária para que o ciclo hidrológico se mantenha provém da energia solar”.

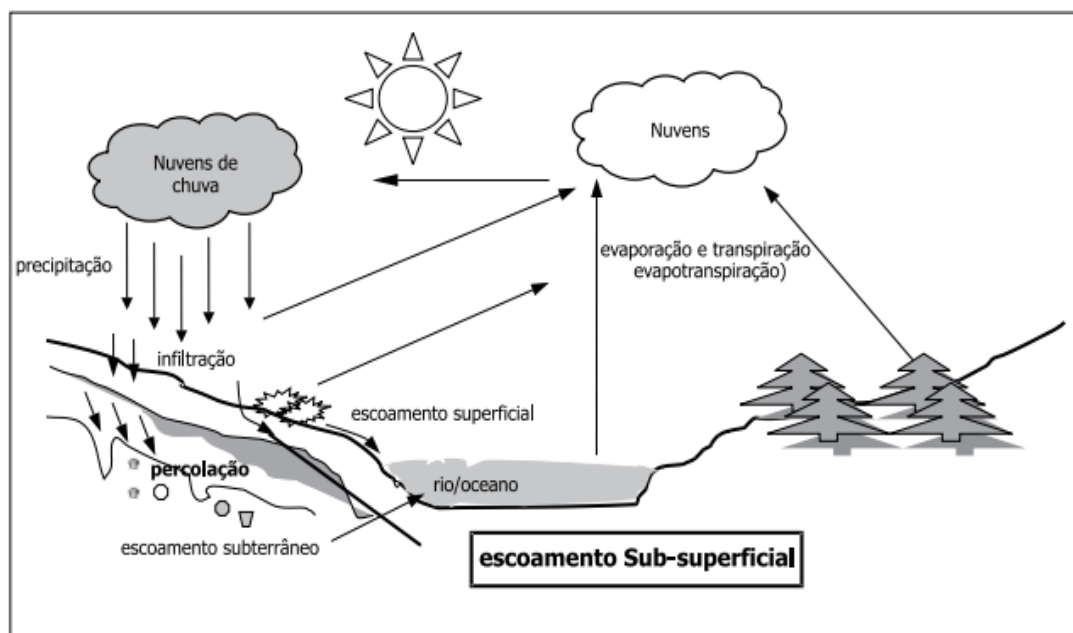
Os fenômenos naturais que compõem o ciclo hidrológico são, precipitação, evaporação, evapotranspiração, infiltração, condensação e escoamento (LORANDI E CANÇADO, 2002). Alguns desses importantes fenômenos serão descritos abaixo:

- Precipitação, é formada pela aglutinação e crescimento de pequenas gotículas em nuvens com significativa umidade e a presença de pequenas partículas em suspensão. Com isso, formam-se as gotas que devido ao peso caem em direção a superfície pela força gravitacional. (LORANDI E CANÇADO, 2002). Miranda et al. (2010) definiu a precipitação de maneira mais simples como sendo “toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre na forma de chuva, neve e granizo” (MIRANDA et al., 2010, p.113).
- Evaporação, é o definido como o conjunto de fenômenos físicos que transforma a água na forma líquida ou sólida em vapor. Essa água pode ser a precipitada sob a superfície continental, de mares, rios, lagos, reservatórios e em geleiras. Esse fenômeno é influenciado pela radiação solar, temperatura do ar, vento e a pressão de vapor (MIRANDA et al., 2010)
- Evapotranspiração, é o fenômeno que junta os processos de evaporação e transpiração. Sendo a transpiração o processo de transformação da água das plantas em vapor. Ocorrendo

essa transformação nos estômatos e cutículas das plantas que são influenciados pelas ações físicas e fisiológicas dos vegetais e pela disponibilidade de água disponível no solo (MIRANDA et al., 2010).

- Condensação, a transformação na atmosfera a água do estado gasoso para o líquido, em relação ao ciclo hidrológico ocorre a formação de nuvens que vai formar a precipitação (MIRANDA et al., 2010).
- Infiltração, é o processo onde ocorre a “passagem de água da superfície para o interior do solo”. Esse processo depende “fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presente no seu interior” (SILVEIRA et al., 2001, p.335).

Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico



Fonte: Lorandi e Cançado (2002).

Descrevendo de maneira simples o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, após precipitar sob a bacia, essa chuva infiltra no solo das vertentes e se atingir a saturação do solo, acontece o escoamento superficial das vertentes e essa água escoada segue em direção a rede de drenagem, finalizando no exutório da bacia (LORANDI E CANÇADO, 2002). Com isso, pode se entender que a bacia funciona como um sistema, onde a água é inserida nesse sistema a partir da precipitação e sai pelos processos de evaporação e escoamento fluvial (STEVAUX E LATRUBESSE, 2017).

A partir do exposto podemos entender que o deslocamento da água na bacia (na superfície, nos rios e em reservatórios) é um dos fatores mais importantes do ciclo hidrológico (TUCCI, 2001a). Por isso a importância de estudos relacionados ao escoamento.

O escoamento superficial seria a água precipitada excedente após a infiltração chegar ao ponto de saturação e ocorre devido a ação da gravidade, como afirma Lorandi e Cançado (2002, p. 52), ao citar que:

Ao atingir o solo, a água precipitada pode seguir alguns caminhos preferenciais. Através de suas características, o solo pode se apresentar poroso e susceptível à infiltração até atingir o seu ponto de saturação. A partir da saturação, forma-se, com o excedente da precipitação não infiltrado, o escoamento superficial. A água que penetra na superfície do solo pode percolar ou infiltrar, segundo a ação das tensões capilares nos poros ou pela força da gravidade.

Ainda sobre o escoamento superficial Calasans et al. (2002) cita que esse processo corresponde a parte do ciclo hidrológico relativa “ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo e é de fundamental importância para o projeto de obras de engenharia, dimensionadas de modo a suportar as vazões máximas decorrentes do escoamento superficial” (CALASANS, et. al., 2002, p.82). Segundo Tucci (2001b) esse processo pode ser representado quantitativamente por variáveis como a vazão, a velocidade e a profundidade por ser regido por leis físicas.

Segundo Miranda et al. (2010), a água que vem da precipitação pode ir para o leito do curso de um rio de quatro maneiras:

- Pelo escoamento superficial (ou escoamento direto) que inicia pela “precipitação após a ação da interceptação pelos vegetais e/ou obstáculos, da saturação do solo e da subsequente acumulação da água nas depressões do terreno”
- Pelo escoamento subsuperficial que “ocorre nas camadas superiores do solo sendo difícil de ser separado do escoamento superficial”;
- Pelo escoamento subterrâneo que acontece devido ao “acúmulo de água em aquíferos, é responsável pela alimentação dos cursos de água durante períodos de estiagem”;
- Por último a ação direta da própria precipitação.

2.4 Erosão e Cobertura Vegetal

A erosão hídrica dos solos consiste no desprendimento, arraste e deposição das partículas do solo, sendo a principal causa da degradação ambiental, consistindo assim em uma ameaça à integridade dos ecossistemas. A topografia, o clima, como também as características do solo e do uso e ocupação da terra são fatores que influenciam o processo de erosão hídrica. (OLIVEIRA et al., 2009).

Essa narrativa é corroborada por Guerra et al. (2014) ao citar que esse fenômeno, é o produto da interação entre alguns fatores como, regime pluviométrico, cobertura vegetal, propriedades do solo, declividade do terreno, uso do solo e sua gestão. Uma das principais consequências desse fenômeno é a degradação do solo e isso ocorre pela manutenção de práticas agrícolas tradicionais e de atividades econômica sem o devido controle como a pecuária (GUERRA et al., 2014). Com isso, entendemos que a erosão é um processo natural, mas pode ser intensificado pela ação do homem.

Esse processo tem uma perspectiva diferente quando a região é semiárida, pois os solos dessa região são considerados os de maior variabilidade do país, tanto pelo aspecto da textura quanto pela formação, isso porque é possível encontrar solos bastante arenosos como os Neossolos Quartzarenos, quanto muito argilosos como os solos do tipo Vertissolos (MMA, 2010).

A erosão dos solos é um dos problemas ambientais mais importantes do mundo (SANTOS et al., 2007). A preocupação em estudar essa temática vem aumentando no decorrer dos anos, especialmente em regiões semiáridas de países como o Brasil, onde grande parte da população depende de atividades econômicas ligadas à agricultura e pecuária. Além de que a região semiárida do Brasil é peculiar pois, dentre todas as outras regiões semiáridas existentes no mundo, nenhuma possui a pluviosidade, a extensão e a densidade populacional do semiárido do Nordeste brasileiro.

A erosão que acontece no NEB é segundo Leprun (1981) do tipo linear, nos sulcos superficiais finos, que são escavados devido ao efeito *splash* ocasionados pela energia cinética das gotas de chuva, que muitas vezes são chuvas torrenciais, que são caracterizadas por possuírem uma forte energia cinética, onde a chuva carrega o solo superficial formando os sulcos que depois podem até se transformar em voçorocas.

O assoreamento dos rios e reservatórios é um dos problemas causados pelo processo de erosão dos solos, tendo como principal consequência a diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios naturais como rios e lagos e também nos artificiais como os açudes (MARCELINO, 2009). Segundo Araújo (2012) para se ter uma política de recursos hídricos eficiente é necessário que exista antes uma política de preservação dos solos. Para isso, é necessário estudar o fenômeno que modela os solos, que é a erosão. Por isso a importância do estudo do fenômeno da erosão principalmente em áreas de clima semiárido.

A partir do estudo do fenômeno da erosão e seus processos é possível identificar áreas mais susceptíveis a esse fenômeno e assim, auxiliar no melhor planejamento do uso da terra. Como corroboram Schmidt e Mattos (2013) ao citar a importância do gerenciamento dos recursos hídricos associados ao uso da terra e como é importante o planejamento do uso da terra para ter maior disponibilidade de recursos hídricos e também menores áreas susceptíveis a erosão.

O uso de práticas conservacionistas do solo é uma das formas de diminuir o processo erosão dos solos. Guerra (2014) cita alguns exemplos de práticas para a conservação do solo para o Brasil, entre elas estão:

- O aumento da cobertura vegetal em densidade e extensão;
- O uso de adubo verde em solos de pousio;
- Um manejo do solo adequado;
- Conservar a cobertura dos solos e reter resíduos da colheita na camada superficial do solo para gerar matéria orgânica;
- Fazer um sistema de manejo do gado organizado e com a combinação com sistema de cultivos aráveis para minimizar a erosão dos solos;
- Proteger e reflorestar a vegetação em beira do rio e solos com maior erodibilidade;
- Cultivo de contorno;
- O uso de faixas de vegetação, ou seja, barreiras físicas (amortecedores) para o escoamento e a erosão;
- Construção de barreiras de retenção nas áreas de depressão;

- Construção e manutenção de barreiras de vegetação para atuar como quebra vento e assim diminuir a erosividade.

A cobertura vegetal é uma das práticas conservacionistas do solo e atua protegendo o solo da erosão por respingos pois aumenta a infiltração e com isso reduz o escoamento superficial (GUERRA et al., 2014). Sendo um importante fator na conservação dos solos e diminuição da erosão.

Segundo Miranda (2010) a vegetação também tem um importante papel no ciclo hidrológico, pois atua na interceptação da água da chuva e na evapotranspiração (MIRANDA et al., 2010). Lorandi e Cançado (2002) ainda completam ao citar que, a cobertura vegetal na superfície do solo atua diminuindo a erosão pois contribui para a infiltração e a interceptação da gota de chuva, devido diminuir o impacto da energia cinética da gota de chuva que atinge o solo.

Tendo em vista esse problema é preciso procurar soluções o que leva ao estudo e pesquisa nessas áreas. Uma das formas de estudar essa problemática é com o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG), pois através deles é possível analisar o passado, facilita o entendimento do presente e o planejamento do futuro. Como afirma Guerra et al. (2014) que citam a associação do aumento do conhecimento sobre a erosão do solo e a conservação solo com o crescimento de estudos que utilizam as técnicas de SIG, geoprocessamento e modelagem. Devido principalmente ao monitoramento da erosão e com isso pode ter uma melhor gestão de bacias e do uso do solo.

Além de que o uso de SIG pode ser um grande aliado nos estudos com recursos hídricos como pontuou Pires, Santos e Del prette (2002) ao afirmar que o uso de análise de imagens orbitais e de SIG é uma das metodologias empregadas para auxiliar na determinação de medidas para o manejo ambiental em bacias hidrográficas e que essas técnicas são muito utilizadas devido a flexibilidade e disponibilidade e pela possibilidade de integração e sobreposição de diversas informações espaciais sobre a bacia hidrográfica que podem ser comparadas e correlacionadas para estudos e uma melhor tomada de decisão (PIRES, SANTOS e DEL PRETTE et al., 2002).

Becker (2002) afirma que com o uso do SIG nos estudos de gestão de bacia hidrográfica têm como foco os recursos hídricos; como também outros aspectos ecológicos e ambientais, fluxos de energia e riscos ambientais.

2.5 A Modelagem Hidrossedimentológica

A união entre os processos hidrológicos e sedimentológicos na superfície terrestre corresponde ao ciclo hidrossedimentológico. Ocorrendo simultaneamente ao ciclo hidrológico e causa os fenômenos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos a partir da ação da água ao longo de uma bacia hidrográfica (BORDAS e SEMMELMANN, 2014). Uma forma de estudar esse processo e no âmbito dos aspectos hidrossedimentológicos é a através do auxílio de modelos hidrossedimentológicos, com suporte em SIGs.

O uso de estudos associados a técnicas como o SIG possibilita a execução da modelagem. O modelo consiste de forma generalista uma exemplificação simplificada da realidade, sendo importante pois permitem a exemplificação de aspectos fundamentais da realidade estudada (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Através da modelagem é possível “prever padrões espaciais de processos ecológicos, com relação a possíveis cenários decorrentes do tipo de ocupação/uso dos recursos naturais” (PIRES, SANTOS e DEL PRETTE et al., 2002, p. 19). Isso possibilitará uma melhor gestão do uso da terra em uma bacia hidrográfica (PIRES, SANTOS e DEL PRETTE et al., 2002).

Um dos modelos mais utilizados mundialmente, pela diversidade de aplicações é o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), através desse modelo é possível prever cenários de produção de sedimento e escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, para a partir dessas informações gerar dados para um melhor planejamento do uso da terra.

Além de que, devido as modificações do uso da terra no Brasil nas últimas décadas e as mudanças climáticas, há uma crescente preocupação com o futuro e como o solo e os recursos hídricos serão afetados com as mudanças climáticas e o uso sem planejamento. Uma das formas de entender e se aproximar das dinâmicas que ocorreram no futuro é a através da modelagem. O SWAT tem essa capacidade de modelar cenários, como afirma Bressiani et al. (2015) ao citar que modelar e simular cenários futuros no SWAT pode ajudar na compreensão das mudanças, podendo auxiliar no planejamento e gestão de bacias hidrográficas

O modelo hidrossedimentológico SWAT foi desenvolvido por Jeff Arnold e pelo *Agricultural Research Service* (ARS) que pertence ao *United States Department of Agriculture* (USDA). É um modelo de base semifísica, que necessita de dados físicos para caracterizar a bacia hidrográfica em estudo, tais como: dados de clima, propriedade do solo, topografia, de vegetação e uso da terra. Esse modelo é capaz de simular processos físicos associados à

movimentação hídrica e sedimentar, também ao ciclo de nutrientes, uso de pesticidas, entre outros. (NEITSCH et al., 2011).

Neitsch et al. (2011) ainda cita que existem algumas vantagens para a escolha desse modelo como:

- Utiliza dados adquiridos de órgãos oficiais;
- A capacidade de simular processos em bacias de grande extensão com pouco custo de tempo e dinheiro, por ser um modelo eficaz computacionalmente;
- Permite o estudo a longo prazo, pois é um modelo contínuo no tempo;

Esse modelo além de ser um dos modelos hidrológicos mais usados mundialmente também pode ser aplicado a diferentes escalas e condições ambientais. Sendo um modelo que abrange diferentes componentes hidrológicos e agrônômicos. Esse fato faz ser possível estudos em diferentes aspectos da realidade como na mudança climática, mudança do uso da terra, diferentes cenários de uso da terra, irrigação, impacto de drenagem, transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes e pesticidas (BRESSIANI et al., 2015).

Alguns estudos utilizaram o SWAT para a modelagem hidrossedimentológica em um ambiente semiárido. Dentre eles estão, Taveira (2012) que fez uma avaliação das alternativas de uso do solo através da simulação hidrossedimentológica da bacia representativa de Sumé, Dantas et al. (2015) que simulou a vazão e erosão na bacia do rio Taperoá-PB, Silva, Henriques e Silva (2018) simulou as mudanças de uso e ocupação do solo em dois períodos distintos e o seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma caatinga.

Um dos problemas a ser enfrentado ao utilizar modelos hidrológicos de base física ou semifísica como o SWAT é a ausência no Brasil de um banco de dados consistente. Como corrobora Bressiani et al. (2015) ao afirmar que muitos trabalhos feitos com o SWAT em bacias hidrográficas brasileiras apontam uma mesma dificuldade em relação a baixa disponibilidade de dados, a dificuldade do acesso aos dados, a forma que os dados foram compilados e problemas com o processamento dos dados necessários para o modelo. Com isso, para o estudo foi escolhido a uma bacia representativa, que já houve um levantamento de dados no passado a Bacia Representativa de Sumé (BRS).

2.6 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas consistem em variações estatisticamente significativas de variáveis que representam o clima tais como precipitação, temperatura, entre outras. Estas mudanças podem ser ocasionadas por processos naturais, forçamentos externos, e até mesmo por ações antrópicas na composição do uso do solo e da atmosfera (IPCC, 2013).

A variação climática potencializa vulnerabilidades ambientais, e quando em associação a características de uma região, no Brasil, pode ocasionar no aumento da intensidade e frequência dos eventos de seca e cheia, a mudança do regime hidrológico de uma região acarreta possíveis perdas na biodiversidade e no ramo da agricultura, com impactos na geração de energia hidrelétrica e grande probabilidade de proliferação de vetores de doenças endêmicas (CGEE, 2010).

A temática climática é global, sendo parte da demanda do desenvolvimento técnico-científico e se inserindo nos contextos políticos e econômicos internacionalmente, pois, diante das mudanças globais, associada aos riscos provenientes do crescimento da vulnerabilidade climática, é necessário o aumento da responsabilidade e compromisso com a causa, utilizando técnicas como a adaptação dos processos produtivos e dos padrões de consumo por parte da população além da adoção de medidas mitigatórias (CGEE, 2010).

Os Gases do Efeito Estufa (GEE) vem aumentando suas emissões na atmosfera terrestre nas últimas décadas, principalmente em decorrência do crescimento exponencial e econômico resultantes da Revolução Industrial; as alterações de temperaturas, vem se apresentando superiores à variação natural, sendo associadas ao fenômeno do efeito estufa. Com isso, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e a Organização Meteorológica Mundial (MWO) estabeleceram o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) com a finalidade elaborar de pesquisas científicas na escala internacional, abrangendo o alcance, cronologia e potenciais impactos da evolução do clima sobre as condições socioeconômicas e o meio ambiente (GRAU-NETO, 2007).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel on Climate Change* – IPCC) vem publicando periodicamente relatórios utilizando modelos para a previsão de cenários futuros de clima com base em séries históricas de dados passados, provenientes de informações medidas em campo distribuídas espacialmente globalmente (IPCC, 2013). De acordo com o IPCC, o aquecimento global ocorre principalmente por causa das emissões de

Gases do Efeito Estufa (GEE), derivados da queima de combustível fóssil e mudanças nos usos do solo decorrentes das atividades humanas.

Os resultados das análises sistemáticas provenientes do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC) prevê que o aumento da temperatura média global será ainda maior até o final do século, de acordo com projeções futuras, e indicam que o aquecimento é gerado pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE) de origem antrópica, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), oriundo da queima de combustíveis fósseis, o metano (CH₄), e o óxido nitroso (N₂O), principalmente advindo das atividades de agropecuária. (CGEE, 2010)

Atualmente, o Brasil bem como todos os países se apresenta vulnerável às mudanças climáticas, principalmente quanto aos extremos climáticos. O semiárido é considerado a região mais vulnerável no país, da perspectiva social à mudança do clima (MARENGO et al., 2011). De acordo com Marengo et al. (2011), o Nordeste do Brasil apresenta acentuada variabilidade interanual, particularmente em relação à precipitação e à disponibilidade dos recursos hídricos, com anos extremamente secos e outros chuvosos. Onde trimestre mais seco se concentra entre os meses de agosto e outubro, numa faixa orientada no sentido noroeste/sudeste, desde o extremo oeste do Nordeste. Em relação a precipitação máxima no semiárido, ocorre normalmente entre os meses de fevereiro e abril.

O regime de chuvas apresenta grande variabilidade espaço-temporal, a precipitação anual totaliza menos de 800 mm e geralmente ocorre na estação chuvosa que é concentrada durante três meses do ano (SRINIVASAN e PAIVA, 2009). O fenômeno da precipitação quando analisado de forma isolada, não pode garantir a boa produção de culturas, porém, a ocorrência de períodos secos dentro de quadras chuvosas indica possíveis impactos adversos quanto à agricultura (MARENGO, 2008).

Isto poderá agravar ainda mais a situação precária de disponibilidade hídrica na região e as atividades associadas à agricultura de subsistência causariam maior impacto na qualidade de vida das populações, principalmente daquelas que dependem exclusivamente da água, projeta-se que a água se tornará um bem escasso e trará sérias consequências e prejuízos para a sustentabilidade do desenvolvimento regional. Reduções nas chuvas também podem afetar a geração de energia hidrelétrica, pois consequentemente reduziriam o volume de águas nos reservatórios de água.

Com esta vulnerabilidade ambiental, atividades advindas do agronegócio, geração de energia hidrelétrica e manutenção saúde que dependem da água para prosperar, podem ser

prejudicadas e gerar migrações populacionais desta região para outras localidades, agravando os problemas sociais.

As variabilidades espaço-temporais das precipitações compõem uma característica climática representativa do Nordeste do Brasil, principalmente sobre a região semiárida, na qual a irregularidade espacial e temporal da pluviometria possui grande relevância, até mais do que os totais das chuvas sazonais quando em comparação, especialmente sobre a agricultura de sequeiro, que durante o período de cultivo depende da manutenção da umidade do solo (MARENGO, 2011).

Conforme projeções futuras realizadas pelos modelos do quarto relatório do IPCC, estima-se reduções de 10 a 20% das precipitações nos meses de junho a agosto na porção semiárida do Nordeste, porém apresenta-se grandes incertezas quanto aos meses entre janeiro e março (IPCC, 2007).

O período de ocorrência de chuvas no semiárido se concentra entre os meses de janeiro e abril, resultando em 70% do total precipitado previsto para o ano. Portanto, nos meses mais chuvosos para a região semiárida há grande convergência dos modelos para os cenários de temperatura do ar, em que se estima o aumento, não havendo convergência dos modelos climáticos futuros para precipitação (SILVA et al., 2018).

Além dos baixos índices de precipitação anual, solos rasos com pouca disponibilidade de nutrientes, o que ocasiona na intensificação dos processos erosivos e consequentemente na degradação do solo por conta das ações da chuva em uma bacia hidrográfica. As ações de origem antrópica podem acarretar no aumento da susceptibilidade à desertificação de uma área, principalmente onde os fenômenos de precipitação são mais escassos (CARVALHO NETO, 2011).

O Semiárido do Brasil possui características que desencadeiam uma grande vulnerabilidade ambiental, tem um grande potencial para ser afetado por mudanças climáticas, o pastejo intensivo e desmatamento pode acarretar na diminuição das áreas de cobertura vegetal, consequentemente predispondo a um cenário de aumento das áreas desérticas.

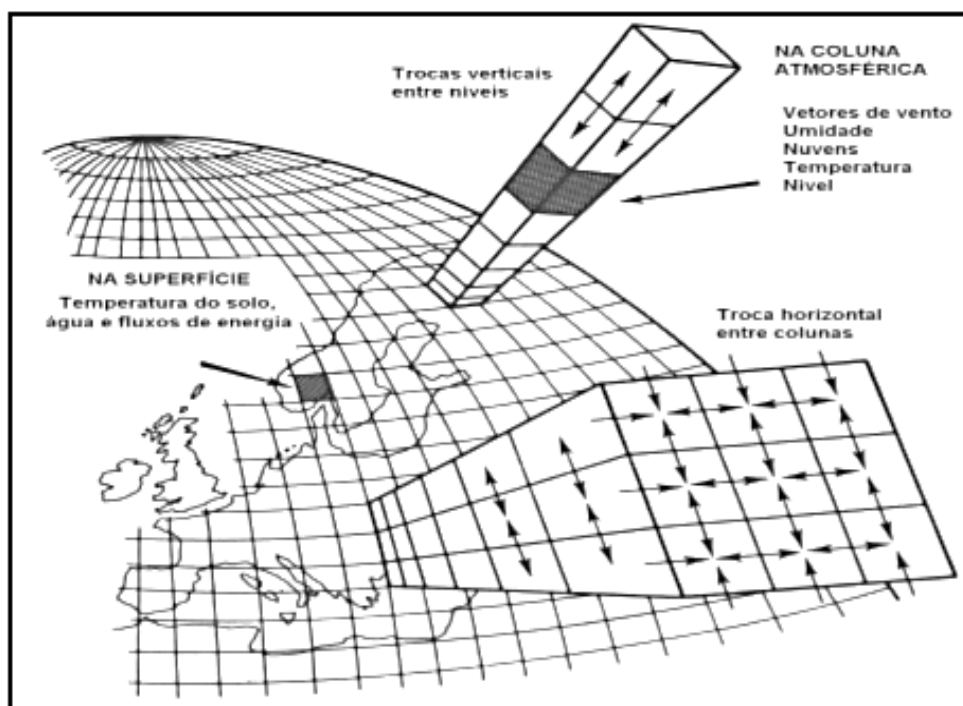
Segundo Marengo (2007) as projeções de clima futuro, liberadas pelos relatórios do IPCC e pelo Relatório de Clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), são realizadas por modelos computacionais e tem mostrado cenários de secas e eventos extremos de chuva em grandes áreas do planeta e do Brasil. Os modelos globais de clima (GCM) podem estimar os efeitos das mudanças no clima em relação aos recursos hídricos de uma região. Os GCM preveem que a maior concentração dos GEE na atmosfera aumentará a temperatura da

superfície e provavelmente afetará o ciclo hidrológico (IPCC, 2007). Os Modelos de Circulação Global. (MCGs) são a ferramenta primária para representar o sistema climático global e quase todas as técnicas de cenarização dependem das saídas destes (CGEE, 2014).

Conceitualmente desenvolvidos para simular a circulação atmosférica em grandes escalas os GCM são uma ferramenta importante para a avaliação das mudanças climáticas, têm sido desenvolvidos para simular o clima presente e prever as mudanças climáticas futuras, e apresentam potencial para representar escalas espaciais e hemisféricas (BRAGA et al., 2013).

Consistem em modelos matemáticos distribuídos tridimensionalmente no espaço, considerando os principais processos referentes aos movimentos atmosféricos e oceânicos, por meio da utilização de uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, a quantidade de movimento, a conservação de massa e as leis dos gases. o conjunto de equações é resolvido com a aplicação da divisão em grade horizontal regular da superfície terrestre, com diversas camadas verticais na atmosfera e nos oceanos, através de técnicas numéricas, de acordo com a Figura 3. (VIANA et al., 2021)

Figura 3 - Discretização espacial dos processos de um modelo de circulação global (GCM)



Fonte: Silva, 2005

De acordo com Barrios (2013), os modelos de circulação geral têm sido desenvolvidos para simular o clima atual. Além disso, são utilizados para prever as mudanças climáticas futuras e apresentam uma grande habilidade para representar escalas espaciais e hemisféricas. No Quinto Relatório do IPCC (AR5), foram considerados os modelos da quinta fase do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Existem 28 modelos disponíveis provenientes de centros de pesquisa em modelagem climática global, os quais possuem 61 variações no total, todos com a finalidade de desenvolver no projeto *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) análises de impactos das mudanças de clima (CGEE, 2014).

Porém, a seleção entre os modelos disponíveis, para quais são capazes de representar apropriadamente as características climáticas de uma região no clima presente é fundamental. Por exemplo, estudos de impactos das mudanças climáticas sobre a alocação de água buscam a representação do regime interanual e sazonal, enquanto estudos de impactos das mudanças climáticas sobre as cheias necessitam das características de precipitações máximas. Também deve ser considerado na escolha dos modelos, junto a representação do clima atual no contexto das previsões futuras, a espacialização da precipitação e temperatura projetadas sobre uma determinada região (CGEE, 2014).

A seleção de modelos fornece uma melhor indicação da mudança do clima, pois, quando todos os modelos são considerados juntos, os modelos individuais compensam uns aos outros, resultando em uma melhor representação climática em um período histórico. A avaliação de todos os modelos do IPCC é baseada no cálculo da climatologia mensal média para a região de estudo, com uma consequente comparação entre os modelos utilizando índices estatísticos com a finalidade de definir os que conseguem representar melhor as características de interesse (CGEE, 2014). Os cinco modelos obtidos do *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISI-MIP), foram: o GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M (HEMPEL et al., 2013).

No cenário AR5 foram denominados cenários *Representative Concentration Pathways* (RCP) para cada modelo, com valores relativos aos níveis de forçantes radiativas ao final do século XXI, sendo utilizados como entrada para a modelagem climática. Em relação ao IPCC-AR5 os cenários determinados foram: RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 e RCP 2.6. Os cenários das forçantes radiativas *Representative Concentration Pathways* (RCPs) foram selecionados e definidos como forçante radiativa total, a qual representa uma medida das emissões de gases estufa em W/m^2 (CGEE, 2014). A Tabela 1 apresenta um sumário dos cenários RCPs.

Tabela 1 - Cenários Representative Concentration Pathways (RCPs) climáticos futuros

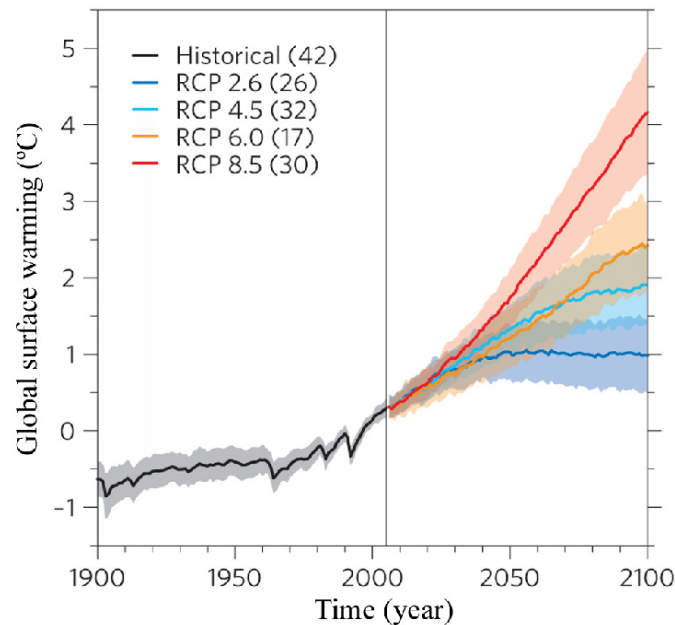
Cenários	Descrição
RCP 8.5	Caminho crescente da força radioativa levando a 8,5 W/m ² em 2100.
RCP 6	Estabilização em 6 W/m ² após 2100
RCP 4.5	Estabilização em 4,5 W/m ² após 2100
RCP 2.6	Pico na forçante radiativa em ~ 3 W / m ² antes de 2100 e declínio

Fonte: CGEE (2014).

- RCP 2.6: É o cenário mais otimista, onde existe maior redução da concentração dos gases de estufa ao longo do tempo. Neste cenário o crescimento da radiação atinge o pico no meio do século e depois recua. Este cenário foi elaborado pela equipe de modelagem da *Integrated Model to Assess the Global Environment* (IMAGE) da *Netherlands Environmental Assessment Agency* (PBL).
- RCP 4.5: É um cenário intermediário com um patamar de estabilização, onde o forçamento radiativo está estabilizado a aproximadamente 4,5Wm² e 6,0Wm² após o ano de 2100, sendo que esse RCP só assume emissões constantes após o ano de 2150 (IPCC, 2013). O grupo de trabalho com modelagem do *Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute* (JGCRI) dos Estados Unidos da América (EUA) foi responsável pela elaboração desse RCP.
- RCP 6.0: É um também um cenário de estabilização, onde a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois do ano de 2100, isso ocorre por meio da aplicação de uma série de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2013). Esse RCP foi elaborado pela equipe de modelagem do Japão, a AIM do *National Institute for Environmental Studies* (NIES).
- RCP 8.5: Este é o cenário mais pessimista, com um patamar elevado para cada forçamento radiativo e superior a 8,5 Wm² no ano de 2100 e continua a aumentar durante algum tempo, sendo que esse RCP só assume emissões constantes após o ano de 2250 (IPCC, 2013). Foi criado por uma equipe da Áustria, utilizando o modelo MESSAGE e

com o quadro de avaliação integrada do *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA).

Figura 4- Evolução das emissões radioativas para cada cenário ao longo do tempo



Fonte: IPCC, 2013

Segundo Vaghefi (2017), os RCPs representam na modelagem climática, projeções dos componentes da força radiativa apenas, sendo relativo à mudança de equilíbrio entre a radiação que entra e sai da atmosfera, geralmente consequente das alterações na composição atmosférica. Portanto, não se configuram como cenários integrados que incluem projeções climáticas, de emissões e socioeconômicas. Assim, de acordo com CGEE (2014), qualquer caminho dos RCPs pode resultar em um vasto espectro de cenários de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico. Os RCPs, apresentam como vantagem, a representação de um amplo espectro de realizações climáticas, que são baseadas em revisões na literatura, assim, não possuem ligações a políticas públicas entre as previsões ou resultantes de recomendações (CGEE, 2014).

Diversos estudos na temática de mudanças climáticas mostram que os processos hidrológicos em bacias hidrográficas podem ser afetados pela temperatura global (BARRIOS, 2013), ou até mesmo a cobertura do solo e produção de sedimentos (SANTOS et al., 2021). Com a finalidade de modelar o clima global, são utilizadas ferramentas denominadas de modelos numéricos. Esses modelos são intitulados como Modelos Climáticos Globais (MCGs),

a partir desses MCGs é possível simular o clima atual e estimar cenários futuros com a evolução do clima, suas mudanças futuras e simulações de cenários com diferentes níveis de emissões de gases do efeito estufa. Além de que, com esses modelos é possível ter de forma quantitativa a interação entre os elementos climáticos, como a vegetação, a atmosfera, os solos e os oceanos (ADAM e COLLISCHONN, 2013). Segundo Marengo et al. (2012) os MCGs são as principais ferramentas atuais de análise do clima (MARENGO et. al, 2012).

As projeções dos modelos climáticos globais e regionais até o final do Século XXI do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sugerem cenários futuros de redução no volume das chuvas e dos seus extremos. Os aumentos de temperatura junto à mudanças do clima consequente ao aquecimento global, independente do regime de precipitações, já é um fator preponderante para aumentar o índice de evaporação dos corpos d'água, sejam estes, lagos, açudes ou reservatórios e também causar o aumento da evapotranspiração da vegetação (SILVA et al., 2019).

De acordo com análises dos cenários climáticos previstos pelos modelos do IPCC para os cenários de altas e baixas emissões, no Brasil, a região Nordeste é a mais exposta aos riscos da variabilidade climática e a uma possível aridização e subsequente desertificação devido às mudanças climáticas. Mudanças climáticas no Brasil ameaçam intensificar as dificuldades de acesso à água (IPCC, 2013).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito a metodologia, técnicas e dados utilizados para esse trabalho. Para a viabilidade dessa pesquisa foram necessárias diversas coletas de dados e informações, seja por pesquisa bibliográfica em livros, artigos científicos, teses e dissertações. Também foram coletados dados em sites de instituições governamentais como, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba (AESA), Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Como já foi citado no capítulo anterior o modelo hidrossedimentológico que foi utilizado nesse trabalho para compreender o escoamento superficial e produção de sedimentos em diferentes realidades e cenários da BRS foi o modelo SWAT. Com isso, neste capítulo também será descrito as equações utilizadas por esse modelo para alcançar os objetivos propostos.

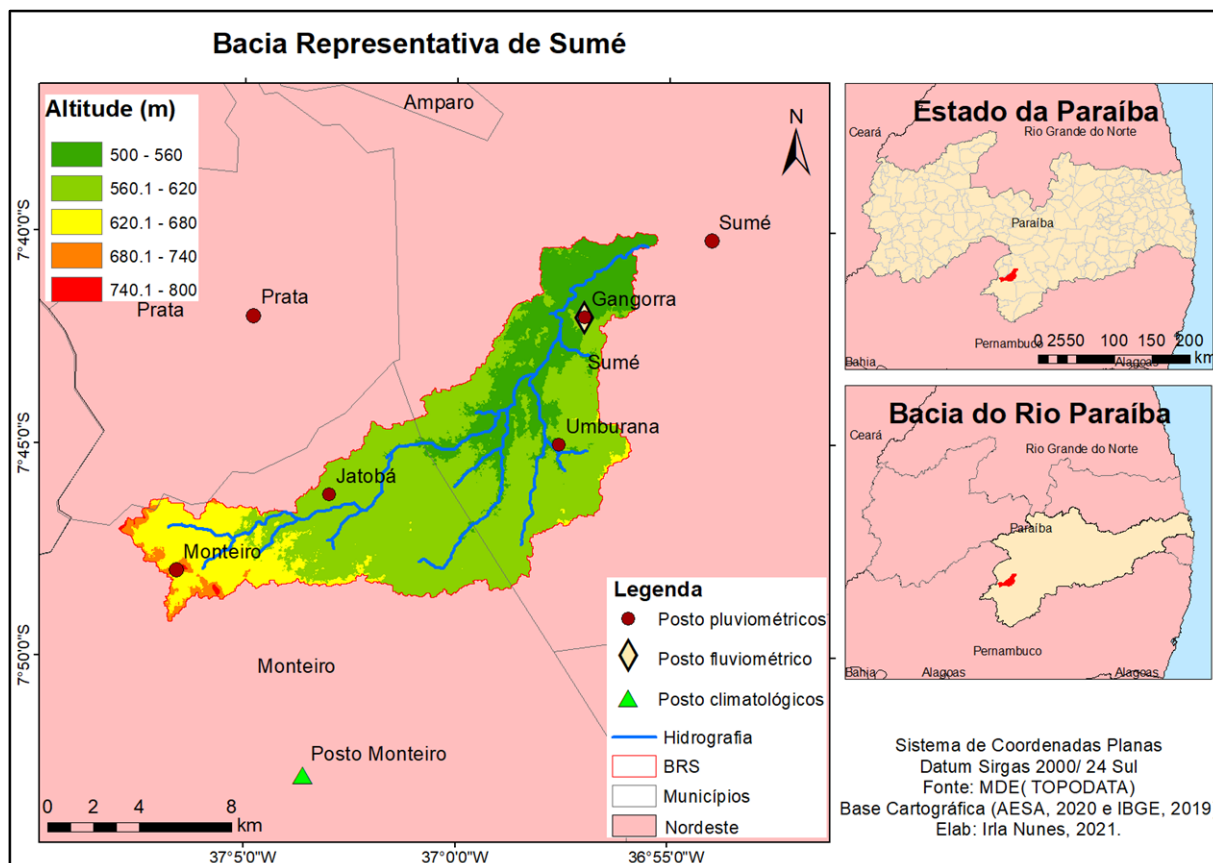
3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo (Figura 5) escolhida foi a Bacia Representativa de Sumé (BRS), uma das primeiras bacias representativas instaladas para monitoramento e estudo do NEB pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) na década de 1970 e teve dados coletados até a década de 1990. Segundo Cadier e Freitas (1982), alguns critérios foram determinantes para a BRS ser escolhida como bacia representativa do semiárido, como geologia predominantemente cristalina, relevo moderado a forte, precipitação interanual em torno de 550 mm e altitude variando de 500 a 700 m. Essas características, além da vegetação, clima e solo eram semelhantes às encontradas em outra grande região do NEB, inclusive tinha muita semelhança com as características encontradas na bacia Riacho do Navio, uma importante bacia do NEB que possui uma parte considerável da porção cristalina do sertão nordestino (CADIER e FREITAS, 1982).

A BRS já foi desativada, mas foram coletados diversos dados nas décadas de 1970 a 1990, com diversos equipamentos e um monitoramento regular, o que possibilita a realização de estudos nesta área com maior confiabilidade, além de ser uma área bastante representativa quanto às características do semiárido brasileiro, que abrange aproximadamente 80% do espaço paraibano.

A BRS possui uma área de aproximadamente 146.5 km² e está localizado entre os municípios de Sumé e Monteiro no Estado da Paraíba, entre as coordenadas 7° 40' e 7° 51' de Latitude Sul e 36° 05' e 37° 30' de Longitude Oeste. Essa bacia pertence ao alto curso da bacia do Rio Paraíba e foi subdividida em três sub-bacias, Gangorra, Umburana e Jatobá. (CADIER e FREITAS, 1982).

Figura 5 - Mapa de localização da Bacia Representativa de Sumé-PB



Fonte: O autor.

A população dessa região é de aproximadamente 17.000 mil habitantes de acordo com o último censo e essa população tem um índice de pobreza de 56,80% e um IDH de 0,627 (PNUD, 2010). A principal fonte econômica dessa região é a pecuária e a agricultura de

subsistência (CADIER e FREITAS, 1982), tendo um rebanho estimado em 8.000 bovinos, 25.700 caprinos e 26.800 ovinos e uma produção de 500t de feijão e 800t de milho (IBGE, 2021).

Essa bacia possui insuficiência e irregularidade das precipitações, das altas temperaturas e elevada evaporação. A temperatura média anual é de 24 °C e clima da região é do tipo semiárido (BSh), segundo a classificação de Koppen-Gaiger (ALVARES et al., 2015). A precipitação média é de 600 mm/ano e o regime pluviométrico se caracteriza por dois períodos distintos, o período chuvoso entre os meses de fevereiro a maio, e o restante dos meses são caracterizados pelo período seco. A vegetação predominante é do tipo caatinga hiperxerófila densa, alguns exemplos de espécies encontradas nessa região são: Mandacaru (*Cereus Jamacaru*), Xique-Xique (*Pilosocereus Polygonus*), Macambira (*Bromelia Laciniosa*), Umbuzeiro (*Spondias Tuberosa* L), Braúna (*Schinopsis Brasiliensis*), Marmeleiro (*Croton Hemyargyreus*), Caatingueira (*Caesalpinia Pyramidalise*) e Aroeira (*Astronium Urundeuva*) (CADIER e FREITAS, 1982).

3.2 Dados Utilizados

As simulações ocorreram em períodos e usos da terra distintos. Nessa sessão serão descritos os dados utilizados para as simulações hidrossedimentológicas iniciando com os usos do solo histórico (1984), atual (2019) e no fim os dados utilizados para produzir as simulações futuras (de 2030 a 2070). Para a execução do modelo SWAT foi necessário a inserção de diversos dados físicos da bacia, em formato tabular (dados climáticos e hidrológicos) e dados de base cartográfica (mapa de tipo do solo, uso da terra, modelo digital do terreno). O modelo SWAT será descrito no item 3.3 desta dissertação. Os dados utilizados nesta pesquisa serão descritos a seguir.

3.2.1 Tipos do Solo

A classificação do tipo de solo da Bacia Representativa de Sumé (BRS) foi pautada seguindo os dados produzidos por Cadier e Freitas (1982) e foi feita a vetorização do mapa utilizando o *software* ArcGIS® 10.2, desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Devido ser uma classificação com a nomenclatura antiga foi feito uma atualização utilizando como base o trabalho de Jacomine (2009), produzido pela EMBRAPA.

A Tabela 2 demonstra como ficou essa classificação e a descrição de cada tipo de solo encontrado na bacia.

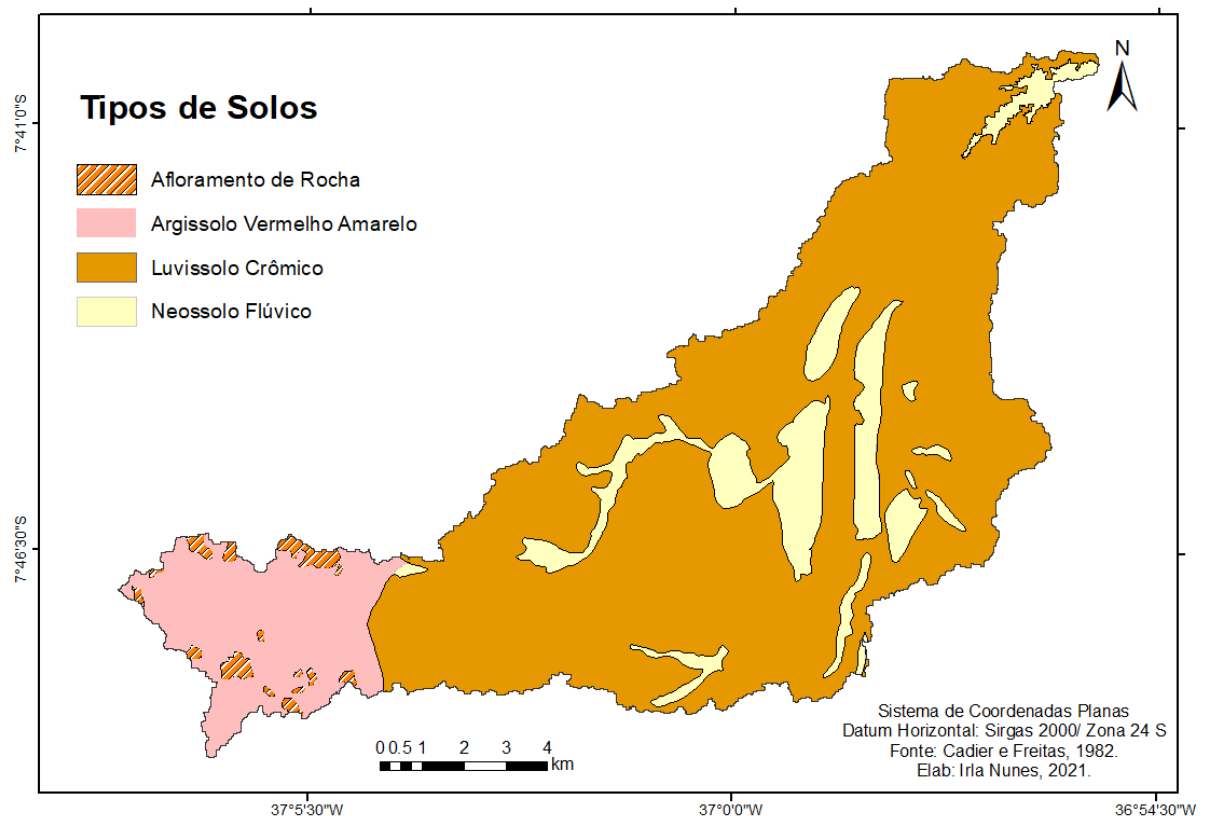
Tabela 2 - Classificação dos solos da BRS

Tipos de Solo	Classificação antiga	Área (km²)	Área (%)	Descrição
Neossolo Flúvico	Solo aluvião	16,91	11,54	Os neossolos são solos constituídos por material orgânico de pouca espessura. São solos com pouco desenvolvimento, que não apresentam horizonte B diagnóstico (JACOMINE, 2009). São solos com no máximo 50cm e fertilidade variável. Sendo assim solos rasos, com isso o solo é saturado de forma mais rápida o que facilita o escoamento superficial. Por consequência, isso vai influenciar a ocorrência de processos erosivos e deslizamentos, principalmente em encostas íngremes e sem vegetação (GUERRA e BOTELHO, 2009)
Afloramento de Rocha	Afloramento de Rocha	1,96	1,34	O afloramento de rocha é a exposição da rocha matriz, sendo um tipo de terreno e não de solo. Essa rocha pode ser do tipo gnaisse e/ou granito. Tendo como principal característica o escoamento superficial máximo (CADIER e FREITAS, 1982).
Argissolo Vermelho e Amarelo	Podzólico Vermelho e Amarelo	17,71	12,09	Os solos do tipo Argissolo são solos que contém mais acumulação de argila, com horizonte B textural. (JACOMINE, 2009). São comuns no Brasil, principalmente o do tipo vermelho-amarelo que é o mais recorrente. São solos que possuem susceptibilidade a processos erosivos. (SANTOS et al., 2021)
Luvissolo Crômico	Associação de solos bruno não cálcico e solos litólicos eutróficos	109,92	75,03	Os Solos do tipo luvissolos são solos típicos de regiões com escassez hídrica, como a região semiárida do Nordeste brasileiro. São solos rasos com no máximo 1 m de profundidade e com mudança textural abrupta. Essas características fazem com que seja um solo suscetível a erosão e de fácil compactação (ALMEIDA et al., 2021).

Fonte: O autor.

Dentre os tipos de solos encontrados na BRS, o mais predominante foi o solo do tipo luvisolo crômico com 75,03 %, em seguida do argissolo vermelho-amarelo com 12,09 %. Teve ainda uma pequena porcentagem de afloramento rochoso (1,34 %), o afloramento rochoso é comum da região semiárida. Na área onde se localiza o reservatório de Sumé foi encontrado o solo do tipo neossolo, sendo esse tipo de solo encontrado em 11,54% da bacia. Essa espacialização pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Mapa do tipo de solo da BRS



Fonte: O autor.

3.2.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

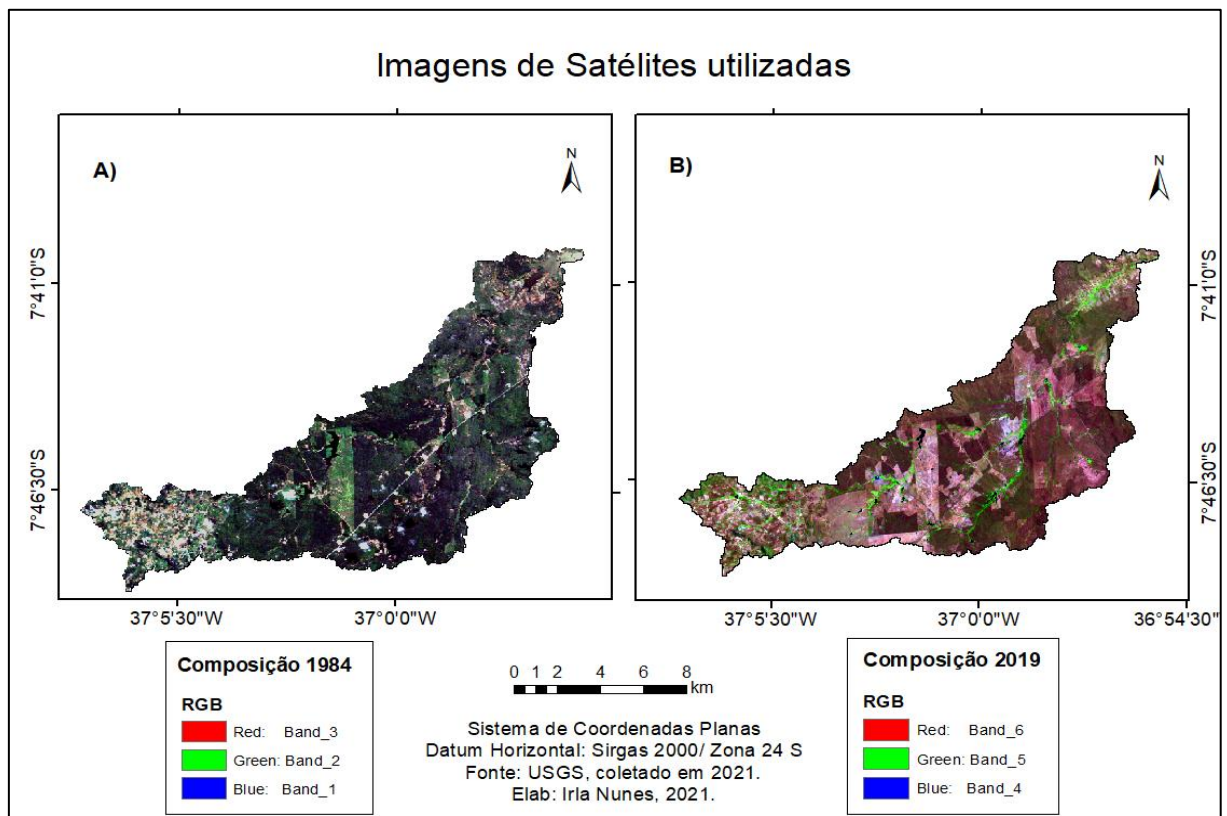
O modelo digital de elevação (MDE) foi adquirido junto ao portal de dados da Terra da Agência Espacial Americana (NASA) o <https://search.earthdata.nasa.gov> que disponibiliza dados de MDE de todo o mundo e o MDE escolhido para esse trabalho foi obtido a partir da dados da missão *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER GDEM versão 3) com a resolução espacial de 30 m.

3.2.3 Uso e Cobertura da Terra

Os mapas de uso e ocupação da terra foram utilizados para a produção de realidades e cenários de uso da terra da BRS. As realidades foram baseadas em um uso antigo e um atual e os cenários foram baseados em uma construção regular, pessimista e otimista levando em conta a vegetação. Para isso, foi necessário a aquisição de imagens de satélites. Para a realidade de uso da terra antigo foi utilizado a imagem do satélite Landsat-5 do sensor TM do dia 17 de junho de 1984 e para a realidade de uso da terra atual foi utilizado a imagem do satélite Landsat-8 do sensor OLI do dia 21 de agosto de 2019.

Essas imagens foram coletadas do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Foram escolhidas essas imagens nesse período por, após uma revisão e pesquisas das imagens disponibilizadas essas serem as que tiveram menos presença de nuvens e por serem de períodos do ano próximos (uma de junho e a outra de agosto). As composições escolhidas foram as que melhor evidenciaram a vegetação nas duas imagens. Na Figura 7 é possível visualizar as imagens utilizadas.

Figura 7 - Imagens de Satélite



Fonte: USGS, 2021.

Para preparar os mapas de uso da terra foi necessário fazer inicialmente a composição colorida de bandas, sendo para a imagem do Landsat-5 foi utilizada a composição de RGB (Vermelho, Verde e Azul) as bandas 3, 2 e 1, respectivamente, que é do tipo cor natural. O mesmo foi feito para as imagens do satélite Landsat-8, mas a composição foi de RGB (Vermelho, Verde e Azul) correspondente as bandas 6,5, e 4; que é a composição do tipo falsa cor natural.

Após essa etapa foi possível fazer a classificação das imagens. Para isso, foi utilizado o *software* SPRING 5.5.6. Essa classificação foi feita no método supervisionado, utilizando o classificador de Máxima Verossimilhança. Nesse tipo de classificação, a interpretação de imagens de satélite é feita considerando os objetos conhecidos presentes na imagem como, por exemplo reservatórios e solo exposto, sendo assim, os objetos semelhantes a eles serão classificados de acordo com a sua forma, tamanho, textura, padrão, localização, sombra, altura, tonalidade e cor.

A partir disso, foram definidas cinco classes: (a) vegetação caatinga arbustiva, (b) vegetação caatinga herbácea, (c) água, (d) solo exposto/área agricultável/ área de pecuária, e (e) estradas compostas por rodovias.

3.2.4 Dados Hidrometeorológicos

Os dados climáticos e hidrológicos, foram coletados em diferentes períodos de acordo com as simulações. Para a realidade passada (com base no uso da terra de 1984) os dados pluviométricos e de escoamento foram coletados do estudo sobre a BRS produzido por Cadier e Freitas (1982), o período dos dados de chuva que foi utilizado foi dos anos de 1976 a 1979. Os dados de precipitação foram catalogados em três postos: Gangorra, Umburana e Jatobá (Tabela 3), esses postos estão localizados dentro da bacia hidrográfica. Os dados de vazão foram coletados no posto Gangorra e foi catalogado o único período contínuo sem falhas de 27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978 para os dados de vazão.

Tabela 3 - Descrição dos postos que foram utilizados na primeira simulação

Nome do Posto	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período (Diário)
Gangorra	Pluviométrico	-7,7	-36,95	550	1976 a 1979

Nome do Posto	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período (Diário)
Gangorra	Fluviométrico	-7,7	-36,95	550	27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978
Umburana	Pluviométrico	-7,75	-36,96	564	1976 a 1979
Jatobá	Pluviométrico	-7,77	-37,05	600	1976 a 1979

Fonte: Cadier e Freitas (1982)

Já para a realidade de uso atual (com base no uso da terra de 2019), foram utilizados dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). O período dos dados de chuva que foi utilizado foi dos anos de 1995 a 2017, coletados de três postos: Monteiro, Prata e Sumé (Tabela 4), esses postos estão localizados próximo e dentro da bacia hidrográfica.

Tabela 4 - Descrição dos postos que foram utilizados na segunda simulação

Nome do Posto	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período (Diário)
Monteiro	Pluviométrico	-7.8	-37.11	694	1994 a 2018
Prata	Pluviométrico	-7.7	-37.08	583	1994 a 2018
Sumé	Pluviométrico	-7.67	-36.9	526	1994 a 2018

Fonte: AESA (2020)

Os dados de entrada do tipo climático no SWAT são inseridos de duas formas, de forma diária são os dados que correspondem a dados de precipitação, de temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, dados de umidade relativa do ar e dados de radiação solar e os dados de forma mensal são os dados que irão compor o gerador climático do SWAT o *Weather Generation (WGEN)*. Os dados do gerador climático, podem ser utilizados para simular os valores diários não inseridos no modelo.

Neste estudo foi utilizado dados climatológicos da estação climatológica convencional de Monteiro (Figura 5), essa estação está localizada entre as coordenadas 7,88° de latitude sul e 37,06° de longitude oeste, tendo 603,66 metros de altitude. Foi escolhido essa estação, pois era a estação mais próxima da área de estudo. Esses dados foram coletados no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o período utilizado foi de 1995 a 2016. Sendo assim, foram coletados do INMET dados para compor variáveis de temperatura (TMPMX, TMPMN,

TMPSTDMX, TMPSTDMN), precipitação (PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PR_W1, PR_W2, PCPD, RAINHHMX), e a velocidade do vento (WNDV).

Mesmo com esses dados, ainda restaram dados para preencher alguns parâmetros do gerador climático. Como o SOLARAV, que necessita de dados de radiação solar que foram estimados a partir do modelo empírico proposto por Bristow e Campbell (1984). O parâmetro referente a umidade relativa do ar é o referente a média mensal do ponto de orvalho (DEWPT) e foi utilizado o software *dew.exe*, desenvolvido por Liersch (2003a) para obter a média da temperatura do ponto de orvalho. Ainda foi utilizado a ferramenta *pcpSTAT*, também desenvolvido por Liersch (2003b), para calcular os parâmetros de precipitação citados anteriormente. A Tabela 5 descreve cada parâmetro utilizado neste estudo.

Tabela 5- Parâmetros climáticos utilizados no WGEN

Variáveis	Descrição
TMPMX	Temperatura Máxima Média (°C)
TMPMN	Temperatura Mínima Média (°C)
TMPSTDMX	Desvio Padrão da temperatura Máxima (°C)
TMPSTDMN	Desvio Padrão da temperatura Mínima (°C)
PCPMM	Precipitação Média Mensal. (mm)
PCPSTD	Desvio Padrão da Precipitação (mm)
PCPSKW	Coefficiente de Simetria para a Precipitação Máxima
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%)
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%)
PCPD	Número de dias de precipitação (dias)
RAINHHMX	Precipitação Máxima de 0,5 hora(mm)
SOLARAV	Radiação Solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho (°C)
WNDV	Velocidade do vento (m/s)

Fonte: Carvalho Neto, 2011.

3.3 Descrição do Modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Nesta sessão será descrito as equações utilizadas pelo SWAT para a modelagem nesse estudo, tudo com base no manual do modelo. Segundo Neitsch et al. (2011), o balanço hídrico é o conceito norteador em tudo que acontece na bacia hidrográfica sendo uma das principais equações que o modelo utiliza. Sendo assim, o ciclo hidrológico simulado no SWAT se baseia na equação do balanço hídrico, que é descrita como:

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

onde: SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_o é a umidade do solo inicial no dia i (mm), t é o tempo (dias), R_{day} : a precipitação do dia (mm), Q_{surf} é o escoamento superficial no dia (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração no dia (mm), W_{seep} é a percolação (mm) e Q_{gw} é o fluxo de retorno (mm).

Neitsch et al. (2011) ainda citam que a simulação da hidrologia de uma bacia hidrográfica no modelo é dividida em duas fases, a fase do terreno no ciclo hidrológico ou fase de terra e a fase da água. Na fase da terra é onde o modelo controla a quantidade de água, de sedimento, nutrientes e da descarga de pesticidas no canal principal de cada sub-bacia. Na segunda fase ou fase da água, o modelo controla a movimentação de água e sedimentos na rede de canais da bacia hidrográfica até chegar no ponto de descarga (NEITSCH et al., 2011).

3.3.1 Escoamento Superficial

O Escoamento superficial ocorre quando o volume de água na superfície excede o volume de água infiltrada. Isso ocorre de forma gradativa a partir da infiltração e quando o solo seco começa a ficar úmido, após isso, ao chegar no ponto de saturação do solo o escoamento irá começar (NEITSCH et al., 2011).

O modelo utiliza dois métodos para estimar o escoamento superficial, o método de curva número (CN) e o método de infiltração *Green & Ampt*. Nesse trabalho foi utilizado o método de curva número (CN) para estimar o escoamento superficial. Segundo Noda (2018) esse método foi usado para analisar o comportamento do escoamento superficial em diferentes coberturas e usos do solo, e tipos de solo após mais de vinte anos de experimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais dos Estados Unidos. Seguindo esse método o escoamento superficial é equacionado como:

$$Q_{surf} = \frac{(R - 0,2S)^2}{R + 0,8S} \quad (2)$$

onde: Q_{surf} é o escoamento superficial acumulado (mm); R : é a precipitação do dia (mm); S : é o parâmetro de retenção da água no solo (mm), esse parâmetro pode variar dependendo das características como o tipo de solo, declividade, tempo que a água permanece no solo e o uso e

manejo da terra. Com os valores variando de 1 (solo totalmente seco) a 100 (solo totalmente úmido). O valor S é obtido através da equação 3:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Por fim, o valor de CN pode variar de 0 a 100, com isso quanto mais próximo de 100 o valor de CN, maior será a taxa de escoamento superficial estimada.

3.3.2 Produção de Sedimentos

Em relação a produção de sedimentos causada pela erosão, é estimada pelo modelo através da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE), proposta por Williams (1975), que modificou a equação universal de perda do solo (USLE). A USLE faz a previsão média anual da erosão como uma função da força da chuva, já na MUSLE a força da chuva é substituída pelo fator de escoamento (NEITSCH et al., 2011). Com isso a MUSLE é dada pela equação 4:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot Q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{usle} \cdot C_{usle} \cdot P_{usle} \cdot LS_{usle} \cdot CFRG \quad (4)$$

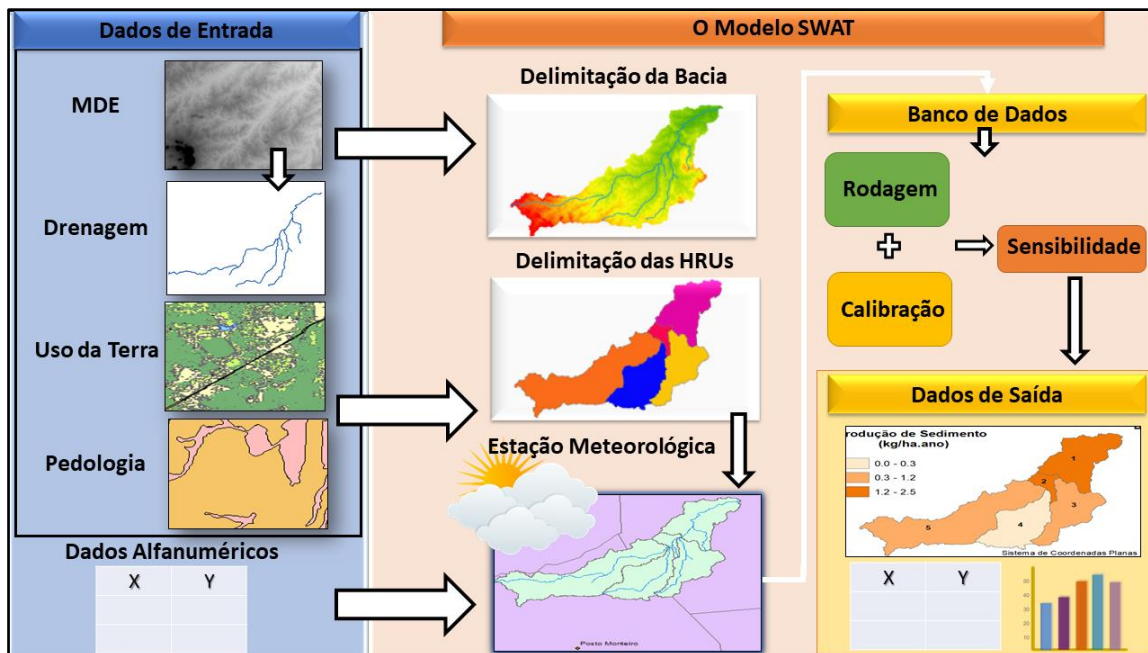
onde: sed é a produção de sedimentos em um determinado dia (t), Q_{surf} é o volume do escoamento superficial ($mm \text{ H}_2\text{O/ha}$), q_{peak} é o pico de escoamento superficial (m^3/s), $area_{hru}$ é a área da unidade de resposta hidrológica (ha), K_{usle} é o fator erodibilidade do solo, C_{usle} é o fator de uso e manejo do solo, P_{usle} é o fator de práticas conservacionistas, LS_{usle} é o fator de topografia, e $CFRG$ é o fator que considera o afloramento de rocha na área.

3.3.3 Construção do Banco de Dados de Entrada no Modelo

O modelo SWAT necessita de alguns dados cartográficos e tabulares para a construção do banco de dados e também do seguimento de etapas para o seu funcionamento. A execução do modelo foi feita através da extensão ArcSWAT, que fica acoplada ao software ArcGIS 10.5 e para o correto funcionamento, todos os arquivos foram reprojetados para o sistema de coordenadas planas, Universal Transversa de Mercator (UTM) com o fuso 24 Sul e *datum* horizontal sirgas 2000. A Figura 8 demonstra as etapas seguidas e os dados utilizados para a

modelagem no SWAT e será descrito cada etapa e os dados utilizados para a modelagem nos próximos tópicos.

Figura 8 - Esquema com as etapas e dados utilizados na modelagem



Fonte: Adaptado de Taveira (2012).

3.3.4 Discretização da Bacia Hidrográfica

A discretização da bacia hidrográfica é a primeira etapa e é iniciada ao inserir o modelo digital de elevação (MDE) em formato *raster* no ArcSwat através da ferramenta *Watershed Delineation*. A partir disso, o modelo define a direção de fluxo (*flow direction*) e a área de acumulação do fluxo de escoamento superficial na bacia (*flow accumulation*) e assim é feita a delimitação da bacia, da rede de hidrográfica a partir da definição do exutório da bacia. Com isso, são geradas as sub-bacias.

3.3.5 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU)

A segunda etapa consiste na sobreposição das informações de tipo de solo, uso da terra e da classe de declividade, com essas informações é possível a criação das unidades de resposta hidrológica (HRU). Essas HRUs são delimitação de áreas na bacia com aspectos físicos

homogêneos. Após a modelagem, o escoamento é calculado para cada HRU individualmente e depois é feito a soma para cada sub-bacia. Uma sub-bacia pode ter várias HRUs.

Existem no modelo duas opções diferentes para a criação das HRUs, a HRU dominante e a HRU múltipla. Na definição de HRU do tipo dominante, para cada sub-bacia a combinação de uso do solo, tipo do solo e declividade de maior extensão será considerado para toda a sub-bacia. Na HRU do tipo múltipla são criadas várias combinações de uso do solo, tipo do solo e declividade, sendo definida de acordo com o comando do usuário do modelo (SERRÃO et al. 2018). Neste estudo foi escolhido a opção de HRU do tipo múltipla por ser possível definir com as características da área de estudo.

3.3.6 Classes de Uso da Terra e Tipos do Solo

Para que a modelagem ocorra de forma mais fidedigna com as características da bacia é necessário inserir no modelo dados das características dos tipos de solo e escolher o uso da terra compatível com o banco de dados do SWAT. Para isso, o uso da terra foi obtido pela classificação supervisionada a partir de imagens de satélites e foi feita a classificação associando as classes encontradas com as classes existentes no banco de dados do modelo, como pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6-Associação das classes de uso do solo da Bacia Representativa de Sumé com as classes existentes no banco de dados do SWAT

Uso da terra	Classe do SWAT
Água	Water (WATR)
Vegetação Caatinga Arbustiva	Range Brush (RNGB)
Vegetação Caatinga Herbácea	Range Grass (RNGE)
Solo exposto/Agricultura/Pecuária	Barren (BARR)
Estrada pavimentada	Transportation (UTRN)

Fonte: O autor.

Para o tipo de solo foi necessário incluir o tipo de solo da bacia no banco de dados do SWAT. Para inserir esses dados foi necessário coletar na literatura os parâmetros dos solos encontrados na BRS, para isso foi utilizado dados do sistema de informação de solos brasileiro fornecido pela EMBRAPA (2015). Como não se tinha dados especificamente do

município de Sumé, foi coletado dados de regiões próximas que são hidrologicamente homogêneas a área de estudo, como pode se observar na Tabela 7.

Tabela 7-Descrição dos perfis da Embrapa utilizados na pesquisa

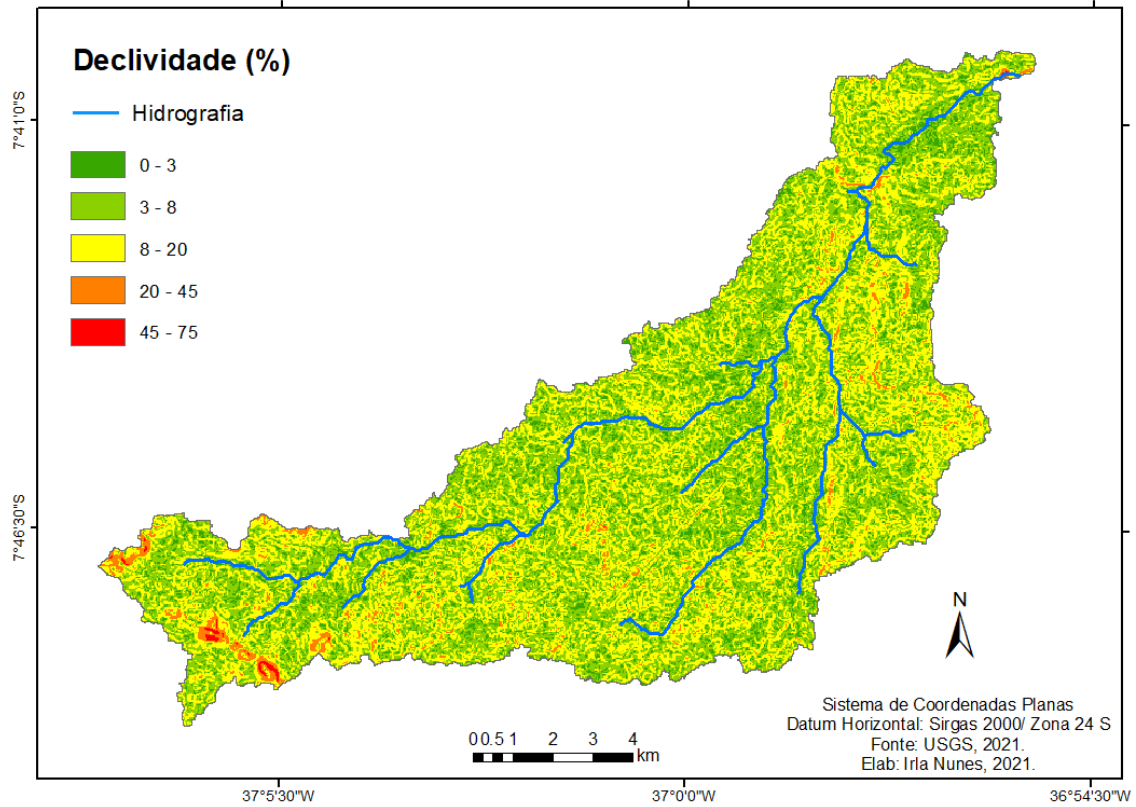
Tipo de solo	Código do Ponto de amostragem	Município
Argissolo Vermelho Amarelo	5646	Patos
Luvisolo	7761	Monteiro
Neossolo Flúvico	5684	Patos

Fonte: O autor.

3.3.7 Classes de declividade

Quanto a definição das classes de declividade foi utilizada a definição proposta pela EMBRAPA (1979), sendo assim definida em cinco classes, a primeira de 0 a 3% que corresponde ao relevo plano; a segunda de 3 a 8% que corresponde ao relevo suave-ondulado; a terceira classe de 8 a 20% que é o relevo ondulado, a quarta classe de 20 a 45% que é o relevo forte-ondulado e o quinto foi classificado como a partir de 45% e corresponde ao relevo montanhoso. A Figura 9 demonstra as classes de declividade na BRS. Por fim, o modelo necessita da definição de uma área mínima para a HRU e para isso foi definido 15% de área mínima em porcentagem para o uso da terra, tipo do solo e a declividade.

Figura 9 - Mapa de declividade da Bacia Representativa de Sumé-PB



Fonte: O autor.

3.4 Análise Estatística de Desempenho do SWAT

Após a modelagem foi necessário fazer uma análise estatística para avaliar o desempenho da modelagem. Para isso, foram utilizados os testes estatísticos Coeficiente de Eficiência (COE) que foi elaborado por Nash e Sutcliffe (1970) e o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2) para comparar os dados do escoamento superficial modelado com dados observados da bacia. Para calcular o COE, foi utilizado a equação.6 que será descrita abaixo:

$$COE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \right) \quad (6)$$

em que, E_m é o valor do evento observado, E_s é o valor do evento simulado, e $\bar{E}_s$ é o valor médio do evento observado.

O COE avalia o comportamento dos dados observados pelos dados simulados e o valor também varia de -1 a 1 e quanto mais próximo de 1 o valor melhor a será a calibração e o

resultado da modelagem. Onde, quando o valor de COE é menor que 0,50 são considerados insatisfatórios, quando o valor de COE está entre 0,50 e 0,65 são satisfatórios, quando o valor está entre 0,65 e 0,75 são considerados bom e quando o valor é maior que 0,75 é considerado muito bom. (MORIASI et al., 2007).

O R^2 pode ser descrito segundo Moriasi (2007) como um teste estatístico em que é feito uma análise entre a colinearidade entre os dados simulados e os dados observados. Neste teste os valores variam de -1 a 1, sendo assim quanto mais próximo do -1 significa que a relação linear é negativa e quanto mais próximo do 1 que a relação linear é positiva e se o resultado for igual a zero, significa que nesses dados não existe relação linear. De acordo com Ribeiro e Andrade (2020), quanto mais próximo de 1 o valor do R^2 melhor será a calibração e assim melhor será a modelagem. Esse teste é calculado de acordo com a equação abaixo:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (5)$$

onde: y_i refere-se aos valores estimados pelo modelo, y_m : é a média dos valores estimados, x_i refere-se aos valores observados, x_m refere-se a média dos valores observados, e n é equivalente ao número de eventos.

3.5 Calibração do Modelo SWAT

A calibração do modelo é uma importante etapa de verificação e ajuste da modelagem. Nessa etapa foi utilizado dados observados de vazão da bacia para calibrar o modelo e obter os melhores valores para os parâmetros do solo, ocorrendo assim o melhor ajuste do modelo. Esse processo de calibração automática dos parâmetros foi executado a partir do *software* de domínio público que foi desenvolvido por Abbaspour et al. (2007), o *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-Cup). Segundo Brighenti et al. (2016), o SWAT-CUP disponibiliza cinco opções para a interface do modelo SWAT de procedimentos que permitem a calibração, que são: SUFI2, ParaSol, GLUE, PSO e o MCMC. Esses são descritos de forma mais detalhada no trabalho de Abbaspour (2012).

O algoritmo utilizado nesse trabalho foi o *Sequential Uncertainty Fitting 2* (SUFI-2), esse algoritmo considera as incertezas dos dados observados e dos parâmetros do solo escolhidos e suas amplitudes, além de analisar se os dados de vazão estão com uma margem de

95% de incerteza em relação aos valores iniciais (ABBASPOUR, 2012). Segundo esse mesmo autor são necessários um número elevado (entre 500 e 1000) de iterações para uma boa calibração, por isso, neste projeto foram feitas 500 iterações.

A escolha dos parâmetros do solo a serem utilizados na calibração é de grande importância, com isso foi escolhido utilizar parâmetros já testados anteriormente para essa bacia e para bacias próximas hidrologicamente homogêneas que obtiveram um bom resultado de calibração. Sendo assim, os 16 parâmetros escolhidos foram coletados e adaptados do estudo feito por Dantas (2016) que realizou uma análise hidrossedimentológica para a Bacia do Taperoá-PB, que também é uma bacia localizada no semiárido paraibano. Na Tabela 8 estão descritos os parâmetros utilizados.

Outro importante ponto é a escolha dos dados observados de vazão, um dos motivos da escolha dessa área de estudo foi pela coleta de dados feita pela SUDENE nas décadas de 1970 a 1980, inclusive dados de vazão. Com isso, o período de dados utilizados foi de 27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978, da sub-bacia Gangorra (Sub-bacia.1), sendo esse o maior período contínuo sem falhas da bacia para dados diários.

Tabela 8- Parâmetros utilizados para a calibração do SWAT para a BRS

Parâmetros do solo	Descrição dos parâmetros	Métodos
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	Substituição
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional)	Substituição
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	Substituição
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional)	Multiplicação
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	Substituição
Ch_N2	Coefficiente de Manning do canal (adimensional)	Substituição
Epc0	Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional)	Substituição
Esco	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional)	Substituição
Gw_revap	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada (adimensional)	Substituição
Revapmn	Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm)	Substituição
Slsbbsn	Comprimento da declividade média (m)	Multiplicação
Sol_Alb	Albedo do solo (adimensional)	Multiplicação
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm)	Multiplicação
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	Multiplicação

Parâmetros do solo	Descrição dos parâmetros	Métodos
Sol_Z	Profundidade da camada de solo (mm)	Multiplicação
Surlag	Tempo de retardo de escoamento superficial (dias)	Substituição

Fonte: Adaptado de Dantas (2016).

Após a calibração concluída, esses parâmetros otimizados foram utilizados na modelagem da realidade com o uso da terra de 1984, na realidade com o uso da terra de 2019 e nas modelagens com uso da terra futuro.

3.6 Cenários Futuros

Após as simulações das realidades, foram utilizados os valores dos parâmetros ajustados na etapa de calibração do modelo para modelar os cenários futuros. Foi utilizado cenários hipotéticos de uso e cobertura da terra e cenários climáticos diferentes que serão descritos de forma mais detalhada a seguir:

3.6.1 Cenários Hipotéticos de Uso e Cobertura da Terra

Neste trabalho, três cenários hipotéticos de uso e cobertura da terra serão utilizados para avaliar os processos hidrossedimentológicos no futuro: (a) cenário de uso da terra regular, (b) cenário de uso da terra otimista, e (c) cenário de uso da terra pessimista. Esses cenários foram construídos a partir do uso da terra de 2019, ou seja, uma realidade atual, mas utilizando diferentes critérios que serão descritos a seguir:

3.6.1.1- Cenário de Uso da Terra Regular

O cenário de uso da terra regular foi construído com intuito de criar hipoteticamente um cenário com base em alguns critérios da delimitação das áreas de preservação permanente, descrito na Lei de nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que institui o código florestal brasileiro. A partir da manipulação manual das classes do uso da terra de 2019 no *software* ArcGIS 10.2. Para isso, foi utilizado a técnica de geoprocessamento *buffer* para delimitar as áreas que seriam modificadas e também as ferramentas de edição *merge*, *union* e *erase*. O *merge* foi utilizado para agrupar as áreas de buffer, o *union* para unir as áreas modificadas nas classes que seriam

inseridas e *erase* para excluir as áreas modificadas das classes. Essas áreas serão mais bem descritas a seguir.

O primeiro critério utilizado, foi o acréscimo de vegetação do tipo caatinga arbustiva em trinta metros no entorno dos rios, pois o rio da bacia tem uma largura menor que dez metros, como foi descrito Art. 4º do capítulo II que regulamenta as diretrizes das áreas de preservação permanente, na seção I, que considera como Área de Preservação Permanente (APPs) “as faixas marginais de qualquer curso d’água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de 30 (trinta) metros, para os cursos d’água de menos de 10 (dez) metros de largura” (BRASIL, 2012).

O segundo critério foi o acréscimo de vegetação do tipo caatinga arbustiva em trinta metros no entorno dos reservatórios. Como foi instituído no inciso III, Art. 4º do capítulo II do código florestal, que afirma que as “áreas no entorno dos reservatórios d’água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d’água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento” (BRASIL, 2012), são consideradas áreas de preservação permanente. E a faixa mínima de 30 metros também foi instituída nessa mesma Lei do código florestal no Art.5º, onde dispõe que em reservatórios d’água artificial, utilizados para geração de energia ou abastecimento público é obrigatória a criação de APPs em seu entorno, com faixa mínima de 30 (trinta) metros e máxima de 100 (cem) metros em área rural (BRASIL, 2012).

E por fim foi modificado e acrescentado vegetação do tipo caatinga arbustiva em 30 (trinta) metros nas áreas de encostas ou partes com declividade igual ou superior a 45º, como também foi instituído nessa mesma lei no inciso V, Art. 4º do capítulo II, como área de preservação permanente (BRASIL, 2012).

3.6.1.2- Cenário de Uso da Terra Otimista

O Cenário de uso da terra otimista foi construído com o intuito de construir um cenário a partir dos mesmos critérios do cenário regular, mas acrescentando um a faixa de vegetação do tipo caatinga arbustiva maior que 30 metros, que é a faixa mínima. Sendo assim, com um acréscimo de vegetação maior do que o mínimo exigido na lei. Com isso, foi acrescentado vegetação do tipo caatinga arbustiva em 100 metros no entorno dos rios, de reservatórios e nas áreas de topo maior que 45º de declividade.

3.6.1.3- Cenário de Uso da Terra Pessimista

O cenário de uso da terra pessimista foi construído com o objetivo de avaliar os aspectos hidrossedimentológicos futuros em um cenário hipotético, onde a vegetação do tipo caatinga arbustiva foi suprimida em detrimento do crescimento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária. Para a construção do cenário pessimista, foi utilizado o cenário otimista como base e foi suprimido a área com caatinga arbustiva acrescentada na construção do cenário otimista, onde toda a vegetação caatinga arbustiva acrescentada no cenário otimista foi modificada para a classe de solo exposto/agricultura/pecuária neste cenário.

3.6.2 Projeções dos Cenários Climáticos Futuros

As projeções de cenários climáticos futuros, foram realizadas utilizando dados gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados na plataforma PROJETA (<https://projeta.cptec.inpe.br>). Os dados desse portal são o resultado do *downscaling* de dados de modelo de circulação global com um modelo regional (Eta), para melhorar as projeções e resoluções de alcance. O modelo Eta é um modelo de área limitada por pontos de grade. Uma das características do modelo é a coordenada vertical Eta, que representa a topografia da região a ser modelada. O modelo Eta vem recebendo atualizações desde a versão operacional usada no NCEP (MESINGER et al., 2012).

Os dados utilizados são do modelo HadGEM-2ES, que disponibiliza dados entre os anos de 2006 a 2099 para todo o continente americano com uma resolução de 20km e em dois cenários de avaliação diferente, RCP 4.5 (emissões médias de GEE) e o RCP 8.5 (altas emissões de GEE). O modelo britânico *Hadley Centre's Global Environmental Model version 2* (HadGEM-2ES), foi segundo Martin et al. (2011) desenvolvido a partir do melhoramento de modelo anteriores e tem como intuito simular o clima futuro, levando em consideração os fatores biológicos. Mais informações sobre os modelos e os cenários climáticos podem ser obtidos em Chou et al. (2014a), Chou et al. (2014b), e Lyra et al. (2017).

Neste estudo, para as simulações futuras foram utilizados dados diários de precipitação total e temperatura máxima e mínima futuros dos cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5, as demais variáveis climáticas foram utilizadas dados observados.

Para a coleta, foi utilizado o portal Projeta do INPE, onde foram inseridas as variáveis a serem coletadas, o modelo utilizado, a localização que foi obtida desenhado sob o mapa no

portal um retângulo compreendendo a região da bacia e o período, que compreendeu do ano de 2030 ao ano de 2070. Após coletados, esses dados foram organizados e denominados de postos pcp1e pcp2, para a precipitação e temp1 e temp2 para os postos de temperatura, conforme pode ser observado na tabela 9. O período de dados coletados foi de 2030 a 2070, pois foi utilizado dez anos como período de aquecimento, com isso, as simulações foram de 2040 a 2070.

Esses dados foram organizados e preparados para a simulação no SWAT, onde foram utilizados os dados de entradas das simulações anteriores (DEM, tipo do solo, WGEN e parâmetros de solo), mas foram ajustados os dados diários de chuva e temperatura e os mapas de uso da terra para cada simulação futura.

Tabela 9 – Localização geográfica do centroide da grade do modelo climático utilizado

Nome do Posto	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período (Diário)
Pcp1	Pluviométrico	-7.6	-37	592	2030 a 2070
Pcp2	Pluviométrico	-7.8	-37	615	2030 a 2070
Temp1	Temperatura	-7.6	-37	592	2030 a 2070
Temp2	Temperatura	-7.8	-37	615	2030 a 2070

Fonte: CPTEC/INPE (2021)

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão demonstrados os resultados obtidos no estudo, como a análise do uso e ocupação da terra da Bacia Representativa de Sumé (BRS) e os resultados da modelagem dos processos de escoamento superficial e a produção de sedimentos nas realidades de uso da terra do ano de 1984, de 2019 e com base nos cenários futuros.

4.1 Mapeamento e Análise do Uso da Terra na BRS

A análise de uso da terra da Bacia Representativa de Sumé é um importante parte desse projeto, com ela foi possível avaliar as mudanças ocorridas ao longo do tempo na bacia e se essas mudanças influenciaram os processos de escoamento superficial e de produção de sedimentos.

Tabela 10 - Variação das classes de uso da terra da BRS

Classes	1984		2019		Variação	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Água	2,8	1,91	1,06	0,72	-1,74	-1,19
Vegetação Caatinga Arbustiva	75,7	51,68	53,3	36,4	-22,4	-15,28
Vegetação Caatinga Herbácea	50,4	34,4	51,1	34,9	0,7	0,5
Solo Exposto/Agricultura/Pecuária	17,0	11,6	40,2	27,44	23,2	15,84
Estrada	0,6	0,41	0,8	0,54	0,2	0,13
TOTAL	146,5	100	146,5	100	-	-

Fonte: O autor.

Desse modo, os anos analisados inicialmente foram de 1984 e 2019, mostrando uma diferença temporal de 35 anos na bacia em estudo. Assim, ao analisar a BRS obteve o resultado que houve uma grande variação da área das classes da bacia como se pode observar na Tabela 10, onde a classe que teve o maior crescimento foi a classe de solo exposto/agricultura/pecuária, com um crescimento de 15,84 % em 2019 e a classe que teve a maior redução em área foi a classe de vegetação caatinga arbustiva, onde foi encontrado uma redução de 15,2 %. Outra classe que teve uma redução foi a classe de água que obteve uma redução de 1,19%, nessa região qualquer redução nessa classe é algo significativo devido à escassez hídrica. Essa

mudança significativa das classes acima citadas é possível observar na Figura 10, que demonstra os mapas com o uso da terra de 1984 e 2019.

Na Figura 10, há uma presente mudança da coloração do mapa de um ano para o outro, com o crescimento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária na parte central na bacia e com isso a redução da classe de vegetação caatinga arbustiva e uma diminuição da classe água principalmente na porção nordeste do mapa onde fica localizado o açude de Sumé.

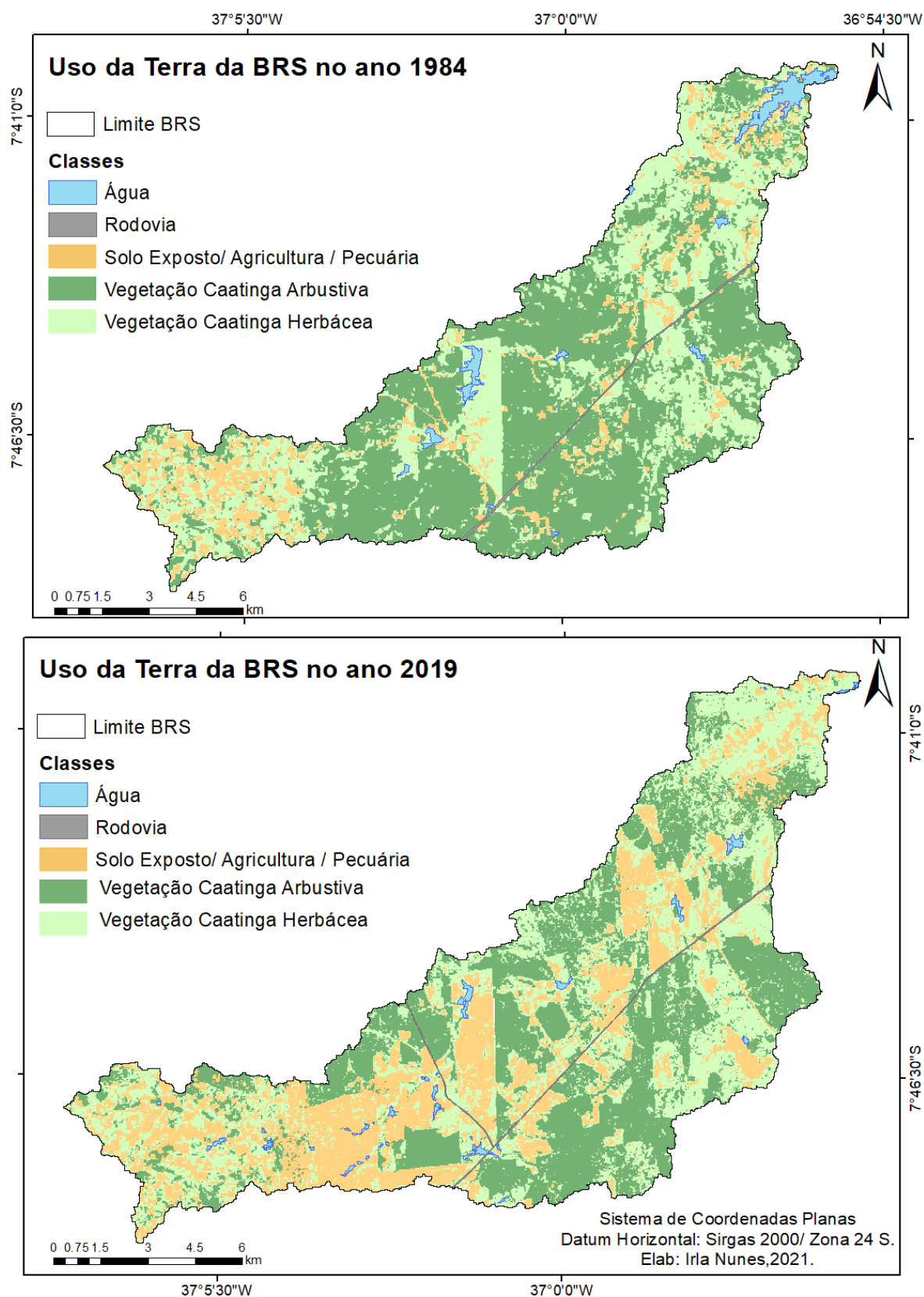
De acordo com o Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável (PTDRS, 2011) essa região teve por muitos anos o binômio Gado-Algodão como principais atividades econômicas, essas atividades contribuíram para o aumento do processo de desmatamento dessa região. Só sendo substituída após a decadência do algodão devido a praga do Bicudo (*Anthonomus grandis*), na década de 1980. Com isso ocorreu o incentivo a pecuária por meio de políticas públicas. Sendo assim, a principal fonte econômica atual da região é a criação de gado (SOUZA, 2008).

Essa mudança das classes de vegetação pode ser explicada pelo intenso processo de degradação ambiental causado principalmente pelas práticas agropecuárias sem planejamento adequado que ocorrem na região. Já em relação a diminuição das classes de água principalmente no reservatório pode ter acontecido pelo intenso período de seca enfrentado nos últimos anos.

Esse fenômeno natural que afeta essa região periodicamente, teve início no ano de 2012, foi intensificado em 2015, segundo Marengo et al. (2016), sendo considerado um dos períodos de seca mais duradouros e mais graves das últimas décadas, indo até o ano de 2017 (SANTANA e SANTOS, 2020). Nesse período, a produção agropecuária foi muito afetada principalmente os pequenos produtores da agricultura familiar, tendo por exemplo a produção de feijão, milho, algodão e sisal uma redução de em média 45,83; 0,22; 12,12 e 69,42 respectivamente. Já em relação a pecuária houve uma redução da criação de bovinos e um aumento da criação de caprinos. (SANTANA e SANTOS, 2020)

Essa última seca diminuiu a produção vegetal devido a redução das chuvas, além de que esse fenômeno atinge diretamente a população, pois implica diretamente na agricultura familiar de sequeiro e na pecuária extensiva que são as atividades econômicas predominantes na região (MARENGO et al., 2016).

Figura 10- Mapas de uso da terra dos anos de 1984 e 2019 da BRS

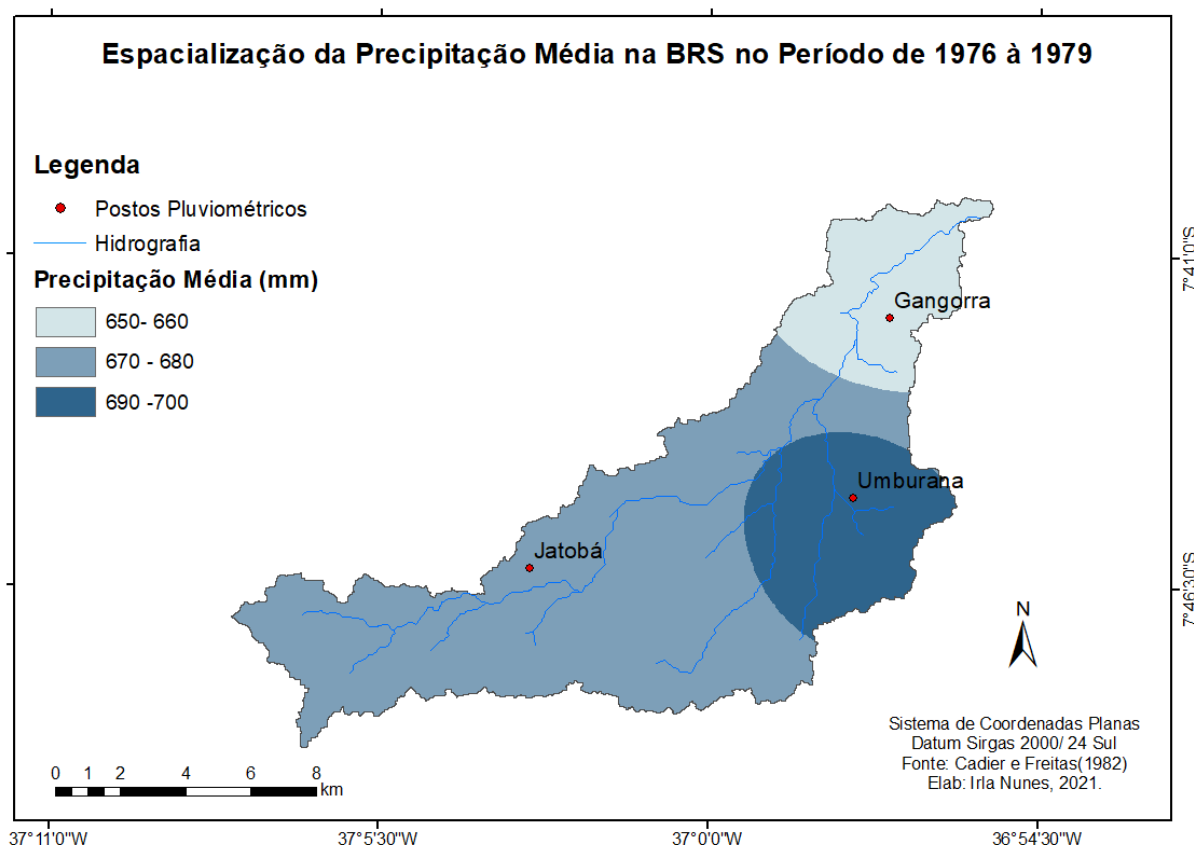


Fonte: O autor.

4.2 Espacialização da Precipitação Histórica

A precipitação nesse trabalho foi utilizada em períodos diferentes e com postos pluviométricos diferentes, no primeiro período que compreendeu de 1976 à 1979 a espacialização da precipitação média variou de 650 a 700 mm como pode ser observado na Figura 11. A região que menos precipitou foi próxima ao posto Gangorra que variou de 650 a 660 mm e corresponde a região da sub-bacia Gangorra e onde mais precipitou foi próximo ao posto Umburana que variou entre 690 a 700 mm e também corresponde a região da sub-bacia Umburana.

Figura 11 - Espacialização da Precipitação na BRS, no período de 1976 à 1979

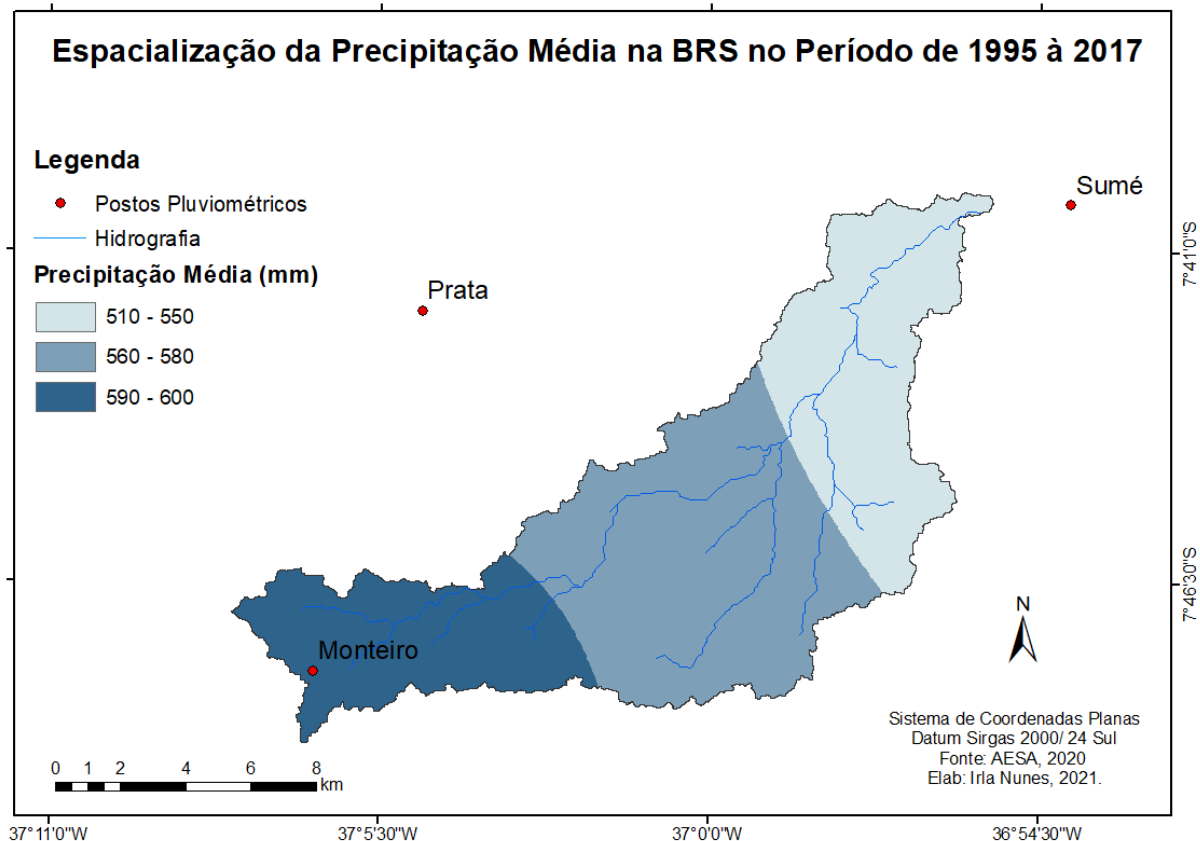


Fonte: O autor.

Quanto ao segundo período que correspondeu ao ano de 1995 a 2017, a espacialização da precipitação média variou de 510 a 600 mm (Figura 12). Uma redução significativa em relação ao primeiro período, onde a classe com a maior precipitação do segundo período

corresponde a um valor menor a classe com menos precipitação do primeiro período. Em que a região que menos precipitou foi na região próxima ao posto Sumé que está localizada na sub-bacia Gangorra, como no primeiro período, mas com uma variação de 510 a 550 mm. A região que menos precipitou foi onde está localizado a sub-bacia Jatobá e está próximo ao posto Monteiro e variou de 590 a 600 mm.

Figura 12 - Espacialização da precipitação na BRS para o período de 1995 a 2017



Fonte: O autor.

4.3 Resultado da Calibração

No primeiro momento para saber se o modelo seria capaz de fazer a modelagem dos processos foi necessário analisar os resultados da simulação inicial, para isso foram utilizados métodos estatísticos para fazer a análise. Sendo assim, antes da calibração o R^2 foi de 0,17 e o COE -0,68, como está descrito na Tabela 11. Esses resultados indicam um desempenho não satisfatório da modelagem inicial, sendo necessário a calibração do modelo. Após a calibração do posto Gangorra com base no uso da terra de 1984 o valor do R^2 foi para 0,66, que significa

um bom resultado pois é próximo de 1 e o valor do COE foi de 0,59, que é um resultado considerado satisfatório de acordo com Moriasi et al. (2007).

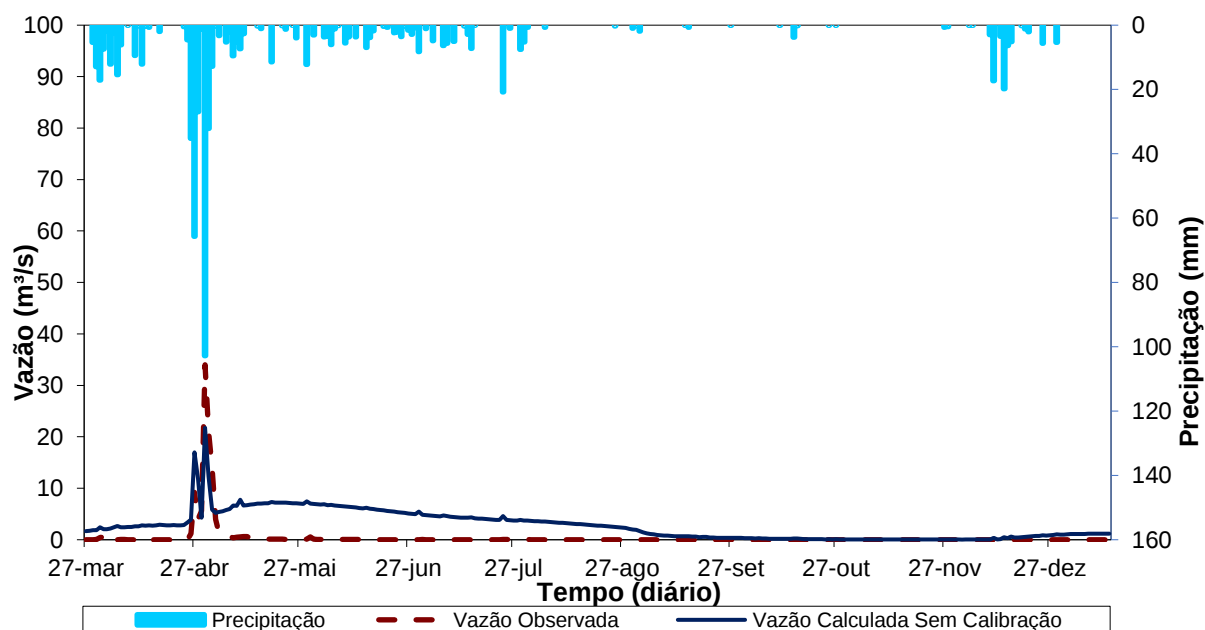
Tabela 11 - Resultados estatísticos da calibração

Estatísticas	1ª simulação (Não calibrada, com base no uso de 1984)	2ª simulação (Parâmetros calibrados, com base no uso 1984)
R ²	0,17	0,66
COE	-0,68	0,59
Média Simulada (m ³ /s)	2,75	0,98
Média Observada (m ³ /s)	0,36	0,36

Fonte: O autor.

A média de vazão simulada não calibrada foi de 2,21 m³/s, já a média de vazão simulada calibrada foi de 0,98 m³/s. Uma redução significativa e com base na Tabela 10 é possível observar que o modelo superestimou a média de vazão simulada na 1ª simulação (não calibrada) em 613,88 % e superestimou a média de vazão simulada na 2ª simulação (calibrada) em 169% em comparação a média observada. Mesmo assim, houve um bom ajuste após a calibração do modelo. Sendo que esses valores são referentes ao período de simulação que foi de período de 27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978.

Figura 13- Gráfico com a comparação da vazão observada e calculada na 1ª simulação no Posto Gangorra

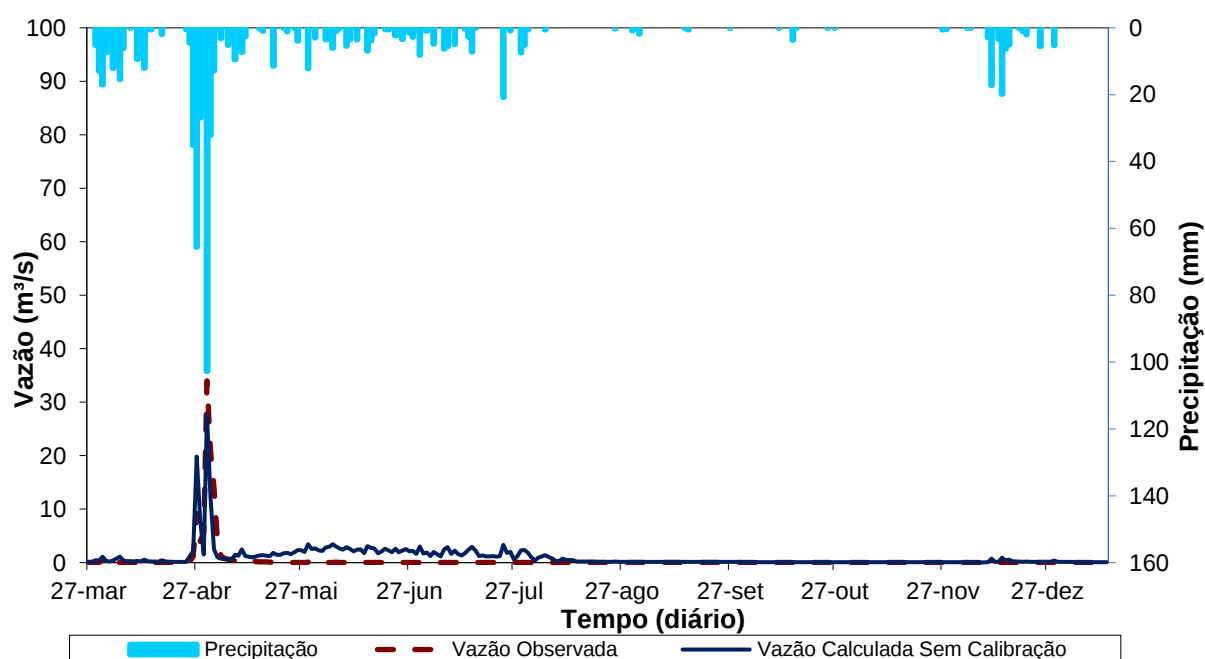


Fonte: O autor.

É possível visualizar esse ajuste do modelo após a calibração ao comparar as figuras 13 e 14 que demonstram respectivamente, o gráfico da vazão observada pela vazão calculada na primeira (sem calibração) e na segunda (após a calibração) simulação no período de 27 de março de 1977 a 13 de janeiro de 1978.

Outro ponto a se observar foi que o modelo subestimou a vazão na segunda simulação (Figura 14) no pico de vazão que também coincidiu com o pico de precipitação e superestimou no período entre os meses de maio a julho de 1977. É possível observar na figura 14 que nesse período a uma concentração de chuvas na bacia, que está entre os meses de fevereiro a maio, sendo o maior pico no mês de março.

Figura 14 - Gráfico com a comparação da vazão observada e calculada na 2ª simulação no Posto Gangorra



Fonte: O autor.

4.4 Análise das Mudanças de Uso da Terra no Processo de Escoamento Superficial

O escoamento superficial foi analisado com base no uso da terra de 1984 e de 2019, porém utilizando períodos de precipitação diferentes. Obtendo assim, uma média geral no valor do escoamento superficial com base no uso da terra de 1984 de 0,11 mm e com base no uso da

terra de 2019 o valor do escoamento superficial médio foi de 0,28 mm. Um crescimento de 150% de uma simulação para outra.

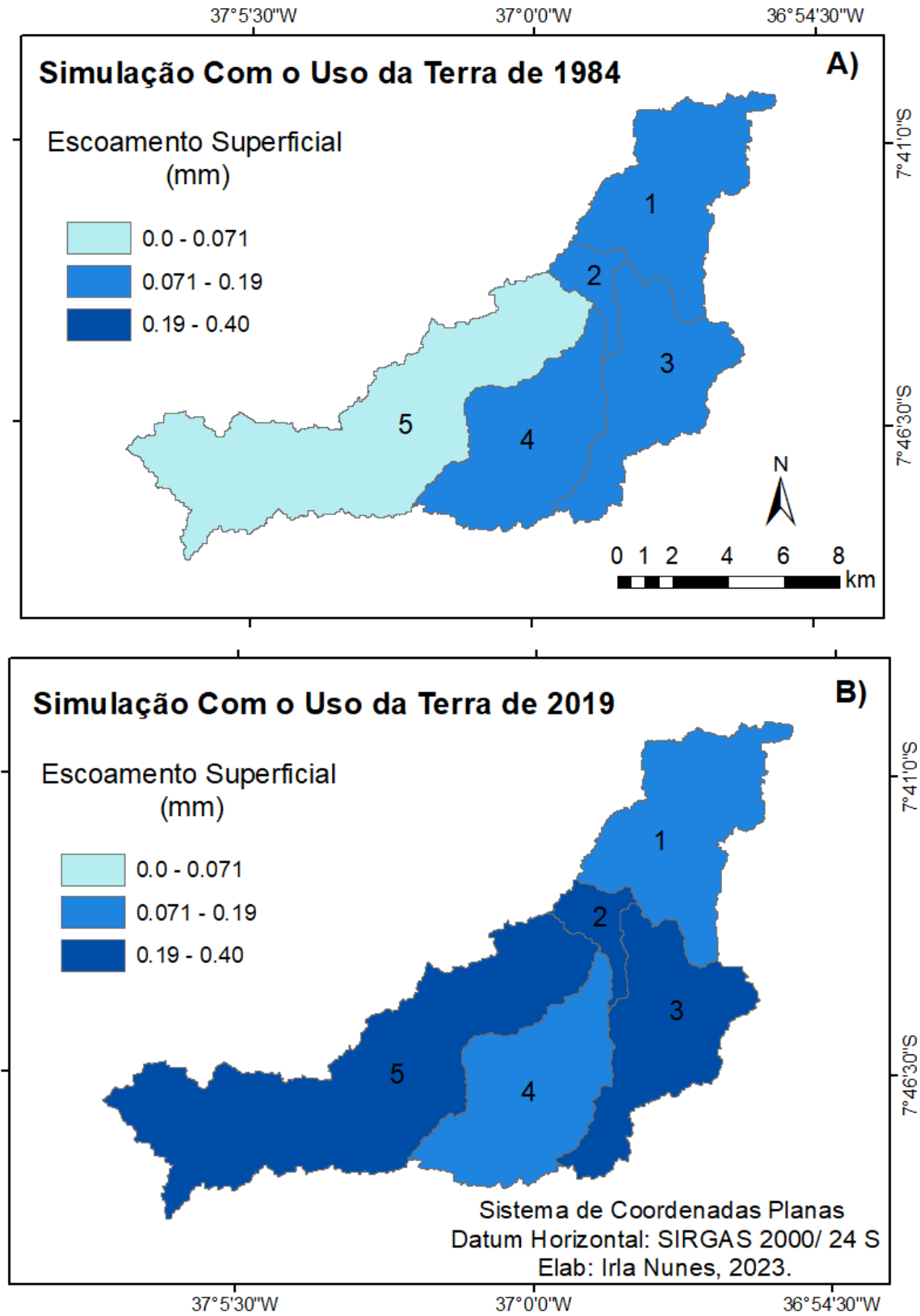
As Figuras 15A-B apresentam as distribuições espaciais do escoamento superficial na BRS. A Figura 15A refere-se à simulação com base no uso da terra de 1984 e a na Figura 15B, refere-se à simulação com base no uso da terra de 2019. No mapa A, o escoamento superficial variou de 0 a 0,4 mm, sendo a maior concentração de escoamento nas sub-bacias 1,2,3 e 4 que variaram na faixa entre 0,071 a 0,19 mm, a sub-bacia 5 ficou concentradas na faixa entre próximas do 0,0 a 0,071 mm. Na Figura 16B, o escoamento também variou de 0 a 0,4 mm onde ocorreu uma visível mudança do aumento da concentração do escoamento superficial nas sub-bacias 2, 3 e 5, que variaram de 0,19 a 0,4 mm, sendo o maior crescimento na sub-bacia 5.

Nas porções oeste e central da bacia foi onde ocorreram as maiores modificações em relação ao uso da terra na bacia onde nessa região ocorreu a diminuição das classes de vegetação de caatinga e o crescimento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária para o ano de 2019. Isso pode ter provocado essa mudança da espacialização do escoamento onde houve um crescimento do escoamento nas sub-bacias 5, 3 e 2.

Esse aumento do escoamento pode ter sido provocado pela diminuição da vegetação, pois segundo Guimarães (2017) a presença da cobertura vegetal na bacia influencia diretamente no aumento do processo de infiltração e na diminuição do escoamento superficial, sendo assim com a retirada ou diminuição da cobertura vegetal provoca uma menor infiltração e o aumento do escoamento superficial.

Em relação a sub-bacia 1, esta manteve os menores índices de escoamento superficial no ano de 2019, não tendo variação de faixa, pode estar relacionada a ser a região com menor concentração de precipitação nos dois períodos estudados como pode ser observado nas Figuras 8 e 9.

Figura 15 - Mapa com a distribuição do escoamento superficial na BRS, sendo (a) referente a simulação para o uso de 1984 e (B) a referente a simulação para o uso de 2019.



Fonte: O autor.

4.5 Mudança do Uso da Terra e a Produção de Sedimentos

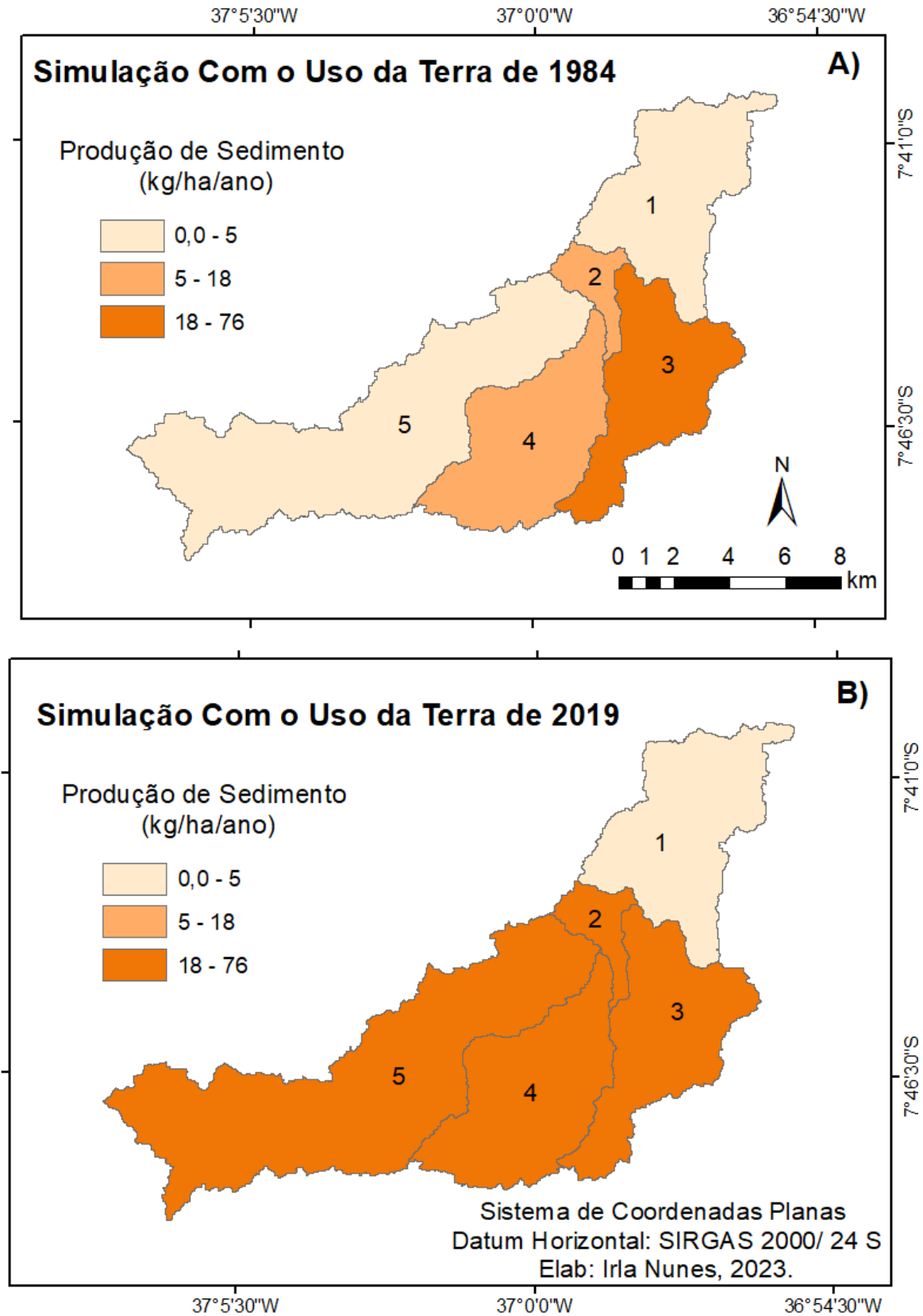
Quanto a produção de sedimentos, para a simulação com base no uso da terra de 1984 o valor médio foi de 10 kg/ha/ano e para a simulação com base no uso da terra de 2019 o valor médio foi de 40 kg/ha/ano, ou seja, um crescimento de 272% entre as duas simulações. A espacialização da produção de sedimentos pode ser observada na Figura 16, onde o mapa A representa a produção de sedimento com base no uso da terra de 1984 e o mapa B demonstra a produção de sedimento com base no uso da terra de 2019. Sendo assim, a produção de sedimento variou de 0,0 a 76,0 kg/ha/ano nos mapas.

No mapa A, a maior produção de sedimento ficou concentrada nas sub-bacias 2, 3 e 4, sendo a maior produção na sub-bacia 3 e a menor faixa que foi de 0,0 a 5 kg/ha/ano, foi compreendida nas sub-bacias 1 e 5. No mapa B houve um crescimento em todas as sub-bacias exceto a sub-bacia 1, que manteve a mesma faixa da simulação com base no uso da terra de 1984. As demais sub-bacias concentrarão a maior produção de sedimento, o que correspondeu a faixa entre 18 a 76 kg/ha/ano. Essas sub-bacias compreendem a região central da bacia, nessa região foi onde ocorreu a maior concentração da classe de solo exposto/agricultura/pecuária no ano de 2019 e que antes era concentrada por classes de vegetação.

Segundo Sá et al. (2010) atividades agrícolas sem devidas técnicas de manejo, o uso de técnicas rudimentares para controle da erosão e a pecuária extensiva sem o controle pastoreio são as principais causas da erosão no semiárido brasileiro que necessita da vegetação da caatinga para a proteção do solo da energia cinética da chuva e do processo de arraste de partículas. A cobertura vegetal protege o solo da energia cinética das chuvas que intensifica o processo de erosão hídrica. Sendo assim, um solo exposto está mais susceptível a erosão e com isso a uma maior produção de sedimentos, como ocorreu nessa bacia.

Outro ponto a se observar é o tipo de solo predominante no local em que a bacia está inserida, que é em maior parte foi solo do tipo luvisolo crômico com cerca de 75%. Esse tipo de solo é raso e possui mudança de textura abrupta, com isso, é mais susceptível a erosão (ALMEIDA et al., 2021).

Figura 16-Mapa com a distribuição da produção de sedimentos na BRS, sendo o mapa A referente a simulação para o uso de 1984 e o mapa B referente a simulação com o uso da terra de 2019.



Fonte: O autor.

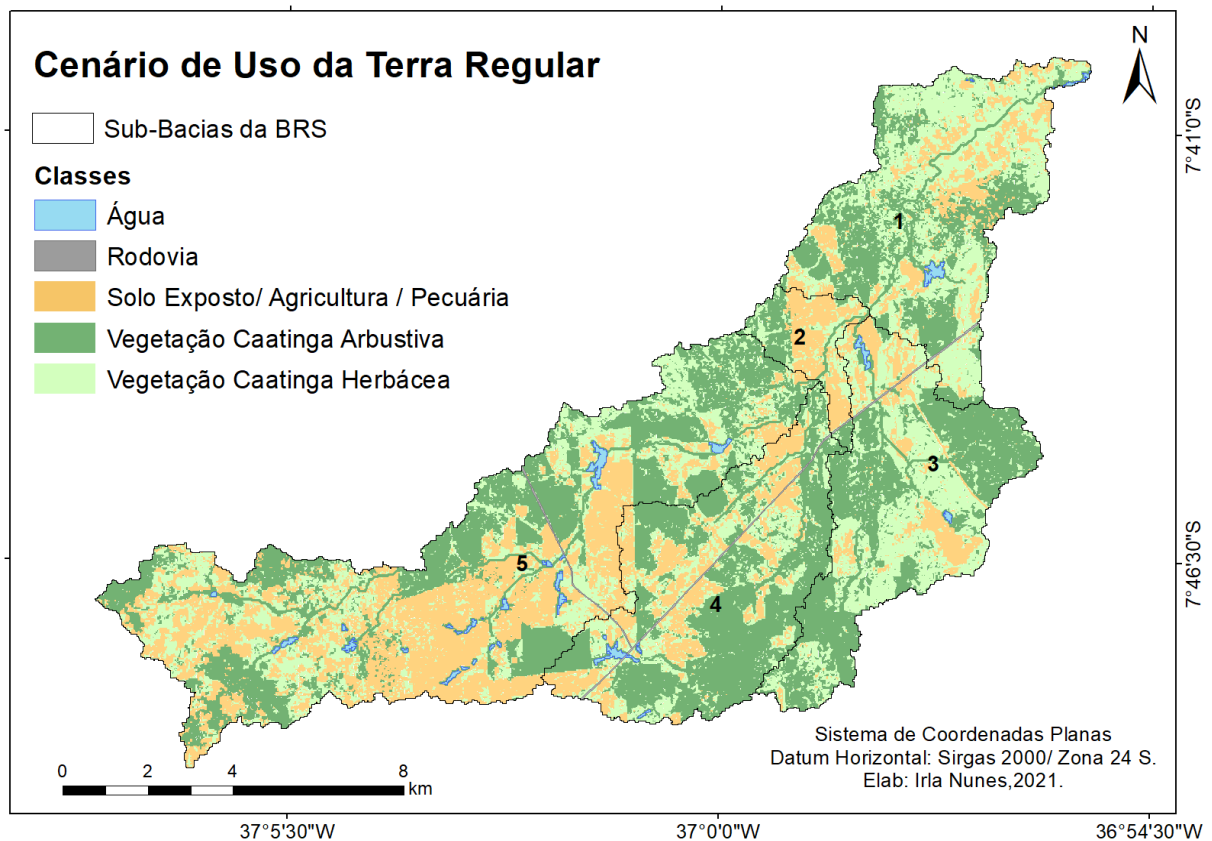
4.6 Cenários Futuros

Nesta etapa será descrito os resultados da elaboração dos cenários de uso da terra futuro, como também a distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos nesses diferentes cenários de uso da terra e de clima.

4.6.1 Análise dos Cenários Uso da Terra na BRS

A Figura 17, demonstra a espacialização das classes da BRS após a construção do modelo hipotético de uso da terra regular. Por conseguinte, com acréscimo da classe de vegetação de caatinga arbustiva, essa foi a classe com maior porcentagem de distribuição na bacia, representando 40,48 % do total. Isso, representa um crescimento de 4.08% em relação a realidade de uso da terra atual (2019), já a classe que mais decaiu foi a classe de vegetação caatinga herbácea (-2,99%) e a classe de solo exposto/agricultura/pecuária (-1,09%) como pode ser observado na tabela 12.

Figura 17 - Mapa com o cenário de uso da terra regular



Fonte: O autor.

Mesmo com crescimento das classes de vegetação arbustiva na bacia, as porções central e oeste, permanecem com uma distribuição da classe de solo exposto/agricultura/pecuária expressiva, sendo a região onde localiza-se a sub-bacia 2, a que teve o menor acréscimo de vegetação.

Tabela 12 -Tabela com a variação das classes de uso do solo

Classes	2019		Regular		Variação	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Água	1,06	0,72	1,06	0,72	0	0
Vegetação Caatinga Arbustiva	53,3	36,4	59,3	40,48	6	4,08
Vegetação Caatinga Herbácea	51,1	34,9	46,74	31,91	-4,36	-2,99
Solo Exposto/Agricultura/Pecuária	40,2	27,44	38,61	26,35	-1,59	-1,09
Estrada	0,8	0,54	0,8	0,54	0	0
TOTAL	146,5	100	146,5	100	—	—

Fonte: O autor.

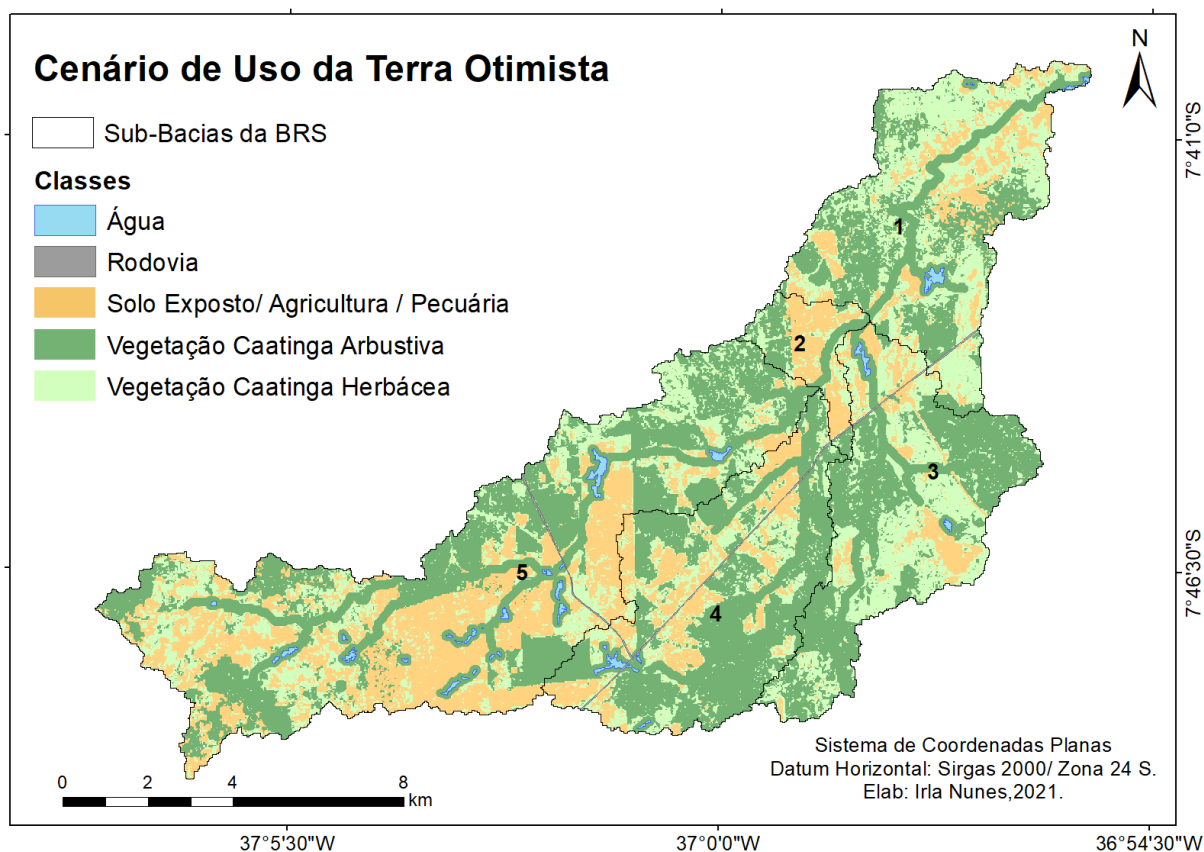
A espacialização do cenário otimista pode ser observada na figura 18, onde é visível o acréscimo da vegetação do tipo caatinga arbustiva em toda a bacia, sendo um total de 46 % de área só nessa classe. A região onde localiza-se a sub-bacia 2, tem o acréscimo de vegetação, mas ainda é bastante visível a classe de solo exposto/agricultura/pecuária, assim como em parte da sub-bacia 5. Em comparação ao de uso da terra de 2019, no cenário de uso da terra otimista ocorreu um crescimento de 9,6% na classe de vegetação de caatinga arbustiva, em detrimento do decréscimo das classes de vegetação de caatinga herbácea (-6,3%) e a classe de solo exposto/agricultura/pecuária (-3,3%). Como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Tabela com a Variação das classes entre os cenários de uso da terra 2019 e otimista

Classes	2019		Otimista		Variação	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Água	1,06	0,72	1,06	0,72	0	0
Vegetação Caatinga Arbustiva	53,3	36,4	67,4	46	14,1	9,6
Vegetação Caatinga Herbácea	51,1	34,9	41,93	28,6	-9,17	-6,3
Solo Exposto/Agricultura/Pecuária	40,2	27,44	35,38	24,14	-4,82	-3,3
Estrada	0,8	0,54	0,8	0,54	0	0
TOTAL	146,5	100	146,5	100	-	-

Fonte: O autor.

Figura 18-Mapa com o cenário de uso da terra otimista



Fonte: O autor.

Quanto ao cenário pessimista, ocorreu um crescimento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária de mais de 8% em detrimento do decréscimo de mais de 6% na classe de vegetação do tipo caatinga herbácea e de cerca de 2% da classe de vegetação do tipo caatinga arbustiva (Tabela.14), em comparação com o cenário de uso da terra regular. Sendo o total de porcentagem da classe de solo exposto/agricultura/pecuária 35,79%, um valor muito próximo do total da classe de vegetação do tipo caatinga arbustiva, que teve uma área de 34,35%.

Tabela 14-Tabela com a Variação das classes entre os cenários de uso da terra 2019 e pessimista

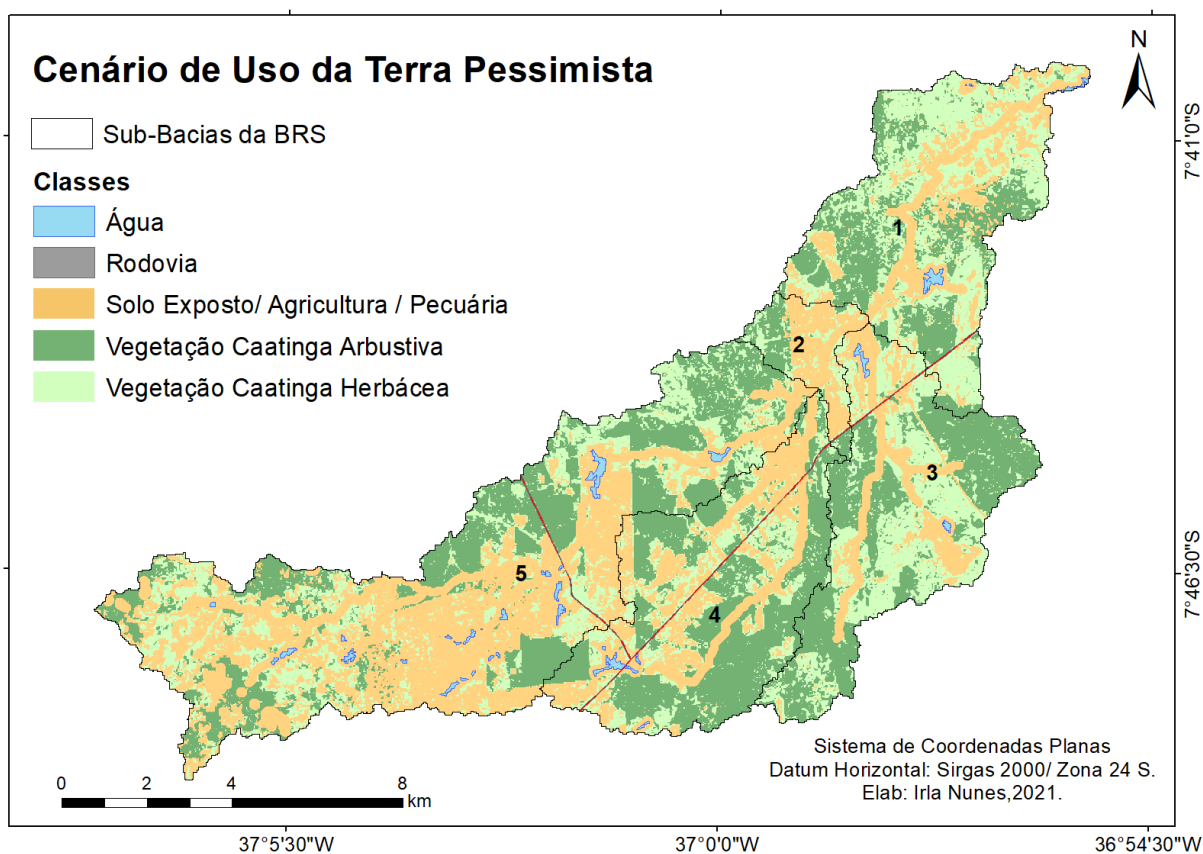
Classes	2019		Pessimista		Variação	
	Área (km²)	Área (%)	Área (km²)	Área (%)	Área (km²)	Área (%)
Água	1,06	0,72	1,06	0,72	0	0
Vegetação Caatinga Arbustiva	53,3	36,4	50,31	34,35	-2,99	-2,05
Vegetação Caatinga Herbácea	51,1	34,9	41,93	28,6	-9,17	-6,3

Classes	2019		Pessimista		Variação	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Solo Exposto/Agricultura/Pecuária	40,2	27,44	52,4	35,79	12,2	8,35
Estrada	0,8	0,54	0,8	0,54	0	0
TOTAL	146,5	100	146,5	100	–	–

Fonte: O autor.

Quanto a distribuição das classes no cenário de uso da terra pessimista, a classe de solo exposto/agricultura/pecuária pode ser visivelmente encontrada concentrada na porção central-oeste na bacia, onde ficam localizadas as sub-bacia 5, 4 e 3. Como pode ser observado com clareza na Figura 19.

Figura 19- Mapa com o cenário de uso da terra pessimista



Fonte: O autor.

4.6.2 Análise do Processo de Escoamento Superficial em diferentes Cenários de Uso da Terra e com Diferentes Cenários Climáticos

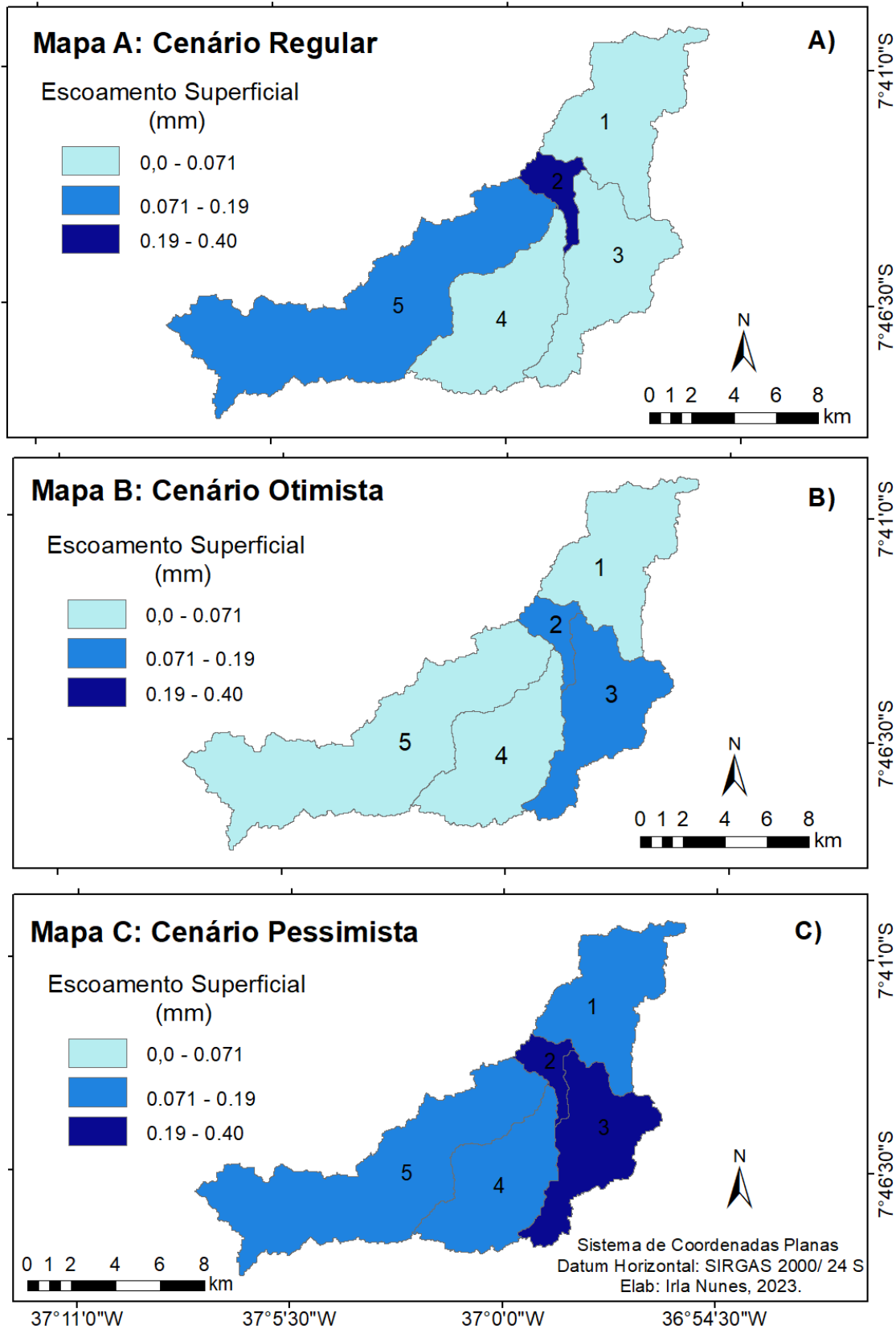
O processo de escoamento superficial com base nos cenários futuros, também variaram entre 0 e 0,4 mm. Na Figura 20 é possível observar a distribuição desse escoamento com base nos três cenários de uso da terra. O mapa A corresponde ao cenário de uso regular, o mapa B, ao cenário de uso otimista e o mapa C, ao cenário de uso pessimista e a projeção climática utilizada foi com base nas emissões de GEE intermediária (RCP 4.5). Com isso, é possível observar que entre os três mapas o que teve as maiores concentrações de escoamento foi no mapa C, sendo concentrado nas sub-bacias 2 e 3. A sub-bacia 2 foi onde teve uma maior concentração da classe de solo exposto/agricultura/pecuária.

No mapa A (cenário regular), a maior concentração também foi localizada na sub-bacia 2, com um escoamento de 0,19 a 0,40 mm e na sub-bacia 5, ficou concentrada na faixa entre os 0,071 e 0,19 mm. Em relação ao mapa B (cenário otimista), foi o que teve dentre os três mapas analisados a menor produção de escoamento superficial. Isso possivelmente ocorreu, devido ao crescimento da vegetação do tipo caatinga arbustiva. Onde, na sub-bacia que ocorreu o menor acréscimo de vegetação, a sub-bacia 2, foi onde teve a maior produção de escoamento superficial.

A Figura 21 mostra a espacialização do escoamento superficial usando os mesmos cenários de uso da terra, porém, com o cenário climático diferente. Para a realização desse produto foi utilizado o cenário climático com base no RCP.8.5 que tem as emissões de gases do efeito estufa mais altas e com isso, uma maior temperatura projetada e diminuição da precipitação. Devido a este fator é possível observar que, em comparação a figura 20, os valores de escoamento superficial diminuíram em todos os cenários de uso da terra.

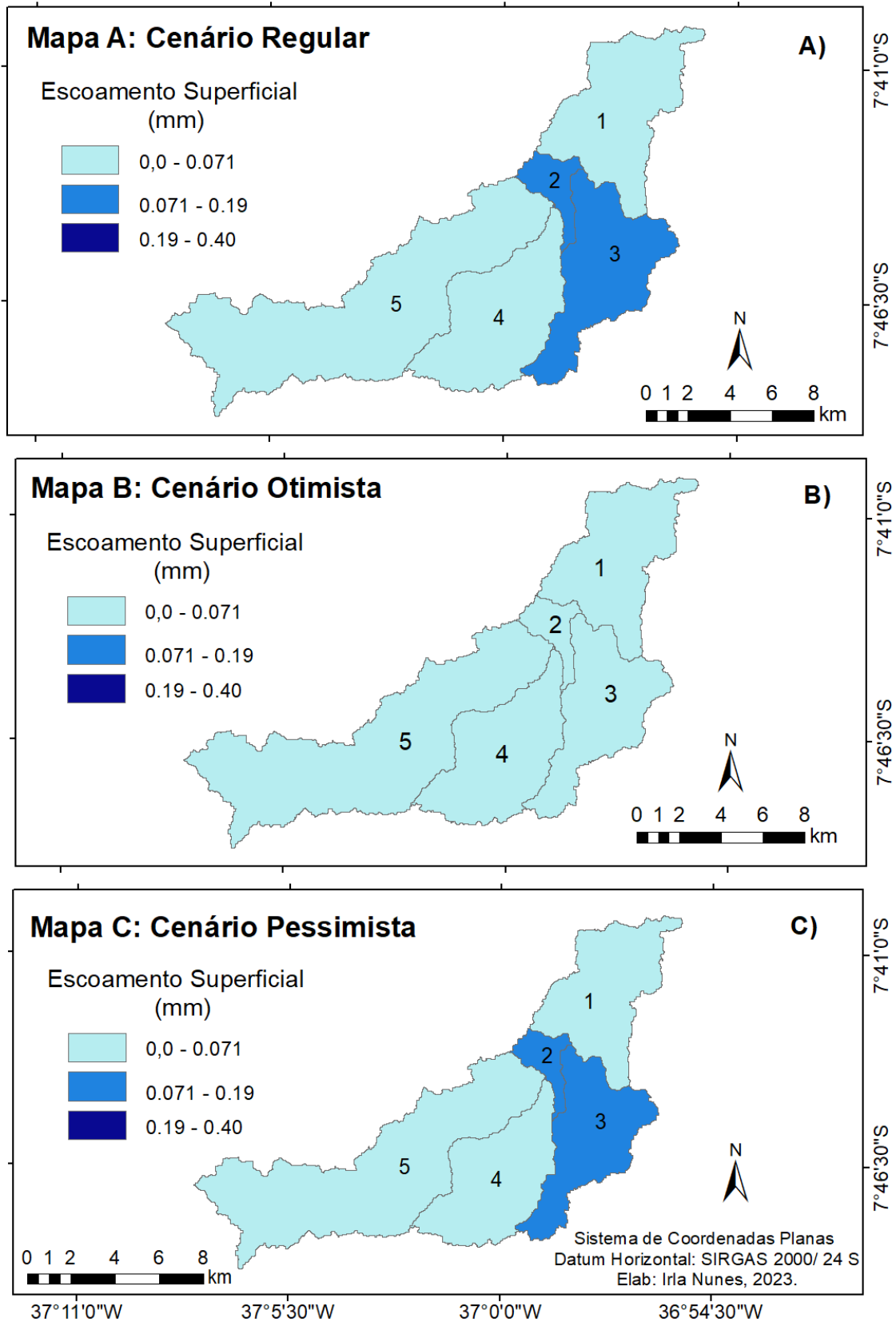
Onde, no mapa A (cenário regular) as maiores produções de escoamento superficial ficaram concentrados nas sub-bacias 2 e 3, que pertencem a faixa do 0,071 a 0,19mm. Já de acordo com o mapa B na figura 21, que corresponde ao cenário otimista, o escoamento teve a menor produção para as cinco sub-bacias, ficando concentrado na faixa de 0,0 a 0,071 mm. Quanto ao mapa C que representa o cenário pessimista, a distribuição do escoamento ficou igual a encontrada no mapa A. Sendo assim, mesmo com o crescimento da classe de solo exposto no cenário pessimista, devido à baixa precipitação, não ocorreu grandes alterações na dinâmica do escoamento superficial nos diferentes cenários de uso da terra.

Figura 20– Espacialização do escoamento superficial nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE intermediário (RCP 4.5)



Fonte: O autor.

Figura 21-Espacialização do escoamento superficial nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE altas (RCP.8.5)



Fonte: O autor.

4.6.3 Análise do Processo de Produção de Sedimentos em diferentes Cenários de uso da Terra e com Diferentes Cenários de Clima

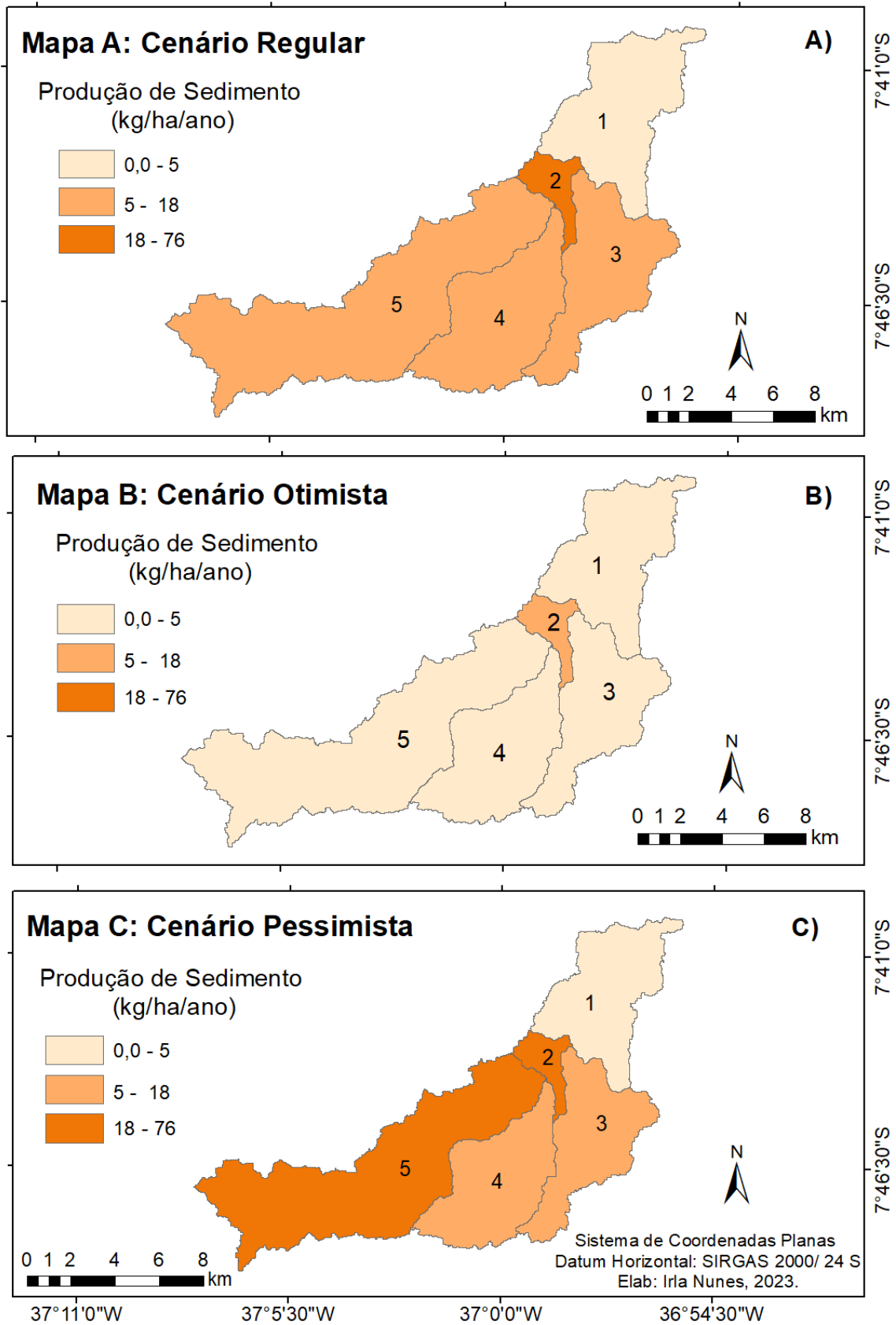
Para a análise da produção de sedimentos, foi feita seguindo o mesmo critério da análise do escoamento superficial. Com isso, inicialmente foi observado a produção de sedimentos nos três cenários hipotéticos de uso da terra (regular, otimista e pessimista) utilizando a projeção climática baseada nas emissões de GEE intermediárias (RCP 4.5), que pode ser visto na figura 22. Seguindo a análise, é demonstrado a espacialização da produção de sedimentos nos três cenários hipotéticos de uso da terra, mas utilizando a projeção climática baseada nas altas emissões de GEE (RCP 8.5), que pode ser observado na figura 23.

Sendo assim, a produção de sedimento variou de 0,0 a 76 kg/ha/ano. Onde, na Figura 22 e 23 o mapa A corresponde ao cenário de uso da terra regular, o mapa B ao cenário de uso da terra otimista e o mapa C, ao cenário de uso da terra pessimista.

Ao analisar os resultados da Figura 22, temos que a maior produção de sedimentos ficou concentrada no cenário pessimista (mapa C) e a menor produção no cenário otimista (mapa B), sendo a sub-bacia que mais produziu nos três cenários foi a sub-bacia 2, que ficou concentrada na faixa de produção entre 18 e 76 kg/ha/ano nos cenários regular (mapa A) e pessimista, e na faixa de 5 a 18 kg/ha/ano no cenário otimista. A sub-bacia 2, foi a que teve menor inserção de vegetação caatinga arbustiva.

As regiões de maior produção nos cenários de uso da terra que mais produziram (regular e pessimista), ficaram concentradas na porção Oeste-Central da bacia, região essa que concentra o tipo de solo do tipo Luvisolo crômico que é um tipo de solo mais propício a erosão.

Figura 22-Espacialização da produção de sedimento nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE baixo (RCP.4.5)

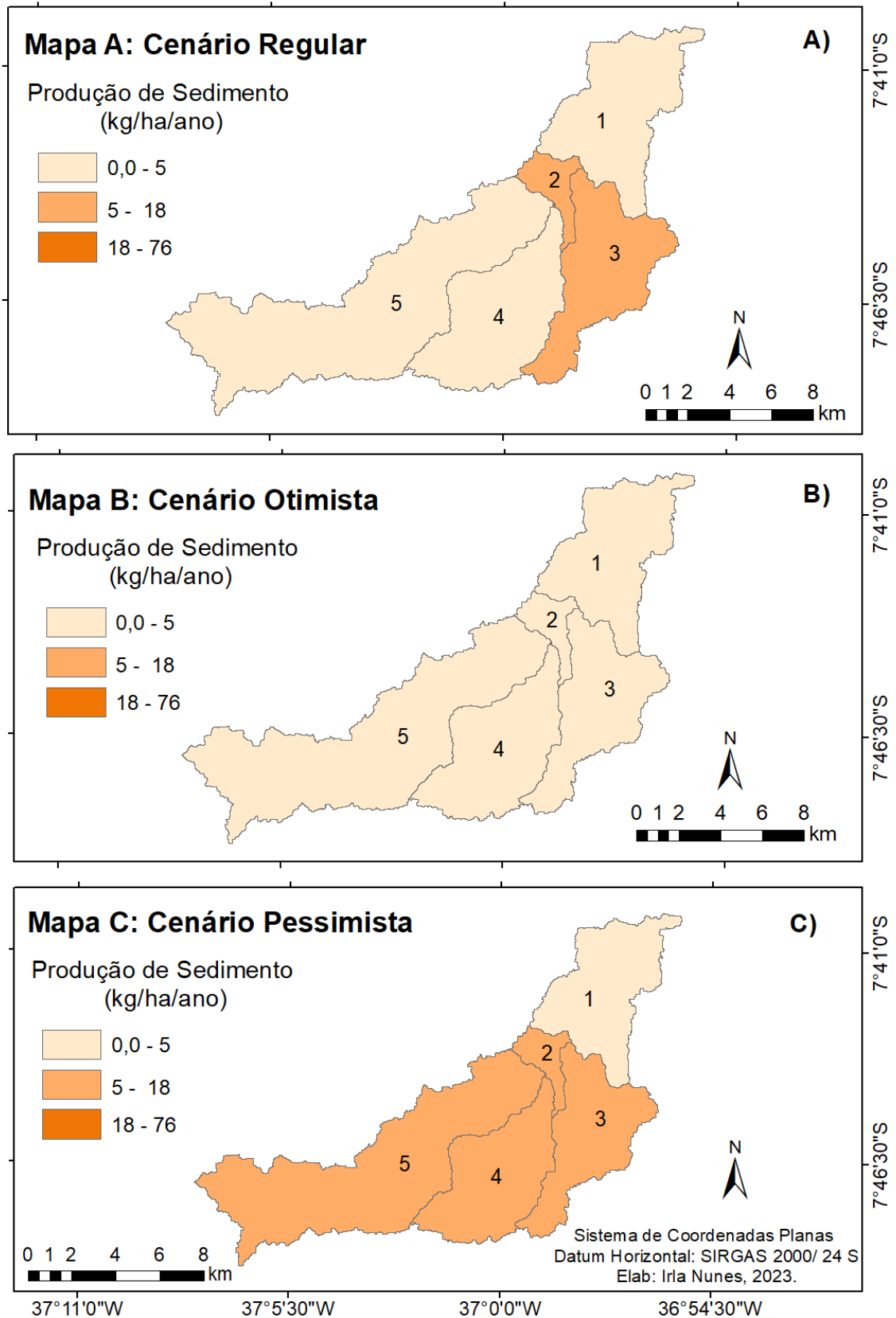


A Figura 23, demonstra a espacialização da produção de sedimento na BRS nos cenários de uso da terra hipotéticos, mas com projeções de emissões de gases de efeito estufa mais altas. Como aconteceu no escoamento superficial, a produção de sedimento que é diretamente influenciada pela precipitação, devido ter uma projeção de redução das chuvas a produção de sedimentos também foi reduzida.

Sendo assim, o cenário otimista (Mapa B) teve a menor produção, com todas as sub-bacias produzindo na faixa de 0 a 5 kg/ha/ano. O cenário regular (Mapa A) teve maiores produções nas sub-bacia 2 e 3, que produziram entre 5 e 18 kg/ha/ano. Já o cenário pessimista (Mapa C) teve as maiores produções dentre os três cenários e as sub-bacias que mais produziram foram a 2,3,5 e 4, bacias pertencentes as porções oeste-central da BRS. Como as tendências dos resultados anteriores.

Os resultados obtidos na simulação dos cenários futuros mostram o quanto a cobertura vegetal influencia na produção de sedimento e esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Alcântara et al. (2014), que avaliou a influência da cobertura vegetal sobre a produção de sedimentos em parcelas experimentais, na Bacia Experimental de Sumé e na Bacia de São João do Cariri. No estudo foi concluído que a produção de sedimentos foi menor nas áreas com cobertura vegetal do que nas áreas com desmatamento. Além de Henriques et al. (2017), que analisou os processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Taperoá-PB e concluiu que o uso da terra é um dos fatores preponderantes na ocorrência de maiores valões de escoamento superficial e de produção de sedimentos

Figura 23-Espacialização da produção de sedimento nos cenários futuros de uso da terra, de acordo com cenário climático com emissões dos GEE altas (RCP 8.5)



Fonte: O autor.

6. CONCLUSÃO

De acordo com o exposto, foi possível concluir que as realidades de uso da terra de 1984 a 2019 tiveram uma mudança significativa, especialmente na redução em cerca de 15% da área da classe de vegetação de caatinga do tipo arbustiva em detrimento do aumento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária. Essa mudança foi influenciada pelas ações antrópicas no decorrer do tempo. Também ocorreu uma diminuição da classe de água, possivelmente devido ao fenômeno da seca.

A calibração do modelo SWAT para a BRS se mostrou boa e satisfatória, com um resultado de R^2 de 0,66 e do coeficiente de eficiência (COE) de 0,59. Esses resultados demonstraram um bom ajuste do modelo para as simulações.

Na avaliação do escoamento superficial para as realidades de uso histórico e atual, ocorreu um crescimento do escoamento superficial principalmente nas sub-bacias localizadas na porção oeste-central da bacia, assim como ocorreu na produção de sedimento que teve um crescimento nas sub-bacia localizadas na porção oeste-central da bacia. Nessa região, foi onde ocorreu a mudança de uso da terra com o crescimento da classe de solo exposto/agricultura/pecuária em contrapartida da redução da classe de vegetação do tipo caatinga arbustiva. Além de que, nessa porção oeste-central é onde se concentra o tipo do solo luvisolo crômico que é mais susceptível a erosão. Com isso, podemos concluir que a vegetação caatinga arbustiva e o tipo de solo influenciou diretamente o escoamento superficial e produção de sedimentos.

Quanto aos cenários hipotéticos de uso da terra futuro (regular, otimista e pessimista), no cenário regular houve um crescimento de 4,08 da classe de vegetação do tipo caatinga arbustiva e um decréscimo de apenas 1,09% na classe de solo exposto/agricultura/pecuária. Com isso, mesmo com a manipulação das classes as regiões oeste-central da BRS permaneceram com uma expressiva quantidade de solo exposto/agricultura/pecuária.

Em relação ao cenário de uso da terra otimista, ocorreu um crescimento de 9,6% da classe de vegetação de caatinga arbustiva em detrimento do decréscimo de 3,9 da classe de solo exposto/agricultura/pecuária. No cenário pessimista, a classe de solo exposto/agricultura/pecuária foi intensificada, com um crescimento de mais de 8%.

Os resultados de simulações futuras, demonstraram que o modelo foi sensível as alterações de mudança de uso da terra e de cenários do clima. Fazendo com que os resultados de escoamento superficial e de produção de sedimentos fossem afetados pelas alterações. Onde, os cenários que tiveram maiores concentrações de vegetação do tipo caatinga arbustiva tiveram uma menor produção de sedimento e assim, por consequência, os cenários que tiveram as maiores concentrações de classe de solo exposto/agricultura/pecuária, tiveram as maiores produções de sedimentos. E em relação ao cenário de clima, as simulações com as emissões de GEE altas (RCP 8.5) tiveram uma menor quantidade de escoamento superficial e de produção de sedimentos por ter temperaturas mais elevadas e chuvas com menor volume em comparação as simulações com cenário de clima com nível de emissões de GEE intermediárias.

Por fim, esse trabalho demonstra que SWAT é uma importante ferramenta de avaliação e análise do passado, do presente e para o planejamento do futuro. Além de permitir um melhor entendimento da dinâmica da bacia estudada.

7. REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Sertões e Sertanejos: uma geografia humana sofrida. **Revista Estudos Avançados**. Dossiê Nordeste seco. São Paulo, v. 13, n. 36, p. 1-59, ago. 1999.

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, 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*, [S.L.], v. 333, n. 2-4, p. 413-430, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, p. 1-100, 2012.

ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, jul/set. 2013.

AESA – Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>. Acesso em: junho de 2020.

ALCÂNTARA, H. M; GALVÃO, C. O; SRINIVISAN, V. S.; RAMOS, J. G.; MARTINS, R. G.; LEÃO, H. T.; Avaliação da influência da cobertura vegetal sobre a produção de sedimentos em parcelas experimentais no semiárido. **ABRH, XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos- ENES**, 2014, João Pessoa. Disponível em:

https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/36e98e2b96acb4916669333b40455139_0f0a a31b22e67a56b4bd0722089d401b.pdf . Acesso em dezembro 2021.

ALMEIDA, E. De. P. C.; ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC). **Luvissolo Crômico**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn230xh m02wx5ok0liq1mqv181o7y.html. Acesso em: janeiro de 2021.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, M. P. de.; RIBEIRO, C. B. de. M. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. **RBRH** [online]. 2020, v. 25. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034> .Acesso em: maio 2021. Epub. 31 Jan 2020. ISSN 2318-0331. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>.

ARAÚJO, D. C. dos S. **Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano**. 2016. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, 2016.

ARAÚJO FILHO, J. A. de. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Projeto Dom Helder Camara. 1º Ed. Recife: Editora Cidade Gráfica, 2013. 200 p.

ARAÚJO, J. C. de. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. da S.; MEDEIROS, S. de S.; GALVÃO, C. de O. *Recursos Hídricos Em Regiões Semiáridas: estudos e aplicações*. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido/Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Cap. 2. p. 1-282. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/handle/1/932>. Acesso em: 5 mar. 2021.

ASA – Articulação do Semiárido Brasileiro. **Semiárido**. 2020. Disponível em: <https://www.asabrasil.org.br/semiariado>. Acesso em: novembro de 2020.

BARRIUS, F. M. C. *Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica andina sob cenários de mudanças climáticas*. 2013. 174 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-A7LJJ8>. Acesso em: 06 jul. 2021.

BECKER, F. G. Aplicações de Sistemas de Informação Geográfica em Ecologia e Manejo de Bacias Hidrográficas. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (ed.). *Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações*. Ilhéus, Ba: Editus, 2002. p. 91-110. Disponível em: http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 06 ago. 2020.

BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global. Esboço Metodológico. **Revista RAEGA- O Espaço Geográfico em Análise**, v. 8, dez. 2004. ISSN 2177-2738. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3389/2718>. Acesso em: 20 ago. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v8i0.3389>.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universitária da UFRGS/ABRH, 2014, p. 915-943.

BRAGA, A. C. F. Medeiros; SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. de 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*, Amsterdam, v. 498, p. 46-58, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413004423?via%3Dihub>. Acesso em: 05 maio 2021.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997: **Política Nacional De Recursos Hídricos**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM. Acesso em janeiro de 2021.

BRASIL. Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre o Novo Código Florestal Brasileiro**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: janeiro de 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **A Questão da Água no Nordeste**. Brasília, DF: CGEE/ANA, 2012. 432 p.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 8, n. 3, 2015. Disponível em: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765/pdf>. Acesso em: 03 outubro 2020.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH (online)*, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 53-64, 25 fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p53-64>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/4hb9MGW9LGxnmxZHxLmbt5C/?lang=pt#>. Acesso em: 13 jun. 2021.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the Relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.31, n.2, p. 159-166,1984

CADIER, E.; FREITAS, B. J. de. **Bacia Representativa do Sumé**: primeira estimativa dos recursos de água. Recife: SUDENE, 1982. p.1-195. 1982

CALASANS A. R. N; LEVY M. T. C; MOREAU M. Interrelações Entre Clima e Vazão. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (ed.). *Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações*. Ilhéus, Ba: Editus, 2002. p. 67-90. Disponível em: http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 06 ago. 2020.

CARVALHO NETO, J. G. de. Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT. 2011. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/12011>. Acesso em 08 de maio de 2021.

CGEE- Centro de Gestão de Recursos Estratégicos. **Fundamentos conceituais:** Mudanças climáticas e adaptação no setor de recursos hídricos, Fortaleza-CE: CGEE/ANA. p.1-125, 2014. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/portais/MudancasClimaticas_FundamentosConceituais.pdf. Acesso em: 07 de julho de 2021.

CGEE- Centro de Gestão de Recursos Estratégicos. **Manual de capacitação sobre mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).** Brasília, DF: CGEE. p.1-270, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Manual+CPMDL_CD_9566.pdf. Acesso em: 07 de julho de 2021.

CHOU, S.C, LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G., NOBRE, P. and MARENGO, J. (2014a) Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454. 2014a.

CHOU, S.C, LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G. and MARENGO, J. (2014b) Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 3, 512-527. 2014b.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, p. 1-256. 1999.

CHRISTOFOLETTI, A. As características da nova geografia. In: CHRISTOFOLETTI, Antônio. (Org.) **Perspectivas da Geografia**. São Paulo: Difel, p. 71-101. 1982.

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, 2015, p.816-827. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9033>. Acesso em: outubro de 2020.

GRAU-NETO, W. **O Protocolo de Quioto e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: uma análise crítica do instituto**. São Paulo: Fiúza, p.1-238. 2007.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Erosão dos solos. In: GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. **Soil erosion and conservation in Brazil**. Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ. v.37, p. 81–91, 2014.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Erosão dos solos. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. 5 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 181 – 227. 2009.

GUIMARÃES, R. C. Capítulo 1 – Ciclo Hidrológico. *In*: GUIMARÃES, R. C., SHAHIDIAN, S. E RODRIGUES, C. M. **Hidrologia Agrícola**. 2ª Ed. Évora. Editoras: Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora e Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, p. 1-4. 2017.

HENRIQUES, I. G. N.; SILVA, R.M. da; SILVA, L.P., 2017. Análise espacial de processos hidrosedimentológicos na bacia do rio Taperoá-PB. *In*: **XVII Simpósio Brasileiro de geografia física aplicada e I Congresso Nacional de geografia física na fronteira do conhecimento**. UNICAMP-Campinas-SP. ISBN: 97885853693, 5158-5169.

HEMPEL, S.; FRIELER, K.; WARSZAWSKI, L.; SCHEWE, J.; PIONTEK, F. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 219-236, 31 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>. Disponível em: <https://esd.copernicus.org/articles/4/219/2013/esd-4-219-2013.html>. Acesso em: 07 maio 2021.

IBGE -Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021 Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/pesquisa/18/16459>>. Acesso: em dezembro 2021

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Definição de semiárido**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-%20semiario-brasileiro.html?=&t=o-que-e> . Acesso em: novembro de 2020.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**, [S.L.], 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: julho de 2020.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Orçamentos Familiares - POF 2002/2003**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/pesquisa/18/16459>>. Acesso: em dezembro 2021.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária Municipal 2020**; Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/pesquisa/18/16459>>. Acesso em dezembro 2021.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/pesquisa/18/16459>>. Acesso em dezembro 2021.

INMET- **Instituto Nacional de Meteorologia. Dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: julho de 2020.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The physical science basis**. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Stockholm, 2013.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JACOMINE, P. K.T.; **A Nova Classificação Brasileira de Solos**, Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, Recife, vols. V e VI p.161-179, 2008-2009. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/19350/1/Jacomine.pdf>>. Acesso em: janeiro, 2021.

LEPRUN, J. C. **A erosão, a conservação e o manejo do solo do Nordeste brasileiro**: Balanço diagnóstico e novas linhas de pesquisa. Recife, SUDENE/ORSTOM, p. 1-107. 1981.

LIERSCH, S. **The Programs dew.exe and dew02.exe**: User's Manual. Berlin, 2003a.

LIERSCH, S. **The Program pcSTAT**: User's Manual. Berlin, 2003b.

LORANDI, R.; CANÇADO, C. J. Parâmetros Físicos para Gerenciamento de Bacias Hidrográficas. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (ed.). **Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus, Ba: Editus, 2002. p. 37-65. Disponível em: http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 07 ago. 2020.

LYRA, A; TAVARES, P; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 18 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z#citeas>. Acesso em: 13 maio de 2021.

MARCELINO, L. **Transporte De Sedimentos Em Suspensão Nos Rios Catarinenses**. 2009. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124332/42.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 ago. 2020.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-2015 no Semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 1, p. 49-54, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/marengoetal.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2021.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and

regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River Basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A. O quarto relatório do IPCC (IPCC AR4) e projeções de mudança de clima para o Brasil e América do Sul. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 23-28, 2007.

MARENGO, J. A. *et al.* **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas, v. 1, Campina Grande- PB: INSA, p. 1-40. 2011.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

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, 2017.

MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R.; HARDIMAN, S.C. et al. The Had-GEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, n. 4, p. 723- 757, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/230706683_The_HadGEM2_family_of_Met_Office_Unified_Model_Climate_configurations> . Acesso em: dezembro de 2021.

MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I. An upgraded version of the Eta model. *Meteorology And Atmospheric Physics*, [S.L.], v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 26 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-012-0182-z#citeas>. Acesso em: 06 jun. 2021.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo Hidrológico Planetário: Abordagens e Conceitos. **Revista Geo**, UERJ, v. 1, n. 21, p.109-119. 2010. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/viewFile/1461/1226>. Acesso em: 20 de jul. 2021.

MMA - Ministério Do Meio Ambiente, Dos Recursos Hídricos E Da Amazônia Legal. **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 2010.

MMA - Ministério Do Meio Ambiente. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite (monitoramento do Bioma Caatinga) - 2008 e 2009**. Disponível em:http://siscom.ibama.gov.br/monitora_biomas/PMDBBS%20-%20CAATINGA.html Acesso em: 06 de outubro de 2020.

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

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2011, 647p.

NODA, F. S. dos. S. **Avaliação do modelo Soil and Water Assessment tool (SWAT) na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu**. 2018. 115p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2018.

NOBRE, C. A., MARENGO, J. A.; **Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar**. Bauru, Brasil: Canal 6 Editora. 2017. 609 p.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S.; ARAUJO, R. C. Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**. Itapetininga, v.5, n.3, p. 60-83, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 417-424, 2009.

PAIVA, J. B. D. de.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625 p.

PIRES, J. S.; SANTOS, J. E. dos; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (ed.). *Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações*. Ilhéus, Ba: Editus, 2002. p. 17-35. Disponível em: http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 07 ago. 2020.

PISSARRA, T. C.; GALBIATTI, J. A.; BORGES, M. J.; ROSALEN, D.; IHA, D. (2005). Avaliação por fotointerpretação do uso/ocupação do solo e erosão acelerada em microbacias hidrográficas utilizando sistemas de informação geográfica. In **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia-GO, 2005, v. 12, p. 2331-2337.

PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Índice de desenvolvimento Humano dos Municípios. 2010. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idhm-municipios-2010.html>. Acessado em: fevereiro de 2022.

PTDRS- **Plano Territorial De Desenvolvimento Rural Sustentável**, 2011. Disponível em: http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_territorio159.pdf. Acesso em outubro de 2020.

SÁ, I.B.; CUNHA, T.J.F.; TEIXEIRA, A.H.C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND, M.A. **Processo de desertificação no semiárido brasileiro**. In: SÁ, I.B.; SILVA, P.C.G. (Orgs.). *Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina-PE: Embrapa semiárido, 2010. p.125-158. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/861927/processos-de-desertificacao-no-semiarido-brasileiro>. Acesso em: julho de 2021.

SANTANA, A. S.; SANTOS, G. R. Impactos da seca de 2012-2017 na região semiárida do Nordeste: notas sobre a abordagem de dados quantitativos e conclusões qualitativas. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)**, Brasília, DF, v. 22, p. 119-129, 2020.

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

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC). **Argissolo Vermelho-Amarelo**. [s.l.]. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn0pzmhe02wx5ok0liq1mqk4130gy.html. Acesso: janeiro de 2021.

SANTOS, J. T. S. dos.; NUNES, H. G. G. C.; PONTES, A. K. dos. S.; SOUSA, A. M. L. de. O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA. **REGA**, Porto Alegre, v. 15, e3, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1062/1/O%20Modelo%20SWAT%20como%20Ferramenta%20para..pdf>> . Acesso em: fevereiro de 2022.

SANTOS, J. Y. G. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; SILVA, R. M. ; SANTOS, C. A. G. ; QUINN, N. W. ; XAVIER, A. P. C. ; RIBEIRO NETO, A. Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic Forest ecotone of Brazil. **Catena**, v. 202, p. 558-578, 2021.

SCHMIDT, D. M.; MATTOS, A. Dinâmica dos regimes de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do Alto Piranhas-Açu / PB. **Revista Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 67-77, jul./dez. 2013.

SERRÃO, E. A. de O. Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas-PA. 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2018.

SILVA, A. M. Análise de múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do rio salgado, semiárido nordestino. 2019. 113p. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa- PB. 2019. Disponível em https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/20008?locale=pt_BR. Acesso em: fevereiro de 2022.

SILVA, A. M. ; SILVA, R. M. ; SANTOS, C. A. G. . Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 79, p. 1-11, 2019.

SILVA, R. M.; HENRIQUES, I. G. N. ; SILVA, J. F. C. B. C. . Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma caatinga. **Revista De Geografia (Recife)**, v. 35, p. 158-179, 2018.

SILVEIRA, A. L.L. Ciclo Hidrológico e a bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 2ª edição, Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, p. 35-51, 2001.

SILVEIRA, A. L.L.; LOUZANA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 2ª edição, Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, p. 335-372, 2001.

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

SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. **Bacia experimental de Sumé: Descrição e dados coletados**. Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande/CNPq, 2003.

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 in China Series E Technological Sciences**, v. 52, n. 11, 2009.

STEVANUX, J.C.; LATRUBESSE, E.M. **Geomorfologia Fluvial**. 1ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SUDENE- Superintendência de Desenvolvimento Regional. **Resolução Condel/Sudene Nº 150, de 13 de dezembro de 2021**. Dispõe da delimitação do Semiárido Brasileiro. 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-condel-sudene-n-150-de-13-de-dezembro-de-2021-370970623>>. Acesso em: março de 2022.

TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Áreas e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da Caatinga**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, p.1- 382, 2004.

TAVEIRA, I. M. L. de M. **Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação hidrossedimentológica da Bacia Representativa de Sumé com o modelo SWAT**. 158 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

TAVEIRA, B. D. de A.; SANTOS, I. dos. Avaliação do efeito de mudanças climáticas na vazão e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, Serra do Mar Paranaense. **Rev. Boletim de Geografia**, Maringá, v. 37, n. 2, p. 29-42, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/irla/Downloads/35607-Texto%20do%20artigo-751375196108-1-10-20200428.pdf> . Acesso em: fevereiro de 2022.

TUCCI, C.E.M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª edição, Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, p. 243-252, 2001a.

TUCCI, C.E.M. Fundamentos do escoamento não permanente. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª edição, Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, p. 373-390, 2001b.

VAGHEFI, SAEID ASHRAF et al. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions–Case study: California-Baja California Peninsula. **Environmental modelling & software**, v. 96, p. 181-198, 2017.

VEITH T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.

VIANA, J. F. DE S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DA SILVA, B. B.; DA SILVA, R. M.; SRINIVASAN, R.; SANTOS, C. A. G.; ARAUJO, D. C. DOS S; TAVARES, C. G. . Evaluation of gridded meteorological datasets and their potential hydrological application to a humid area with scarce data for Pirapama River basin, Northeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 145, p. 393-410, 2021.

ZANELLA, M.E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n.36, pp.126-142, 2014.

Apêndice (A): Dados utilizados no Gerador Climático – WGEN

Variáveis	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	29,4	29,4	30,4	29,4	26,8	25,7	25,7	28,3	30,1	31,1	31,6	31,4
TMPMN	18,3	19,3	19,4	19,1	18,3	17	16,4	15,8	16,5	16,5	18	19,2
TMPSTD MX	0,47	0,52	0,41	0,35	0,47	0,4	0,43	0,31	0,34	0,34	0,37	0,4
TMPSTD MN	0,405	0,357	0,327	0,348	0,401	0,511	0,467	0,472	0,427	0,399	0,319	0,317
PCPMM	67,07	62,11	100,97	86,95	72,4	41,04	27,64	12,8	4,6	6,86	7,92	40,3
PCPSTD	8,577	7,7916	9,346	7,935	5,109	3,825	2,021	2,615	1,996	2,772	14,471	8,072
PCPSKW	5,221	4,925	5,289	5,146	4,887	6,1499	7,933	6,506	24,572	10,614	14,48	8,1
PR_W1	0,0861	0,1267	0,1327	0,150	0,1436	0,1331	0,1139	0,06	0,0249	0,0165	0,0217	0,0469
PR_W2	0,4222	0,33	0,4898	0,408	0,2881	0,2308	0,1294	0,1633	0	0,2143	0,125	0,2381
PCPD	4,09	4,55	6,68	6,45	5,36	4,73	3,86	2,23	0,77	0,64	0,73	1,91
RAINHH MX	10,09	10,13	13,75	11,92	13,47	6,08	5,867	3,002	1,658	2,268	2,61	9,591
SOLARA V	23,31	24,67	25,03	23,04	19,41	18,07	18,34	21,28	23,6	25,36	25,73	25,52
DEWPT	19,62	15,07	18,64	12,09	10,44	9,36	10,67	10,04	13,66	15,9	16,97	16,79
WNDVAV	3,8	3,4	3,9	3,7	3,2	3	2,5	2,4	2,4	2,5	2,5	2,9

Fonte: INMET, 2020.

Apêndice (B): Valores dos parâmetros de calibração

Parâmetros de solo	Valores dos parâmetros	Intervalos mínimo e máximos
Alpha_Bf	0,843	0 – 1
Biomix	0,239	0 – 1
Canmx	2,261	2 – 5
Cn2	0,061	-0 – 0,1
Ch_K2	2,405	0 – 5
Ch_N2	0,2745	0 – 0,3
Epco	0,539	0 – 1
Esco	0,7025	0,5 – 1
Gw_revap	0,17678	0,02 – 0,2
Revapmn	2,45	0 – 10
Slsubbsn	0,15	-0,25 – 0,25
Sol_Alb	-0,11	-0,25 – 0,25
Sol_Awc	0,006	-0,25 – 0,25
Sol_K	0,15	-0,25 – 0,25
Sol_Z	0,17	-0,25 – 0,25
Surlag	10,056	0 – 24

Fonte: O autor.