

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

BRUNA DANIELA DE ARAUJO TAVEIRA

**PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA, SERRA DO MAR
PARANAENSE**

CURITIBA

2016

BRUNA DANIELA DE ARAUJO TAVEIRA

**PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA, SERRA DO MAR
PARANAENSE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia, no Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Irani dos Santos

Curitiba
2016

T232p

Taveira, Bruna Daniela de Araujo
Processos hidrossedimentológicos em cenários climáticos na bacia
hidrográfica do rio Nhundiaquara, serra do mar paranaense / Bruna Daniela
de Araujo Taveira. – Curitiba, 2016.
96 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2016.

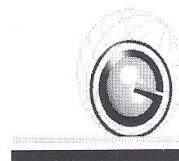
Orientador: Irani dos Santos .
Bibliografia: p. 87-96.

1. Precipitação (Meteorologia) – Variabilidade 2. Vazão – Medidores. 2.
Mudanças climáticas. 3. Variações climáticas. I. Universidade Federal do
Paraná. II.Santos, Irani dos. III. Título.

CDD: 551.577



MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte e um dias do mês de março do ano de dois mil e dezesseis, na sala CT15, foi avaliada pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo relacionados, a Dissertação de Mestrado da aluna **BRUNA DANIELA DE ARAUJO TAVEIRA** intitulada “**PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA, SERRA DO MAR PARANAENSE**” que obteve como resultado final: APROVADO.

(RES. 65/09 CEPE Art. 69. Os examinadores avaliarão a dissertação ou a tese considerando o conteúdo, a forma, a redação, a apresentação e a defesa do trabalho, decidindo pela aprovação, ou reprovação do trabalho de conclusão do aluno.

Parágrafo único. A ata da sessão pública da defesa de dissertação ou tese indicará apenas a condição de aprovado ou reprovado.

OBS: este documento tem a validade de 60 dias a contar desta data.

Nome e assinatura da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Irani dos Santos - orientador

Prof. Dr. Francisco de Assis Mendonça - PPGGEO/UFPR

Prof. Dr. Jorge Luis Moretti - PPG Ciências do Solo / UFPR

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho, em especial:

Ao meu professor e orientador Irani dos Santos, pela dedicação na orientação deste trabalho, pela credibilidade e confiança prestadas a mim, e especialmente pelo incentivo à pesquisa.

Aos professores Dr. Jorge Luis Moretti, Dr. Eduardo Vedor de Paula e Dr. Francisco de Assis Mendonça pelos apontamentos que contribuíram para a melhor qualidade deste trabalho.

À secretária da pós-graduação em Geografia, Adriana, pela prestatividade e boa vontade em auxiliar nos momentos burocráticos.

À equipe do Laboratório de Hidrogeomorfologia: Ana Sanches, Cesar, Rodrigo Osternack, Rodrigo Marcos, Fernando, Gilson, Manoella, Gustavo, Daniel e Marcelo, pelos bons momentos compartilhados, pela troca de experiências e pelo auxílio prestado em momentos de dificuldades.

Aos amigos que conheci nos últimos anos: Thiago, Monyra, Karen e Isa, por compartilhar desde os momentos alegres até os mais desesperadores, tornando este período muito mais leve e agradável.

Aos meus pais, Sirlei e Renir, pelo apoio e incentivo.

Ao meu companheiro de todos os dias, Ricardo, pela paciência, carinho e apoio incondicional.

À CAPES pelo financiamento da pesquisa.

Tão bem, conforme. O senhor ouvia, eu lhe dizia: o ruim com o ruim, terminam por as espinheiras se quebrar – Deus espera essa ganância. Moço!: Deus é paciência. O contrário, é o diabo. Se gasteja. O senhor rela faca em faca – e afia – que se raspam. Até as pedras do fundo, uma dá na outra, vão-se arredondinando lisas, que o riachinho rola. Por enquanto, que eu penso, tudo quanto há, neste mundo, é porque se merece e carece. Antesmente preciso. Deus não se comparece com refe, não arrocha o regulamento. Pra quê? Deixa: bobo com bobo – um dia, algum estala e aprende: esperta. Só que, às vezes, por mais auxiliar, Deus espalha, no meio, um pingado de pimenta...

(João Guimarães Rosa – Grande Sertão: Veredas)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do cenário climático RCP 8.5 (IPCC, 2013) na vazão líquida e sólida nas condições ambientais da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, localizada na região da serra do mar paranaense. Para avaliar o impacto do cenário climático foi utilizado o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O cenário climático RCP 8.5 caracteriza-se pela projeção de alta emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e do aumento da temperatura média em até 4,5°C até o final do século XXI. O efeito do cenário climático no ciclo hidrossedimentológico foi avaliado em dois períodos: futuro próximo (2060 a 2080) e futuro distante (2080 a 2100). As variáveis climáticas do cenário foram comparadas com a série histórica observada entre 1994 e 2014. O modelo SWAT foi calibrado e validado para esse mesmo período das séries observadas e aplicado para os períodos futuros. Os dados climáticos relativos ao cenário RCP8.5 apontam aumento da temperatura mínima e máxima (20,6% e 6,3%) respectivamente, e a redução de 15% na altura de precipitação. Além disso indicam mudanças na frequência e volume das chuvas, que se caracterizam por ser menores e mais frequentes no cenário do que na série histórica. Os resultados apontaram que o modelo, devidamente calibrado, representa satisfatoriamente os componentes do ciclo hidrológico na bacia, apresentando índices de eficiência NSE, PBIAS e RSR satisfatórios. A resposta da bacia hidrográfica ao cenário climático RCP 8.5 foi a redução na vazão de até 25%, da vazão sólida em até 20% e na evapotranspiração em até 20%. De maneira geral os resultados apontam que a redução na vazão e na evapotranspiração está associada às mudanças na intensidade e frequência da precipitação, mais do que ao aumento da temperatura. Os resultados mostram ainda que a distribuição da vazão líquida é influenciada fortemente pelo relevo enquanto que a heterogeneidade do transporte de sedimentos é condicionada pela presença de vegetação de floresta.

Palavras-chave: Cenários climáticos, Vazão, Transporte de sedimentos, SWAT.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the effect of the climate scenario RCP 8.5 (IPCC, 2013) in liquid and solid flow under the environmental conditions of the Nhundiaquara river basin. The study of the evaluation of the impact from climate scenarios has great relevance, because, the climate promotes the initial moisture and energy that controls the water balance in a river basin, and with it, has great influence about the components of the hydrological cycle. Thus, the variability in the climatic system has the potential to cause effect on the discharge and on the sediments formation. The knowledge of those effects is of paramount importance for activities of planning and management in river basins, as well as for scientific contribution concerning the topic. To assess the effect from the variability over climatic factors about the liquid and solid flow of the Nhundiaquara river basin was used the hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Firstly has been determined the efficiency of the model on simulate the historic condition from the liquid and solid flow on the river basin between 1994 and 2014, to then, simulate the process under the influence of the climatic scenario. The climatic scenario, RCP 8.5, is characterized through the projection of high emission of the greenhouse gases in the atmosphere and the increase of the average temperature, in up to 4,5°C until the end of the XXI century. In this work, its effect on the hydrosedimentological cycle was valued in two future periods: near future – 2060 to 2080 and distant future – 2080 to 2100. The results pointed that the model, properly calibrated, satisfactorily represents the components of the hydrological cycle in the basin, presenting satisfactory efficiency indices NSE, PBIAS and RSR. The result of climate variability between the RCP 8.5 scenario and the historic series measured in the Nhundiaquara river basin, point reduction of 15% in the volume of precipitation, besides changes in the distribution of the frequency and intensity of the rain, which is characterized by being less intense and more frequent in the scenario than the historic series. The variability in the temperature, show increased up to 20% at the minimum temperature, and up to 6% at the maximum temperature, until the end of the XXI century. These modifications are responsible for reducing the flow in the near and distant future up to 25% respectively; in solid flow the reduction is up to 20% for the two periods respectively. Overall the results indicate that the reduction in the flow and evapotranspiration is more related to the reduce on precipitation then the increase of temperature. Furthermore, the results point that the distribution on flow is highly influenced by relieve, and heterogeneity of sediment transport in the basin, is affected by the forest.

Keywords: Climate Scenarios, Flow, Sediment Transport, SWAT.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DOS CENÁRIOS APRESENTADOS NO SRES..... | 24 |
| FIGURA 2 - ESQUEMA INTERATIVO ENTRE TEORIA, MONITORAMENTO E MODELAGEM..... | 30 |
| FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DO MODELO SWAT..... | 34 |
| FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 37 |
| FIGURA 5 - PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DO MODELO SWAT | 39 |
| FIGURA 6 - MODELO DIGITAL DO TERRENO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 40 |
| FIGURA 7 - USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 41 |
| FIGURA 8 - TIPO DE SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 42 |
| FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E METEOROLÓGICAS | 48 |
| FIGURA 10 - CURVA DUPLO-ACUMULATIVA ENTRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS MANANCIAIS DA SERRA E SÃO JOÃO DA GRACIOSA | 49 |
| FIGURA 11 - CURVA DUPLO-ACUMULATIVA ENTRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS VÉU DE NOIVA E MANANCIAIS DA SERRA | 50 |
| FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 51 |
| FIGURA 13 - ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA MORRETES, BACIA DO RIO NHUNDIAQUARA. | 53 |
| FIGURA 14 - CURVA DE DESCARGA SÓLIDA DA ESTAÇÃO MORRETES (82170000) | 54 |
| FIGURA 15 - SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 55 |
| FIGURA 16 - SAZONALIDADE DA TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA (1994-2014) E NO CENÁRIO FUTURO RCP 8.5 PRÓXIMO (2060-2080) E DISTANTE (2080-2100) | 62 |
| FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA MENSAL PARA O CENÁRIO RCP 8.5 E PERÍODO DE REFERÊNCIA | 63 |
| FIGURA 18 - SAZONALIDADE DA TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA (1994-2014) E NO CENÁRIO FUTURO RCP 8.5 PRÓXIMO (2060-2080) E DISTANTE (2080-2100). | 64 |
| FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA MENSAL PARA O CENÁRIO RCP 8.5 E PERÍODO DE REFERÊNCIA | 65 |
| FIGURA 20 - SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E NO CENÁRIO FUTURO PRÓXIMO (2060-2080)..... | 66 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 21 - SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E NO CENÁRIO FUTURO DISTANTE (2080-2100)..... | 66 |
| FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PARA AS ESTAÇÕES SÃO JOÃO DA GRACIOSA, MANANCIAIS DA SERRA E CENÁRIO RCP 8.5 | 67 |
| FIGURA 23 - VAZÃO MENSAL OBSERVADA E SIMULADA NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO | 71 |
| FIGURA 24 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE VAZÃO LÍQUIDA MENSAL OBSERVADA E SIMULADA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 72 |
| FIGURA 25 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 73 |
| FIGURA 26 - ESCOAMENTO TOTAL SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 74 |
| FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 75 |
| FIGURA 28 - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS MENSAL OBSERVADO E SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO | 76 |
| FIGURA 29 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE VAZÃO SÓLIDA MENSAL OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 77 |
| FIGURA 30- PERMANENCIA DE VAZÃO SÓLIDA DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 78 |
| FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SIMULADA NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 78 |
| FIGURA 32 - EFEITO DO CENÁRIO CLIMÁTICO RCP 8.5 NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL. | 81 |
| FIGURA 33 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA, E SIMULADA SOB INFLUÊNCIA DO CENÁRIO RCP 8.5 NO FUTURO PRÓXIMO E NO FUTURO DISTANTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 82 |
| FIGURA 34 - SAZONALIDADE DA VAZÃO LÍQUIDA MEDIDA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E SIMULADA COM O MODELO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA NO CENÁRIO RCP 8.5..... | 82 |
| FIGURA 35 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO SÓLIDA OBSERVADA E SIMULADA PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA, E SIMULADA SOB INFLUÊNCIA DO CENÁRIO RCP 8.5 | |

| | |
|--|----|
| NO FUTURO PRÓXIMO E NO FUTURO DISTANTE, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA. | 83 |
| FIGURA 36 - SAZONALIDADE DA VAZÃO SÓLIDA MEDIDA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E SIMULADA NO CENÁRIO RCP 8.5 | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DA FORÇANTE RADIATIVA, CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ E MUDANÇA NA TEMPERATURA PREVISTA PARA OS RCPS. | 26 |
| TABELA 2 - GRANDEZAS DO BANCO DE DADOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS | 44 |
| TABELA 3 - ESTAÇÕES SELECIONADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 47 |
| TABELA 4 - MODELOS GLOBAIS DE CIRCULAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS DO CENÁRIO RCP 8.5 | 52 |
| TABELA 5 - INTERVALOS DE VALORES PARA MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT EM ESCALA DE TEMPO MENSAL | 59 |
| TABELA 6 - PERÍODO DA SÉRIE HISTÓRICA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO | 59 |
| TABELA 7 - VALOR ADOTADO PARA OS PARÂMETROS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO | 68 |
| TABELA 8 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA E SÓLIDA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 69 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 17 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 3.1 EROÇÃO HÍDRICA | 18 |
| 3.2 TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS .. | 22 |
| 3.3 CENÁRIOS CLIMÁTICOS DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)..... | 23 |
| 3.3.1 IMPACTO DE DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS NA VAZÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS..... | 27 |
| 3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDROSEDIMENTOLÓGICA | 29 |
| 3.4.1 MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) | 32 |
| 3.4.2 SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT | 34 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 36 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL E LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 36 |
| 4.2 DADOS AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA E PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO MODELO. | 38 |
| 4.2.1 RELEVO | 39 |
| 4.2.2 USO DA TERRA | 40 |
| 4.2.3 ASPECTOS PEDOLÓGICOS | 42 |
| 4.3 ANÁLISE DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS..... | 46 |
| 4.3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL E LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS..... | 46 |
| 4.3.2 CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS..... | 48 |
| 4.4 VARIABILIDADE ENTRE A SÉRIE HISTÓRICA E O CENÁRIO FUTURO RCP 8.5.... | 51 |
| 4.5 VAZÃO LÍQUIDA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 53 |
| 4.6 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT: SUB-BACIAS E UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA..... | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 4.7 EQUACIONAMENTO DO MODELO SWAT | 55 |
| 4.7.1 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SWAT..... | 57 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 61 |
| 5.1 ANÁLISE DE VARIABILIDADE DA TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO DO CENÁRIO RCP 8.5 (IPCC, 2013) EM RELAÇÃO À SERIES HISTÓRICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 61 |
| 5.1.1 TEMPERATURA | 61 |
| 5.1.2 PRECIPITAÇÃO..... | 65 |
| 5.2 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA..... | 68 |
| 5.2.1 VAZÃO..... | 69 |
| 5.2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS | 75 |
| 5.3 EFEITO DO CENÁRIO CLIMÁTICO SOBRE A VAZÃO LÍQUIDA, SÓLIDA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA | 80 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 85 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 87 |

1. INTRODUÇÃO

O ciclo hidrossedimentológico é um processo ambiental complexo e sensível a diferentes fatores ambientais, tais como: vegetação, tipo de solo, relevo, geologia e clima. Dessa forma, entende-se que o ciclo hidrossedimentológico está condicionado à configuração ambiental local. A busca pelo entendimento do efeito de variados fatores ambientais na configuração do ciclo hidrossedimentológico resulta em pesquisas que buscam avaliar a influência do uso da terra (MACHADO, et al., 2003; VANZELA et al., 2010), regime pluviométrico (MEDEIROS, 2003), relevo (XAVIER et al., 2014) e clima (OLIVEIRA, et al., 2015; HTUT et al., 2015) no regime de vazão e no transporte de sedimentos em bacias hidrográficas com diferentes características ambientais.

Na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, localizada na serra do mar paranaense, a dinâmica da vazão e do transporte de sedimentos possui características particulares em decorrência da combinação do relevo, tipos de solos, vegetação e clima específicos da região. De acordo com Bogen et al. (1995) cadeias de montanhas com pluviosidade elevada resultam, geralmente, em fontes promissoras de material intemperizado. Em montanhas localizadas em regiões de clima temperado, por exemplo, a ocorrência de neve é um fator determinante na dinâmica dos sedimentos, enquanto que em montanhas localizadas em países tropicais a precipitação pluviométrica é mais importante. De acordo com Paula (2010), na serra do mar paranaense, a alta vazão e concentração de sedimentos está intimamente relacionada ao elevado índice pluviométrico.

O processo de transporte de sedimentos na região da serra do mar paranaense foi bastante abordado nos últimos anos em pesquisas realizadas por Mantovanelli (1999); Paula (2010) e Gibertoni et al. (2009), enfatizando a combinação de fatores como vegetação, relevo e solos na configuração desse processo. Contudo, há ainda uma lacuna em relação a estudos que ressaltem a influência climática no ciclo hidrossedimentológico na região.

No cenário contemporâneo das ciências naturais muito se discute a respeito das mudanças no clima e suas possíveis consequências na configuração de sistemas ambientais. Nesse contexto, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) desenvolve periodicamente cenários climáticos futuros baseados em emissões

de gases de efeito estufa (GEE). Os cenários são utilizados por pesquisadores, no sentido de avaliar possíveis impactos no escoamento (HTUT et al., 2015) e transporte de sedimentos (IENSEN et al., 2014) em bacias hidrográficas.

Assim, a perspectiva climática se torna uma abordagem interessante no estudo do ciclo hidrossedimentológico. Para compreender as alterações provocadas pelo clima no regime hidrossedimentológico, pesquisas atuais desenvolvidas no Brasil (PERAZZOLI et al., 2013) fazem uso de cenários climáticos idealizados pelo IPCC e gerados por modelos globais de circulação, para simular os processos relativos ao ciclo hidrossedimentológico, utilizando como ferramenta modelos hidrológicos distribuídos.

Pesquisas que avaliam a influência de cenários climáticos futuros no ciclo hidrológico, a exemplo de Darren et al. (2009) e Lu et al. (2013) apresentam resultados diferenciados, tanto na variabilidade climática proposta pelos cenários quanto na sua influência sobre a vazão ou transporte de sedimentos, caracterizando sensibilidade particular aos cenários para diferentes regiões. Assim, justifica-se a necessidade de pesquisas dessa natureza para diferentes regiões brasileiras, possibilitando avaliar a influência do clima e de suas variações na configuração do ciclo hidrossedimentológico.

A modelagem de processos hidrológicos auxilia na mensuração dos fenômenos, e possibilita representar os processos de maneira distribuída temporal e espacialmente. Com isso, o estudo da projeção de cenários futuros emerge nas ciências ambientais, possibilitando pesquisas que contribuem para a avaliação de impactos, para análise quantitativa e qualitativa da ocorrência de fenômenos naturais, e conseqüentemente para o aprimoramento da gestão do meio ambiente.

O rio Nhundiaquara possui suas nascentes em elevadas altitudes na serra do mar paranaense, e sua foz no complexo estuarino de Paranaguá. Os estuários são áreas costeiras que recebem sedimentos advindos de fontes fluviais, bem como do próprio oceano, determinando áreas naturalmente favoráveis ao assoreamento (PERILLO, 1995). No litoral paranaense, o estuário composto pelas baías de Antonina e Paranaguá sofre fortes intervenções estruturais e socioeconômicas, uma vez que comportam o complexo portuário de Paranaguá. Assim, tendo em vista a dinâmica sociedade-natureza que se configura na região, é válido destacar a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que abordem de forma quantitativa e qualitativa a

produção de sedimentos nessas áreas. Pois, em uma perspectiva geográfica, tais estudos possibilitam avaliar fatores que auxiliam em tomadas de decisão, visando uso e conservação de recursos naturais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o cenário RCP 8.5 (IPCC, 2013) e seus efeitos na vazão líquida e sólida nas condições ambientais da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, localizada na serra do mar paranaense.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a variabilidade climática do cenário futuro proposto pelo IPCC em dois períodos (2060-2080 e 2080-2100), regionalizados para a região Leste do Paraná, em relação ao período recente (1994-2014);
- Simular de forma distribuída os processos hidrossedimentológicos recentes na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara.
- Simular a vazão líquida e sólida sob a influência do cenário RCP 8.5 na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara.
- Analisar o impacto da mudança climática proposta no cenário RCP 8.5 no ciclo hidrossedimentológico nas condições da área de estudo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 EROSÃO HÍDRICA

O material intemperizado em uma bacia hidrográfica se forma e flui até os rios por meio da interação de fatores hidrológicos, sendo os mais relevantes a quantidade e distribuição da precipitação, a estrutura geológica, a estrutura do solo, a cobertura vegetal e o relevo (SANTOS et al., 2001).

Paralelo ao ciclo hidrológico, ocorre o ciclo do sedimento. As partículas sólidas dependem da água para que haja desprendimento, transporte e deposição, caracterizando uma relação de vínculo e dependência entre água e sedimentos em uma bacia hidrográfica (BORDAS e SEMMELMAAN, 1993). Dessa forma, entende-se que o regime hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é composto pelos processos de erosão, transporte e deposição de material intemperizado, que ocorre de forma concomitante e proporcional ao regime hidrológico.

A erosão consiste em um fenômeno de desgaste de rochas e solos, incluindo a desagregação e transporte de partículas sólidas pela ação de agentes erosivos (CARVALHO, 2008). Os agentes erosivos podem ser passivos ou ativos, e atuam de forma interligada. Os agentes ativos são aqueles que causam o processo de erosão, como a água, vento, temperatura, neve, ou ação de micro-organismos, animais e humanos. Os agentes passivos estão relacionados à potencialização do processo de erosão, como topografia, tipo de solo, cobertura vegetal e gravidade (MORGAN, 2005).

Em regiões tropicais a perda de solo por erosão hídrica é mais significativa do que em outras regiões, devido à grande erosividade das chuvas (WALTRICK, 2010). De acordo com Ellison (1950) a erosão hídrica que ocorre por meio da força da água da chuva se manifesta de duas formas. Uma delas é a força que a gota de água exerce sob o solo espalhando as partículas do solo no ar (*splash erosion*). A outra se dá a partir da força do escoamento, que desagrega o solo através do fluxo, “limpando” as partículas mais soltas (*scour erosion*). Segundo o autor, a energia das gotas de chuva é aplicada uniformemente na área de ocorrência do evento, enquanto que a energia do escoamento superficial se dá majoritariamente em áreas de concentração de fluxo.

A resposta do solo à força exercida pelas gotas de chuva depende de seu teor de umidade inicial. Le Bissonais (1990) elucida três casos possíveis: (I) se o solo está

seco e a chuva tem alta intensidade os agregados de solo se quebram com facilidade e a capacidade de infiltração reduz rapidamente, podendo ocorrer escoamento superficial com apenas alguns milímetros de chuva, caso a superfície seja lisa. (II) se o solo está parcialmente úmido e a intensidade da chuva é baixa, pode ocorrer trincamento dos agregados de solo, formando agregados menores. Nesse caso, a capacidade de infiltração se mantém elevada devido aos grandes poros formados entre os agregados. (III) se o solo se encontra saturado, a capacidade de infiltração vai depender da condutividade hidráulica saturada do solo, e grandes quantidades de chuva são necessárias para selar a superfície.

A energia do escoamento desencadeia processos erosivos de diferentes magnitudes, e depende de variáveis como a saturação do solo, tipo de relevo e vegetação. Carvalho (2008) define os tipos de erosão que podem ser causados pelo escoamento superficial:

- Erosão em lençol ou laminar, que se caracteriza por um desgaste leve da camada superficial, ocorrendo geralmente quando há saturação do solo, durante eventos de grande intensidade pluviométrica;
- Erosão em sulcos ou ravinas, que ocorre devido à concentração do fluxo em regiões específicas, causando depressões no relevo que aparecem como filetes de água que se espalham e se unem continuamente, infiltrando após pequenas distâncias.
- Erosão por escoamento difuso e concentrado: a erosão em sulcos ou ravinas pode evoluir, causando maiores depressões na superfície e tornando o escoamento mais intenso, com maior arranque e transporte de materiais. Os sulcos formados podem sofrer desabamentos, formando voçorocas.

Em situações em que há grande volume de precipitação, podem ocorrer também movimentos de massa, que se caracterizam principalmente pelo escorregamento de rochas e solos. Em áreas úmidas de relevo montanhoso, predominam movimentos de desmoronamentos ou deslizamentos e fluxos de terra ou lama. Os primeiros correspondem a deslocação da massa em relação à superfície saturada de água, quando o material atinge o limite de plasticidade e fluidez. O segundo consiste no movimento do regolito, quando o material se encontra saturado, ocasionando o rompimento das partículas de argila e água, momento em que a massa se dissolve espontaneamente, seguindo o fluxo do canal fluvial (CASSETI, 2005).

A erosão causada pela força das gotas de chuva e pelo escoamento caracteriza a energia que desencadeia o processo de erosão hídrica em determinada área ou bacia hidrográfica. Morgan (2005) determina que os fatores que influenciam os processos erosivos podem ser considerados sob três principais determinantes: energia, resistência e proteção. A energia, conforme referida anteriormente, inclui a capacidade da chuva, vento e escoamento superficial em causar erosão. A resistência inclui o grau de erodibilidade do solo, que depende principalmente de propriedades mecânicas e químicas; e o fator de proteção consiste, principalmente, na cobertura vegetal.

Em relação à resistência, salienta-se a natureza do solo como uma condição determinante. A característica do solo que indica sua suscetibilidade à erosão é chamada erodibilidade. A erodibilidade do solo varia de acordo com a textura, estabilidade do agregado, capacidade de infiltração e composição química e orgânica (MORGAN, 2005; LEPSCH, 2002). O solo arenoso, por exemplo, apresenta textura grossa, facilitando o processo de infiltração, contudo, geralmente não são solos bem estruturados, sendo mais suscetíveis à força de arrastamento. O solo argiloso, por outro lado, é de textura fina e possui estrutura com maior coesão entre as partículas, dificultando a infiltração (CARVALHO, 2008). Assim, percebe-se que a textura e estrutura do solo influem na sua capacidade de infiltração, e, conseqüentemente, na sua vulnerabilidade em relação à força da água.

Sobre o fator de proteção, é importante considerar que o grau de proteção do solo aumenta na mesma proporção que a cobertura vegetal é conservada, o que torna os solos menos suscetíveis à erosão e, conseqüentemente, à produção de sedimentos (PAULA, 2010). Quando há interferência humana no uso da terra, modificando o grau de proteção da vegetação, considera-se que a atividade altera a taxa de erosão de forma considerável, compondo um dos aspectos que influenciam os processos erosivos.

Além da energia, resistência e proteção, é importante destacar os aspectos relativos à declividade do terreno, ou seu grau de inclinação, que influencia na concentração, dispersão e velocidade do escoamento superficial. Em terrenos planos a água escoar mais lentamente, carregando menor quantidade de sedimento e com maior probabilidade de infiltração. Em terrenos inclinados a água atinge maior

velocidade, fazendo com que as regiões montanhosas sejam mais suscetíveis à erosão (LEPSCH, 2002).

Na busca para soluções em escalas locais ou de bacias hidrográficas, são formulados modelos de equacionamento do processo de erosão. As primeiras fórmulas de avaliação de erosão utilizavam entre uma a duas variáveis desenvolvidas em âmbito local. A evolução das fórmulas e o avanço científico possibilitou o desenvolvimento de modelos que atualmente consideram muitas variáveis, otimizando resultados na maior parte dos casos (CARVALHO, 2008).

A Equação Universal de perdas de solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), é um dos modelos mais considerados no estudo de processos erosivos. De acordo com os autores a USLE é uma equação empírica, contudo, de caráter universal, pois apresenta potencial para ser aplicada onde quer que o valor de seus parâmetros esteja disponível. A equação corresponde ao produto de parâmetros de fatores ativos e passivos atuantes no processo de erosão. E é representada por:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

sendo: *A* a perda de solo por unidade de área e tempo (t/ha); *R* o fator de erosividade da chuva (t m/ha. mm/h); *K* o fator de erodibilidade do solo (t /ha (tm/ha.mm/h); *L* o fator topográfico do comprimento do declive (m); *S* o fator topográfico da declividade do terreno; *C* o fator de uso e manejo do solo e *P* o fator de prática conservacionista do solo.

Especificamente, o fator *R* corresponde ao índice de erosão pluvial e expressa a capacidade que a chuva tem de causar erosão em área descoberta. O fator é determinado pelo produto da energia cinética de uma chuva com sua máxima intensidade em 30 minutos. O Fator de erodibilidade *K* representa a susceptibilidade do solo à erosão, estando relacionado às propriedades físicas e químicas do solo. O fator pode representar o grau de erosão de diferentes tipos de solo quando submetidos a mesma condição de chuva, declive e manejo. O fator *C* representa a relação entre o volume de solo erodido em determinada condição de manejo e o volume de solo cultivado e mantido limpo. O fator *P* de prática de conservação relaciona as perdas de solo de um cultivo com determinada prática e as perdas de um cultivo morro abaixo, que pode ser considerado a situação mais favorável para a ocorrência de erosão. Os

fatores L e S representam aspectos topográficos relativos ao comprimento (L) e declive (S) do terreno. O fator L é a relação de perdas de solo entre em comprimento de declive x e um comprimento de rampa de 25 m para o mesmo solo e grau de declive; o fator S é igual à relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa (Carvalho, 2008).

A equação universal de perdas de solo sofreu alterações que deram origem a modelos como a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) (WILLIAMS, 1995). A MUSLE apropria-se dos fatores predispostos na USLE, mas o índice de erosividade da chuva é substituído pelo fator de escoamento, o que possibilita que a projeção da produção de sedimento em bacias hidrográficas seja aplicada em eventos pluviométricos individuais (ARNOLD et al., 2012).

3.2 TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

A partícula de sedimento passa pelos processos de erosão, deslocamento, transporte, deposição e compactação. Em épocas chuvosas o transporte é maior, principalmente em chuvas de maior intensidade. Para estudos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas para fins de manejo e gestão de recursos naturais, é importante conhecer a tendência, quantidade e qualidade do sedimento transportado (CARVALHO, 2008).

O transporte de sedimento também pode ser classificado de acordo com a forma que ocorre. Para Carvalho (2008) a definição mais usual para as formas de transporte são definidas pelo *Subcommittee on Sedimentation* (1963), que consistem em: (I) Carga sólida de arrasto: consiste nas partículas de sedimento que rolam longitudinalmente no curso d'água em contato com o leito; (II) Carga sólida saltante: partículas que saltam ao longo do curso d'água por meio da correnteza; (III) Carga sólida em suspensão: partículas que, devido ao seu tamanho, permanecem em suspensão, caracterizando fluxo turbulento ao longo do leito.

A resposta da bacia hidrográfica em relação ao sedimento é variável desde as partes altas até as planícies, considerando os fatores condicionantes. De maneira geral, a erosão e o transporte de sedimentos ocorrem nas partes altas, enquanto que nas partes baixas há formação de colúvios, onde a maior parte dos sedimentos

erodidos se distribui. Ou seja, a degradação do solo comumente ocorre nas partes altas, enquanto que a gradação ocorre em partes baixas (SILVA et al., 2007).

O processo de deposição ocorre comumente em áreas em que a energia do fluxo diminui. O fenômeno pode estar associado a feições naturais como lagoas, ou a intervenções antrópicas, como barramentos e reservatórios. Áreas de estuários, por exemplo, estão propensas de maneira natural ao recebimento de sedimentos fluviais e marinhos, contudo, alterações na dinâmica natural de bacias hidrográficas e de ecossistemas costeiros pode potencializar o processo. De acordo com Morgan (2005) os sedimentos podem ser um problema, pois podem causar problemas como o assoreamento de rios, a perda da qualidade da água e a sua contaminação, visto que os sedimentos podem adsorver produtos químicos, aumentando o nível de nitrogênio e fósforo em corpos d'água, resultando na sua eutrofização.

No contexto dos fenômenos que influenciam os processos hidrossedimentológicos cabe salientar a necessidade de uma análise integradora, considerando as relações que os fatores erosivos possuem entre si em ambientes naturais ou modificados, dentro do recorte espacial adotado.

3.3 CENÁRIOS CLIMÁTICOS DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)

O Painel intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) desenvolve pesquisas no objetivo de prever a tendência climática do futuro, considerando como variável principal a emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Como resultado das pesquisas são publicados periodicamente relatórios de emissão de GEE de acordo com o desenvolvimento social, econômico e tecnológico da sociedade. O IPCC relaciona a concentração de gases como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), à atividades antrópicas, pois os gases estufa podem provir de fontes não naturais, tal como a queima de combustíveis fósseis. Assim, para o desenvolvimento de projeções são considerados fatores como o crescimento populacional, desenvolvimento da tecnologia, mudanças no sistema de geração e uso de energia e aproveitamento da terra, devem ser considerados em cenários de projeção de gases estufa na atmosfera (WAYNE, 2013).

As pesquisas do IPCC fornecem projeções da emissão de gases estufa na atmosfera para fomentar o desenvolvimento de cenários de mudanças climáticas

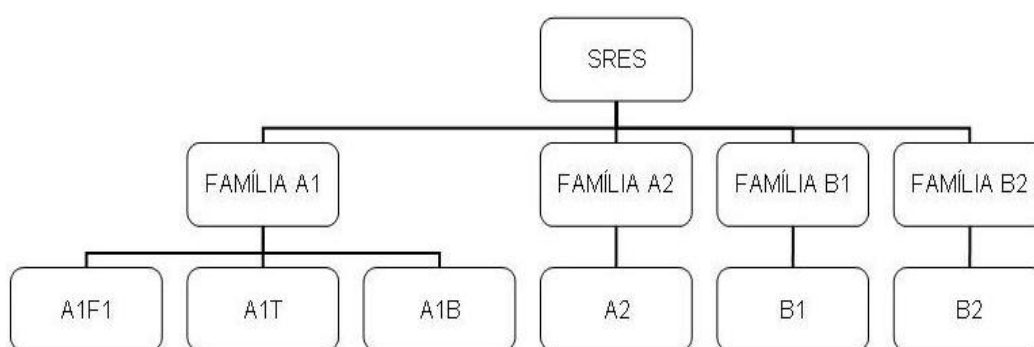
globais, partindo da influência que os gases de efeito estufa exercem sob o sistema climático. Dessa forma, é possível projetar cenários com diferentes condições climáticas, pautados em situações distintas de concentração de GEE.

Nos últimos 15 anos o IPCC lançou dois conjuntos de projeções de GEE que foram amplamente difundidos na comunidade científica internacional. Trata-se do *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) (IPCC,2000), e do *Representative Concentration Pathways* (RCPs) (IPCC,2007; RIAHI et al.; 2007; IPCC, 2013). Os dois conjuntos de projeções têm servido como base para elaboração de cenários climáticos, que auxiliam pesquisas de avaliação de impacto de mudanças climáticas em processos naturais, tais como o transporte de sedimentos, destacando-se Lelis et al. (2011); Mukundan et al. (2012); Gombault et al. (2015) e Pascual et al. (2015).

Por se tratar de publicação mais atual, existem alguns aprimoramentos realizados nos cenários RCPs em relação aos SRES, em decorrência dos avanços tecnológicos e científicos ocorridos no intervalo de tempo entre eles.

O primeiro grupo SRES (IPCC,2000) divide-se em “famílias” e subgrupos (FIGURA 1) de acordo com as forças motrizes antrópicas que podem influenciar na emissão de GEE. Os cenários representam diferentes situações que envolvem o desenvolvimento de tecnologia, crescimento populacional além de desenvolvimento social e econômico.

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DOS CENÁRIOS APRESENTADOS NO SRES



FONTE: Modificado de IPCC, 2007

Os grupos A2 e B2 (Figura 1) caracterizam-se, principalmente, pelo crescimento contínuo da população no decorrer do século (sendo mais intensa na família A2), e desenvolvimento tecnológico e econômico mais lento em relação aos outros cenários.

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

Os cenários pertencentes à família A1 consideram rápido crescimento econômico e tem foco nas tecnologias voltadas a produção energética. O cenário A1F1 considera fontes de energia não renovável de origem fóssil. No cenário A1T constam fontes de energia renovável, enquanto que o cenário A1B representa um balanço entre as duas fontes de energia citadas (NAKICENOVIC, N. e SWART, R 2000).

O segundo grupo de cenários trouxe uma nova proposta de projeções futuras de gases estufa, que são categorizadas em quatro diferentes vias representativas de concentração de GEE ao longo de todo o século XXI. Os quatro cenários, intitulados *Representative Concentration Pathways* (RCPs) são classificados em termos de forçantes radiativas, que de acordo com Ávila (2007, p.163) podem ser definidas como “medida de influência que um fator tem de alterar o balanço de energia que entra ou sai no sistema terra-atmosfera, e é um índice de importância do fator como um potencial mecanismo de mudança climática. ”

De acordo com Moss et al. (2008) citado por Wayne (2013), o desenvolvimento dos RCPs obedeceu aos seguintes critérios:

- Os RCPs devem ser coerentes com cenários publicados na literatura recente relativa ao tema, e desenvolvidos independentemente por diferentes grupos de modelos, no sentido de representarem a totalidade de cenários disponíveis em termos de emissão e concentração de gases estufa na atmosfera. Ao mesmo tempo, os RCPs devem prover cenários com descrição plausível e consistente do futuro;
- Os cenários devem prover informação sobre todos os componentes da forçante radiativa necessária como entrada nos sistemas de modelos climáticos e atmosféricos (emissão de gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos e diferentes usos da terra). Além disso, as informações devem ser disponibilizadas de maneira geograficamente coerente;
- Os cenários devem proporcionar uma base harmônica entre emissões de gases e uso da terra, e permitir transição suave entre as análises de períodos históricos e projeções futuras ao longo de todo o século XXI.

Assim como os SRES, os RCPs consistem em projeções de emissões de gases estufa com base em atividades econômicas, fontes de energia, crescimento populacional, entre outros fatores socioeconômicos (WAYNE, 2013). Contudo, os cenários contam com algumas inovações e otimizações em relação aos anteriores, visto que pesquisas na área necessitam de periódicas atualizações, devido aos avanços científicos que contribuem para o melhor entendimento do sistema climático. Além disso há também a atualização da própria base histórica de dados, que pode apresentar mudanças nas tendências, impactos, adaptação e vulnerabilidade climáticas (IPCC, 2013).

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

A previsão de mudanças na temperatura em cada cenário está relacionada à forçante radiativa (representada em $W m^{-2}$), e à concentração de CO_2 (p.p.m - partículas por milhão). Na TABELA 1 é possível observar a máxima forçante radiativa de cada cenário prevista para o futuro, e a respectiva mudança máxima esperada na temperatura.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DA FORÇANTE RADIATIVA, CONCENTRAÇÃO DE CO_2 E MUDANÇA NA TEMPERATURA PREVISTA PARA OS RCPS.

| Nome | Forçante radiativa | CO_2 equiv. (p.p.m) | Mudança na temperatura °C |
|-------------|---------------------------|---|----------------------------------|
| RCP 8.5 | 8,5 $W m^{-2}$ em 2100 | 1370 | +4,8 |
| RCP 6.0 | 6 $W m^{-2}$ em 2100 | 850 | +3,1 |
| RCP 4.5 | 4,5 $W m^{-2}$ em 2100 | 650 | +2,6 |
| RCP 2.6 | 3 $W m^{-2}$ em 2100 | 490 | +1,7 |

FONTE: adaptado de WAYNE (2013)

Em comparação ao SRES, a principal mudança nos RCP's está relacionada ao desenvolvimento dos cenários. No SRES o processo de desenvolvimento ocorre em fases sequenciais: (I) cenário socioeconômico; (II) forçantes radiativas; (III)

projeções climáticas (IV) impactos, adaptações e vulnerabilidade. Nos RCPs as mesmas fases se desenvolveram em paralelo, considerando a variabilidade de uma fase em detrimento à outra. Assim, os RCPs não estão associados a apenas um determinado cenário socioeconômico e sim resultam da combinação de diferentes situações econômicas, tecnológicas, demográficas e políticas.

O cenário RCP 8.5 caracteriza uma realidade futura “pessimista” em relação aos demais cenários do grupo, uma vez que apresenta o maior incremento na temperatura. A história de futuro desse cenário, relativa ao crescimento demográfico, desenvolvimento econômico e mudanças tecnológicas, pode ser considerada como uma revisão e atualização da história de futuro do cenário A2, do SRES (RIAHN et al., 2011).

As principais melhorias metodológicas do cenário RCP 8.5 desde a publicação do cenário A2, está na melhor representação do presente e, para projeção regional de emissão de gases poluentes, melhor entendimento da legislação referente à qualidade do ar; desenvolvimento de técnicas de *downscaling* que consideram as dinâmicas espaciais da emissão de poluentes; e finalmente a disponibilidade de dados em escala de maior refinamento para uso da terra, visando a representação espacial das mudanças ocorridas nesse quesito (RIAHN et al., 2011).

3.3.1 Impacto de diferentes cenários climáticos na vazão e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas

Os possíveis impactos ocasionados por cenários climáticos em processos naturais foram estudados principalmente nos cenários desenvolvidos pelo IPCC. As projeções de emissões de GEE são utilizadas em modelos globais de circulação, tais como HadCM3 (UKMO, 2006) CSIRO-Mk 3.0 (ATMOSPHERIC RESEARCH, 2005) e MIROC5 (WATANABE et al., 2010), para elaboração dos cenários que dispõem de dados em escala diária ou mensal de variáveis climáticas para o futuro. É importante salientar que as projeções de GEE desenvolvidos pelo IPCC são posteriormente utilizadas por instituições de pesquisa para a produção de cenários climáticos no mundo.

Pesquisas realizadas por Marengo et al. (2009), Campos et al. (2011) e Trotochaud (2014) regionalizam e disponibilizam os dados simulados pelos modelos globais de circulação para distintas regiões no planeta. São pesquisas que

possibilitam o desenvolvimento da avaliação de impacto ocasionada por mudanças nas variáveis climáticas em processos e ciclos naturais, tal como o ciclo hidrossedimentológico. Esses estudos geralmente ocorrem com o auxílio de ferramentas de modelagem e equacionamento do sistema ambiental.

Darren et al. (2009) analisaram as respostas hidrológicas às variações na concentração de CO₂ na atmosfera, e variações na temperatura e precipitação utilizando como ferramenta a modelagem matemática distribuída. Em comparação com a situação climática atual, a pesquisa concluiu que altas concentrações de CO₂ na atmosfera e aumento da temperatura, características do cenário A1F1 do IPCC em 50 anos de simulação resultaram na diminuição da evapotranspiração média em 37,5%, aumento da produção de sedimentos em 36,5% e aumento da vazão em 23,5%.

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

A utilização dos dados RCP's (IPCC, 2007) é ainda incipiente se comparada ao SRES (NAKICENOVIC, N. e SWART, R, 2000). Isso se deve, principalmente, à falta de regionalizações específicas dos dados climáticos modelados com base nos RCP's. Contudo, algumas publicações apresentam avaliação de impacto e simulação de processos hidrológicos a partir dos dados RCP's. Como: (I) Htut et al. (2015), que analisaram o impacto das projeções RCP 4.5 e 8.5 no escoamento superficial ao longo do século XXI, resultando em aumento da vazão de até 57% sob a influência dos dois cenários; (II) Ouyang et al. (2015) analisaram o impacto dos RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 no regime de vazão de bacia hidrográfica e concluíram que apesar do aumento da precipitação e temperatura ao longo do tempo identificado em todos os cenários, a vazão diminuiu em decorrência do aumento da evapotranspiração causado pelo aquecimento do sistema climático na região.

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

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Um modelo caracteriza-se como a representação simplificada da realidade, que é capaz de reconstruí-la, e prever uma tendência ou evolução (CHRISTOFOLETI, 1999). Os modelos criados com o objetivo de representar processos naturais são comumente classificados de acordo com a relação que assumem junto aos fenômenos que buscam representar. Dessa forma, podem ser classificados em estocásticos ou determinísticos; empíricos ou fisicamente baseados, e distribuídos ou concentrados (SANTOS, 2001; TUCCI, 2005).

Os modelos estocásticos envolvem pelo menos uma variável aleatória, considerando a probabilidade de ocorrência dos eventos representados. Modelos determinísticos desconsideram o conceito da probabilidade na sua aplicação, sendo que cada valor de entrada corresponde a um único valor de saída (MOREIRA, 2005; TUCCI, 2005).

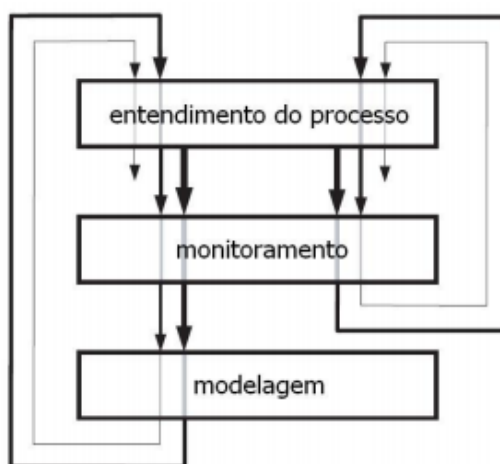
A classificação dos modelos em empíricos, ou fisicamente baseados está relacionada à descrição dos processos. Os modelos empíricos possuem equacionamento baseado em observações e experimentos. Assim, caracterizam-se como modelos pouco robustos, aplicáveis, na maior parte dos casos, apenas nas regiões em que foram desenvolvidos (MOREIRA, 2005). Modelos mais complexos caracterizam-se como fisicamente baseados, pois representam os sistemas naturais a partir de equações gerais da física, unidos às características processuais dos fenômenos (TUCCI, 2005).

Em relação à variação espacial dos processos, os modelos concentrados caracterizam-se por considerar um valor médio para toda a área, enquanto que

modelos distribuídos contemplam que parâmetros e variáveis são dependentes do espaço e tempo (SANTOS, 2001).

O estudo da tendência de fenômenos naturais sob a perspectiva da modelagem deve iniciar-se a partir do monitoramento do processo. Isso permite que, progressivamente, seja construída a base para que haja a conceituação de um modelo (SANTOS, 2009; GRAYSON & BLÖSCHL, 2000). Assim, a modelagem se constrói junto com o monitoramento, tendo em vista que a melhora no sistema de monitoramento ambiental, por exemplo, dá subsídio ao desenvolvimento dos modelos de representação do sistema (Figura 2).

FIGURA 2 - ESQUEMA INTERATIVO ENTRE TEORIA, MONITORAMENTO E MODELAGEM



FONTE: adaptado de GRAYSON & BLÖSCHL (2000).

De acordo com Fill (1987), bacias hidrográficas configuram sistemas físicos complexos e variáveis no tempo e espaço. Dessa forma, a sua representação por meio de modelos, mesmo que modelos complexos, caracteriza-se como uma aproximação da realidade. O funcionamento do modelo só pode ser validado diante do confronto dos resultados modelados com o monitoramento do processo.

Um aspecto importante para modelagem refere-se à subjetividade por trás dos modelos. Tendo em vista que qualquer processo ou fenômeno que possa ser modelado é visto sob a perspectiva do seu modelador, o mesmo fenômeno pode ser representado de várias maneiras (CHRISTOFOLETTI, 1999). Além disso, existe a configuração histórico-regional na criação dos modelos, pois os processos modelados

geralmente são aqueles mais representativos na realidade próxima de cada autor (LOU, 2010).

De acordo com Griensven et al. (2006), o funcionamento dos modelos hidrossedimentológicos inicia-se no escoamento, que é a base do processo. Os parâmetros que influem no escoamento são dominantes, e com isso controlam resultados relativos ao sedimento. Assim, é possível afirmar que modelos hidrológicos constituem a base inicial dos modelos hidrossedimentológicos, caracterizando a compreensão mínima dos processos hidrológicos importante para a modelagem do ciclo do sedimento.

Tucci (2005) define que modelos hidrológicos são ferramentas que possibilitam simular ou representar a tendência de uma bacia hidrográfica por meio do equacionamento dos processos atuantes. O uso dos modelos hidrológicos, quando bem-sucedidos, contribuem cientificamente auxiliando na compreensão dos fenômenos hidrológicos em bacias hidrográficas. Com a modelagem é possível separar os fenômenos e avaliar sua sensibilidade de acordo com as características de diferentes áreas. Em relação à aplicabilidade, os modelos podem ser utilizados para: o preenchimento de falhas e análise de consistência de dados medidos; previsão de vazão; dimensionamento e previsão de cenários de uso e ocupação na bacia hidrográfica; e mensuração de efeitos resultantes da modificação do uso da terra.

Para estudos em bacias hidrográficas complexas é interessante a utilização de modelos distribuídos, que permitem discretizar os fenômenos espacialmente. Para Andriolo et al. (2008), o escoamento e produção de sedimentos em bacias hidrográficas são melhor representados por modelos distribuídos, por permitir evidenciar no tempo e no espaço as áreas e épocas em que ocorrem processos erosivos mais acentuados. Além disso, a modelagem distribuída permite estimar variações na carga de sedimentos em cenários futuros, sob situações diferenciadas de uso e manejo da terra, ou mudanças climáticas.

A modelagem distribuída é aplicada ao estudo de impacto de diferentes cenários do ciclo hidrossedimentológico. Ngo et al. (2015) analisaram o impacto da mudança vegetação sob a produção de sedimentos, concluíram que a mudança de floresta para campos rurais contribui para o incremento da produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Vietnã. Ramos et al. (2015) avaliaram a resposta do regime hidrossedimentológico à cenários climáticos futuros, que resultou num incremento de

até 57% na perda de solos, dependendo do aumento da intensidade da precipitação. Chen et al. (2014) avaliando o impacto de cenários climáticos, verificaram que as mudanças mais significativas (chegando ao incremento de 50% na produção de sedimentos) se deram em picos de vazão, provocados por chuvas menos frequentes, porém mais intensas.

Para o desenvolvimento de estudos em bacias hidrográficas existe hoje grande variedade de programas e *softwares* que possibilitam modelos hidrossedimentológicos, destacando-se: AnnAGNPS – Agricultural Non-Point Source Pollution Model (BINGNER & THEURER, 2003); ANSWERS - *Areal Non-point Source Watershed* (BOURAOUI AND DILLAHA, 1996); WEPP - *Water Erosion Prediction Project* (FLANAGAN AND LIVINGSTON, 1995) ; SedNet – *Sediment Network* (WILKINSON, 2005) - KYERMO - *Kentucky Erosion Model* (HIRSCHI, 1988) e SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* (NEITSCH et al., 2002).

3.4.1 Modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*)

O modelo computacional *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) consiste em um modelo hidrológico semi-distribuído, contínuo no tempo e espaço e fisicamente baseado em processos. Pode ser utilizado para a construção da representação de um sistema hidrológico em nível de bacia hidrográfica, possibilitando a avaliação de diferentes configurações ambientais no ciclo hidrossedimentológico (ABBASPOUR et al., 2015). O modelo possui características que permitem sua aplicação em diferentes regiões, sendo utilizado em pesquisas que apresentam resultados satisfatórios também em bacias hidrográficas brasileiras. Apesar de ter sido desenvolvido para aplicação em regiões agrícolas, estudos demonstram bons índices de eficiência em outros ecossistemas. Ribeiro et al. (2014) apresentam boa aplicação em região de floresta Amazônica; Meer et al. (2014) utilizaram o modelo em bacia hidrográfica com relevo montanhoso na Argentina, apresentando boa correlação com dados medidos. Silva et al. (2014) aplicaram o modelo em bacia hidrográfica em região de montanha e mata atlântica no Rio de Janeiro, também obtiveram bons resultados.

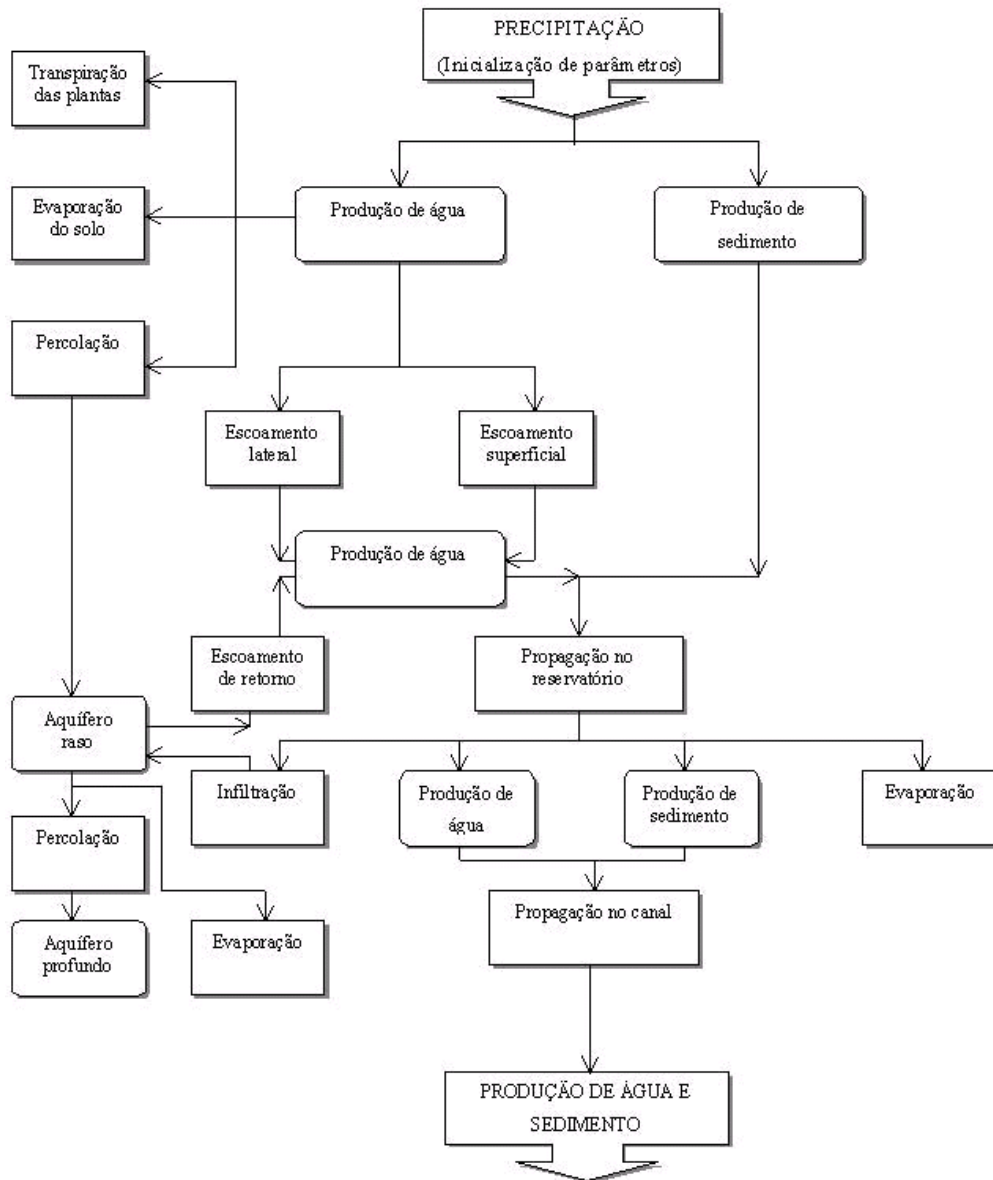
Desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* e em parceria com a *Texas A&M University*, o modelo possui o objetivo de prever o impacto do uso e manejo do solo e variáveis climáticas sobre o ciclo hidrológico, produção de sedimentos e

qualidade da água para bacias hidrográficas grandes e complexas, permitindo análise em longo prazo com grande quantidade de dados. (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2002).

O modelo SWAT apresenta grande aplicabilidade em regiões de características diversas devido à possibilidade de alteração do banco de dados e dos parâmetros relativos aos processos do ciclo hidrológico, o que permite a sua adaptação para diferentes configurações ambientais. A utilização do modelo requer a organização de um banco de dados hidroambientais composto por dados diários de variáveis climáticas monitoradas (precipitação, temperatura, radiação solar), e dados de uso da terra, vegetação, solos e relevo.

O modelo permite a simulação do ciclo hidrológico, incluindo sedimentos e qualidade da água, sendo que a qualidade da simulação depende de variáveis como a escala dos dados de entrada, a representatividade da precipitação e demais variáveis climáticas, e o correto ajuste de parâmetros relativos ao ciclo hidrológico, de acordo com a área de aplicação. A Figura 3 apresenta o esquema de funcionamento do modelo SWAT, iniciando pela precipitação até a produção de água e sedimentos.

FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DO MODELO SWAT



FONTE: (ANDRIOLO et al., 2008)

3.4.2 Sensibilidade e calibração do modelo SWAT

O modelo SWAT possibilita o ajuste de parâmetros relativos ao escoamento, à formação e transporte de sedimentos e à qualidade da água. Para esse ajuste comumente se utiliza o termo “calibração”. Para a realização da calibração, primeiramente é necessário avaliar a sensibilidade dos parâmetros, que pode ser diferente dependendo da área de estudo. Para isso, determinam-se os parâmetros

predominantes nos processos aos quais se tem interesse em realizar a calibração (ARNOLD et al., 2012).

De acordo com Abbaspour (2015) é possível analisar a sensibilidade de um parâmetro por vez, o que possibilita analisar a variabilidade da simulação para cada parâmetro escolhido. Outra opção é a avaliação da sensibilidade de forma global, considerando mais de um parâmetro por vez. Srinivasan (2014) sugere a análise global, uma vez que ela permite avaliar também a sensibilidade da combinação dos parâmetros.

Na literatura disponível (Lenhart et al., 2002; Arnold et al., 2012; Santos et al., 2005) é possível encontrar alguns dos parâmetros mais relevantes na simulação do escoamento. Em relação a calibração de sedimentos, encontram-se referências em: Santos et al. (2005); Gibertoni et al. (2009); Iensen et al. (2014) e Srinivasan (2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

A realização do presente trabalho ocorreu em três etapas principais: A primeira consistiu na análise de dados climáticos históricos e análise comparativa entre dados históricos e futuros; A segunda etapa compreendeu a determinação da vazão líquida e sólida na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara; e a terceira e última etapa consiste na aplicação, calibração e validação do modelo hidrológico SWAT, e análise de impacto do cenário climático futuro RCP 8.5 (IPCC, 2013) no regime de vazão e transporte de sedimentos na bacia.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL E LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA

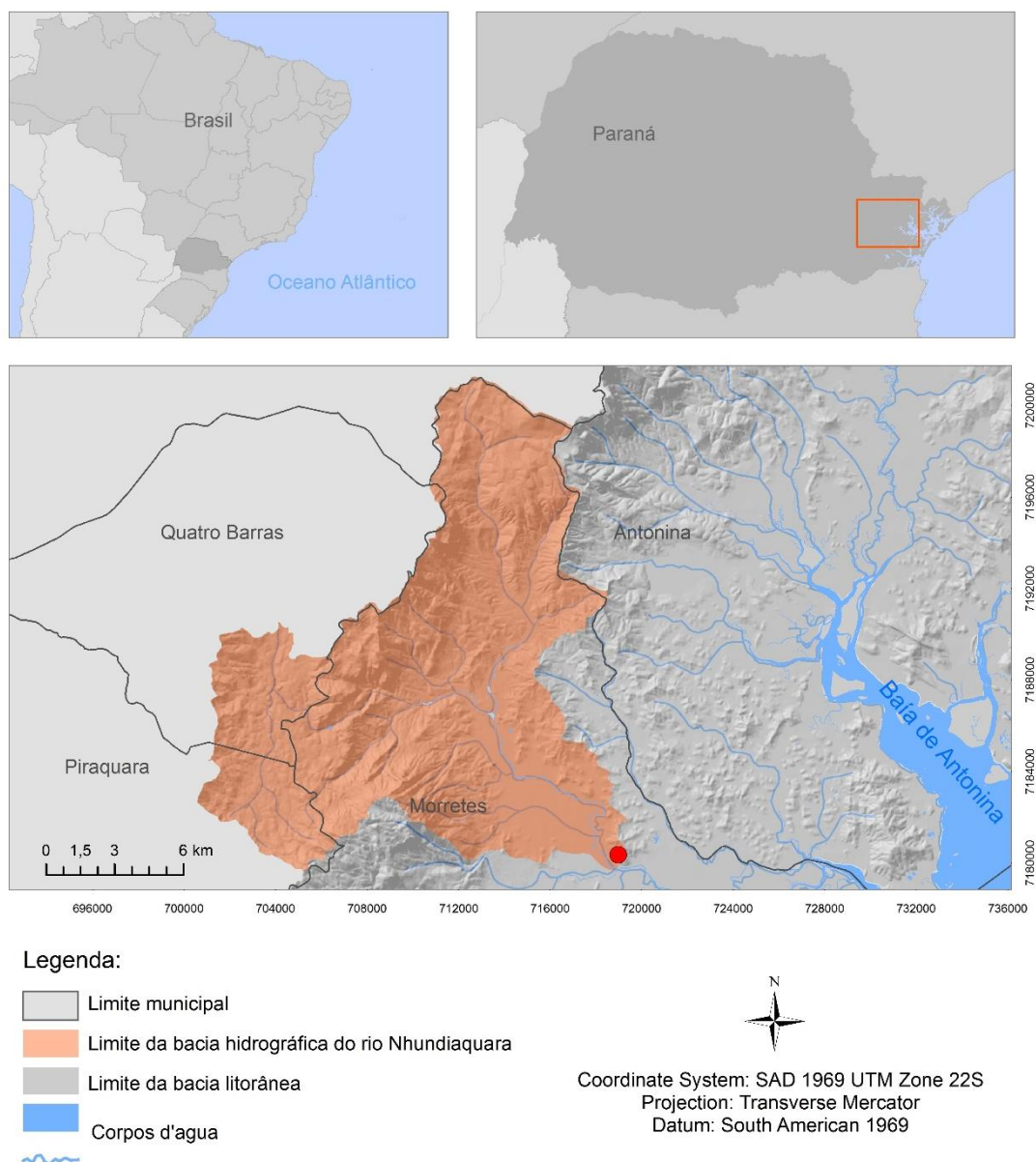
A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, região Leste do estado do Paraná. A bacia está localizada nos municípios de Morretes, Piraquara e Quatro Barras, e encontra-se inserida na Bacia hidrográfica litorânea, compondo parte da área drenagem da Baía de Antonina e Paranaguá (FIGURA 4). É importante salientar que a bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, em sua totalidade, possui aproximadamente 520 km². Contudo, no presente trabalho será considerada somente a porção a montante da estação de monitoramento Morretes, localizada a 25°28'37''S e 48°49'48''O.

Na região a ocupação é diversificada, dividindo-se entre áreas de conservação natural, urbanizadas e agrícolas. As áreas que possuem atividade agrícola e ocupação urbana estão inseridas no município de Morretes. O município possui população aproximada de 15.180 habitantes, 54% deles instalados na zona rural (IBGE, 2010).

A configuração geográfica da bacia do rio Nhundiaquara é responsável pela sua particularidade climática, que tem como principal característica altos índices pluviométricos, concentrados principalmente nos meses de verão, entre dezembro e fevereiro, em decorrência do efeito orográfico. A ocorrência de chuvas frequentes na bacia é responsável pela existência de rios de vazão regular, com grande potencial de formação de sedimentos e, inclusive, tendência a ocorrência de movimentos de massa. As características mencionadas resultam em uma bacia hidrográfica

heterogênea, com características de solo, uso da terra, e relevo diversificados, aliado a pluviosidade com influência de orografia.

FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE DOS DADOS: Base cartográfica – IBGE (2013) /AGUASPARANA (2011) Datum SAD69

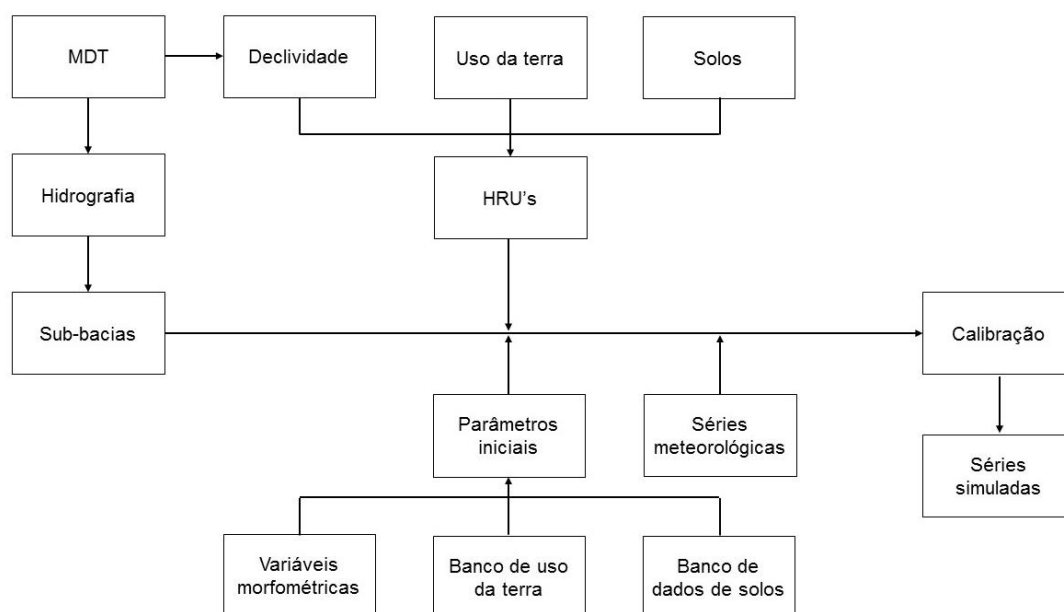
4.2 DADOS AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA E PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO MODELO.

O modelo SWAT foi utilizado como ferramenta para simulação dos processos hidrossedimentológicos atuais e cenários futuros na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara. Para tal foi necessária a constituição de um banco de dados contendo as principais características ambientais da bacia hidrográfica relativas ao solo, vegetação, relevo, clima e uso e ocupação da terra. Os principais parâmetros e propriedades físico-químicas do solo necessárias para o funcionamento do modelo podem ser encontradas com detalhe em Neitsch et al. (2009).¹

O modelo SWAT está associado a *softwares* de geoprocessamento, e utiliza como base para a delimitação da bacia hidrográfica e das respectivas sub-bacias o Modelo Digital do Terreno (MDT). As sub-bacias delimitadas pelo modelo são divididas em unidades mínimas para o cálculo de escoamento e produção de sedimento chamadas de Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). Estas unidades são criadas de acordo com o cruzamento dos dados de solo, cobertura vegetal, uso da terra, e declividade. Assim, os dados ambientais, climáticos e hidrológicos são necessários para realização do trabalho (Figura 5).

¹ NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. *Soil and Water Assessment Tool – Theoretical documentation version 2009*. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.

FIGURA 5 - PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DO MODELO SWAT



FONTE: Adaptado de SCHULTZ, 2010

4.2.1 Relevo

A bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara está inserida em área de transição entre a serra do mar e o litoral paranaense. A amplitude altimétrica chega a 1.800 metros, consolidando relevo fortemente ondulado. Segundo IPARDES (1989) a serra do mar apresenta particularidades em sua porção inserida no Estado do Paraná. Isso ocorre pois se configuram algumas áreas em que as serras se sobressaem algumas centenas de metros do nível geral do planalto, com altitudes entre 1300 e 1800 metros, caracterizando duas vertentes serranas, uma ocidental, voltada para o planalto, e outra oriental voltada para o mar.

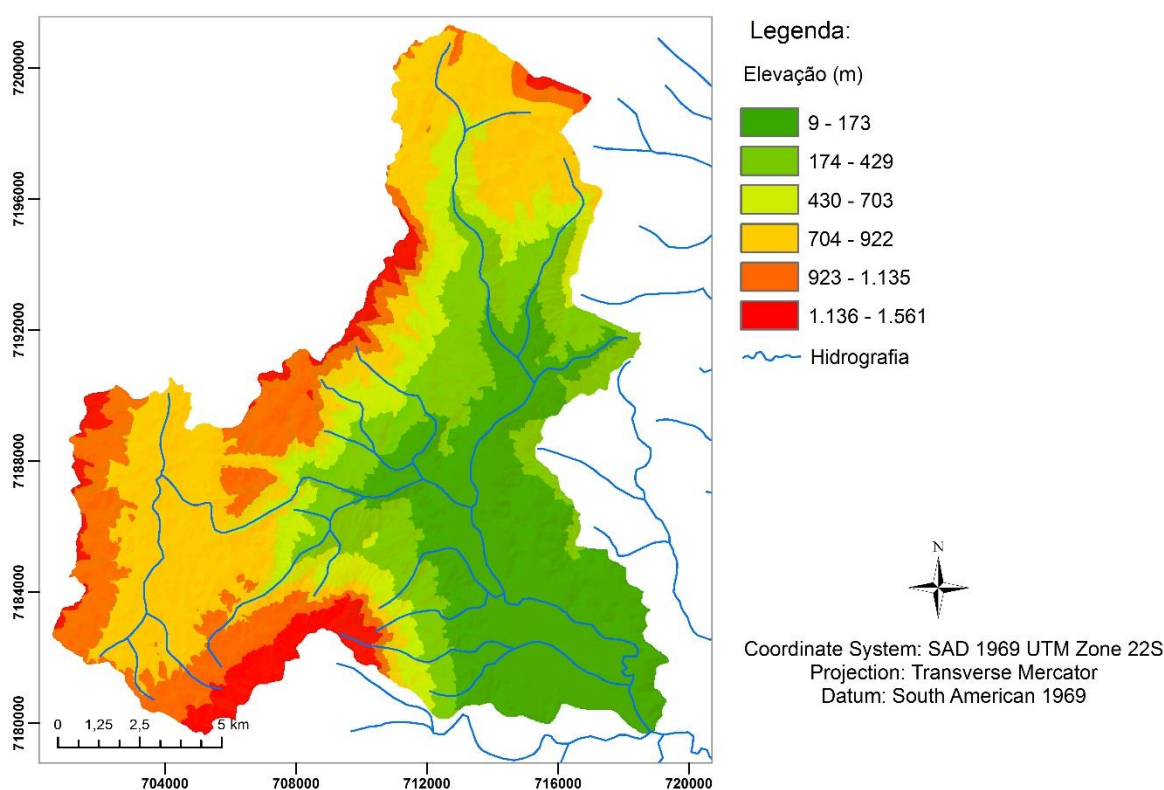
A configuração do relevo na região de serras caracteriza-se em grandes declividades, com solos pouco profundos e ocorrência de afloramentos rochosos. Ao iniciar a transição para área de planície litorânea, configuram-se áreas coluviais, onde ocorre processo de acumulação de sedimentos oriundos das partes mais altas, resultando em solos mais profundos e desenvolvidos. Próximos a essa configuração entre 10 e 40 m de altitude ocorre relevo suave ondulado com a formação de morros e colinas (IPARDES, 1989).

Para representação do relevo, foi produzido o Modelo Digital do Terreno, a partir dos dados de altimetria (AGUASPARANA, 2011), em escala 1:25.000. O MDT

foi gerado utilizando a ferramenta *topo to raster* do software ArcGIS 10.2.1, com resolução espacial de 20 metros (Figura 6).

O modelo SWAT considera o MDT para delimitação automática de bacias hidrográficas e determinação da direção de fluxo. Após a delimitação das bacias, o modelo processa a carta de declividade para consolidação das Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU's).

FIGURA 6 - MODELO DIGITAL DO TERRENO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



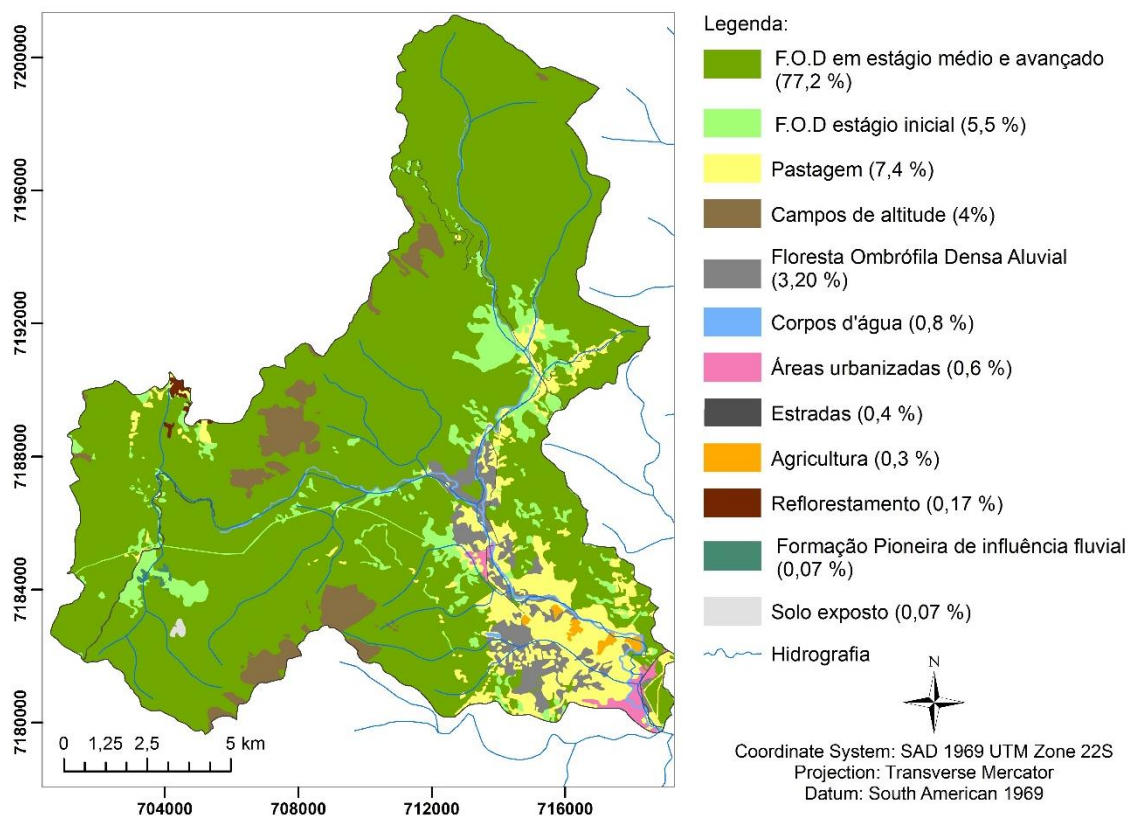
FONTE: Base cartográfica: AGUASPARANÁ (2011)

4.2.2 Uso da terra

O uso da terra na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara compreende pequenas áreas de agricultura, pastagem e áreas urbanizadas. A vegetação predominante é de floresta ombrófila densa (F.O.D) em estágio médio ou avançado de desenvolvimento, seguida de floresta aluvial, formação pioneira de influência fluvial e campos de altitude. O tipo de uso predominante da bacia é de pastagens e

comunidades urbanizadas, seguida de agricultura (Figura 7). O mapeamento de uso e vegetação foi elaborado por Brites et al. (2015), em escala 1:25.000.

FIGURA 7 - USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: adaptado de (BRITIZ, 2015)

De acordo com o Atlas dos Remanescentes da Mata Atlântica (2012), a tipologia da vegetação natural da área trata-se da Floresta Ombrófila Densa que caracteriza uma área de preservação do bioma no país. O bioma Mata Atlântica é protegido por Lei desde o ano de 2006. A Lei 11.428/2006 dispõe sobre as condições de exploração, uso e manejo, determinando limites para extensão agrícola e urbana.

A Floresta Ombrófila ocupa 77,2 % da área da bacia. De acordo com IPARDES (1989) a configuração da vegetação na serra do mar é o principal elemento de estabilização da paisagem, sendo responsável por frear o processo erosivo nas vertentes e manter o equilíbrio dinâmico da erosão em área de alta potencialidade morfogenética, devida ao clima e ao relevo fortemente ondulado. A segunda maior classe de uso da terra na bacia é a pastagem, que ocupa 7,4 % do total da área. A pastagem encontra-se concentrada na região mais baixa da bacia, próxima a áreas

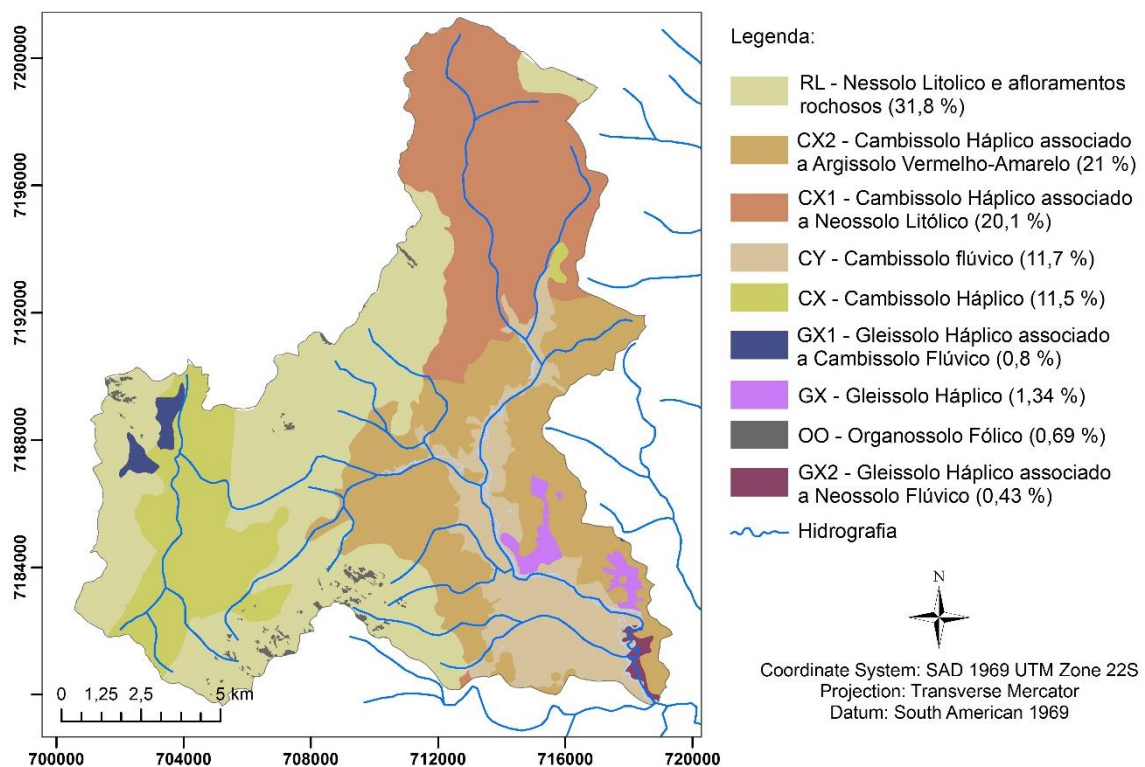
de agricultura, porém apresenta também algumas manchas em locais de relevo mais acidentado.

O modelo SWAT possui um banco de dados relativo ao uso da terra, sendo composto por parâmetros apropriados para cada tipologia de vegetação. É válido ressaltar que as áreas agrícolas não foram discretizadas de acordo com a cultura, sendo definida como área de agricultura permanente genérica e que as áreas de floresta foram definidas de acordo com seu estágio de desenvolvimento e a existência ou não de influência fluvial.

4.2.3 Aspectos pedológicos

A classificação dos solos para a região foi elaborada por Paula (2010). A referida pesquisa resultou na carta pedológica da área de drenagem da baía de Antonina em escala 1:50.000, com classificação dos tipos de solo e associações (Figura 8).

FIGURA 8 - TIPO DE SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: Adaptado de (PAULA, 2010)

Os solos que apresentam predominância na bacia hidrográfica são o Neossolo litólico e o cambissolo e associações. Conforme Paula (2010), o Neossolo encontra-se na região de serra, com relevo declivoso e vales rochosos com configuração vegetal de floresta em estágio médio e avançado, enquanto que os Cambissolos se encontram distribuídos em toda a bacia, em áreas de relevo ondulado até áreas de relevo plano e suave ondulado, com usos diversificados.

A Descrição geral sobre os solos que constituem a área de estudo, segue conforme EMBRAPA (2013):

Neossolo: compreendem solos pouco espessos (até 20 cm), que não apresentam alterações expressivas em relação ao material de origem, devido a pouca intensidade da atuação de processos pedogenéticos, em razão de características do material e/ ou em razão da influência dos fatores de formação do solo (EMBRAPA, 2013 p.96). O neossolo litólico, especificamente, caracteriza-se pela presença de horizonte A ou Hístico assentado diretamente sobre a rocha, ou sobre horizonte C ou Cr, admitindo horizonte B em início de formação, porém, cuja espessura não pode representar qualquer tipo de horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2013 p.221).

Cambissolo: De maneira geral, os cambissolos consistem em solos de pequena profundidade e alto teor de minerais primários. As características dos cambissolos variam consideravelmente de um local para outro devido à heterogeneidade do material de origem, formas de relevo e condições climáticas. Dessa forma, essa classe de solo pode compreender solos fortemente até imperfeitamente drenados, rasos a profundos, coloração de bruna ou bruna-avermelhada até vermelho escura (EMBRAPA, 2013 p. 87). A área de estudo compreende áreas de cambissolo háplico e cambissolo flúvico. O cambissolo háplico consiste em solo de horizonte B pouco desenvolvido, diferenciando-se do neossolo litólico justamente pela presença do horizonte B, sendo característico de relevos com declive. Em relação ao cambissolo flúvico, são solos desenvolvidos a partir de sedimentos aluviais, apresentando caráter flúvico em até 120 cm a partir da superfície.

Gleissolo: essa classe compreende solos hidromórficos, com horizonte glei até 50 cm a partir da superfície. Os gleissolos encontram-se permanentemente ou periodicamente saturados por água, sendo sua principal característica. Apresentam cores aczentadas, azuladas ou esverdeadas. A formação dos gleissolos está associada à sedimentos, desenvolvendo-se comumente próximo a cursos d'água e

em materiais colúvio-aluviais sujeitos a hidromorfia, ocorrendo em áreas inclinadas sob influência do afloramento de água subterrânea. Encontram-se, geralmente, sob vegetação hidrófila herbácea, arbustiva ou arbórea (EMBRAPA, 2013 p. 92). A bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara apresenta o gleissolo háplico, associado a cambissolo flúvico, e a neossolo flúvico.

Organossolo: compreendem solos pouco evoluídos, predominando material orgânico, com coloração preta ou acinzentada, que resulta da acumulação de resíduos vegetais. Esse tipo de solo pode se formar em regiões costeiras, deltas de rios e ambientes lacustres, com vegetação alto montana. O seu material de origem compõe-se de resíduos vegetais em vários estágios de decomposição (EMBRAPA, 2013 p. 99). Especificamente em relação ao organossolo fólico, presente na área de estudo, consiste em organossolos saturados em água por no máximo 30 dias consecutivos, comum em ambientes de vegetação alto-montana (EMBRAPA, 2013 P. 247).

Além da espacialização dos solos foi necessária a criação de um banco de dados específico com as características físico-hídricas para cada classe ou camada do solo (Tabela 2).

TABELA 2 - GRANDEZAS DO BANCO DE DADOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS

| Sigla | Descrição | Unidade |
|--------------|--|------------------------------|
| SNAM* | Nome do solo | - |
| NLAYER* | Número de camadas | - |
| HYDGRP* | Grupo hidrológico do solo | - |
| SOL_ZMX* | Profundidade máxima da zona de raízes | Mm |
| ANION_EXCL* | Fração da porosidade com ânions ativos | Fração |
| SOL_Z** | Profundidade da camada do solo | mm |
| SOL_BD** | Densidade aparente (úmida) | g/cm ³ |
| SOL_AWC** | Capacidade de água disponível | Mm H ₂ O/ mm solo |
| SOL_K** | Condutividade hidráulica saturada | Mm/ h |
| SOL_CBN** | Porcentagem de carbono orgânico | % peso do solo |
| CLAY** | Porcentagem de argila | % peso do solo |
| SILT** | Porcentagem de silte | % peso do solo |
| SAND** | Porcentagem de areia | % peso do solo |
| ROCK** | Porcentagem de fragmentos de rocha | % peso do solo |

| Sigla | Descrição | Unidade |
|-----------|------------------------------|---------|
| SOL_ALB** | Albedo do solo úmido | Fração |
| USLE_K** | Erodibilidade do solo (USLE) | |

FONTE: adaptado de (NEITSCH et al., 2009)

* Dados por tipo de solo ** Dados por camada de solo

Os dados relativos aos atributos físicas dos solos foram retirados do boletim do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, Tomo I e II (EMBRAPA, 1984) e de Paula (2010). As grandezas relativas a algumas propriedades hídricas do solo foram estimadas a partir de propriedades físicas conhecidas (EMBRAPA, 1984; PAULA, 2010), por meio de relações empíricas, conforme segue.

A capacidade de água disponível foi estimada de acordo com Van Den Berg et al. (2000):

$$AWC = 0,064 + 0,19.(P_{clay} + P_{silt})^2 - 2,7.10^2.P_{org}^2 \quad (4)$$

sendo: AWC a capacidade de água disponível (mm); P_{clay} a porcentagem de argila (%); P_{silt} a porcentagem de silte (%) e P_{org} a porcentagem de carbono orgânico (%).

O fator de erodibilidade do solo K_{usle} (adimensional) foi calculado de acordo com a equação de WILLIAMS (1995)

$$K_{usle} = f_{sand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{org} \cdot f_{hisand} \quad (5)$$

Em que:

$$f_{csand} = \left(0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[-0,256 \cdot P_{sand} \cdot \left(1 - \frac{P_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (6)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{P_{silt}}{P_{clay} + P_{silt}} \right)^{0,3} \quad (7)$$

$$f_{org} = \left(1 - \frac{0,25 \cdot P_{org}}{P_{org} + [3,72 - 2,95 \cdot P_{org}]} \right) \quad (8)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{P_{sand}}{100} \right)}{\left(1 - \frac{P_{sand}}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{P_{sand}}{100} \right) \right]} \right) \quad (9)$$

sendo: f_{csand} o fator de correção para solos arenosos, f_{cl-si} o fator de correção para solos com baixa erodibilidade devido as porcentagens de silte e argila, f_{org} é o fator de

correção da erodibilidade para solos com índices elevados de carbono orgânico, e f_{hisand} é o fator de correção de erodibilidade para solos com índices extremamente elevados de areia.

4.3 ANÁLISE DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

A série temporal das variáveis climáticas possui duas funções na pesquisa: fornecer dados ao programa SWAT para iniciar a modelagem do ciclo hidrossedimentológico; e servir de comparação para as projeções futuras do clima.

Primeiramente, foi realizada a análise de consistência dos dados pluviométricos para avaliar a possibilidade de utilização, em conjunto, das estações pluviométricas selecionadas no trabalho. Como a precipitação é a principal entrada de água na bacia, foi necessária a avaliação prévia dos dados para evitar erros grosseiros no modelo, como a falta de representatividade da chuva na área de estudo.

Em seguida, foram realizadas análises estatísticas dos dados históricos de precipitação e temperatura (1994 a 2014) em comparação as mesmas variáveis climáticas projetadas (2060 a 2100). Entende-se que a avaliação a priori da variabilidade e magnitude das mudanças climáticas propostas nos cenários climáticos em relação a série histórica climatológica recente é de grande importância. Pois, a análise da variabilidade pode auxiliar na compreensão das possíveis mudanças no ciclo hidrossedimentológico.

4.3.1 Caracterização geral e localização das estações climatológicas utilizadas

A série histórica de variáveis climáticas utilizadas no presente trabalho é proveniente do Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ), do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR). A rede de monitoramento selecionada compreende três estações de monitoramento, sendo uma meteorológica e três pluviométricas (TABELA 3.3) (Figura 9). As estações meteorológicas fornecem dados de temperatura atmosférica mínima e máxima do ar, (°C); radiação solar ($Mj.m^{-2}$); velocidade do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%).

TABELA 3 - ESTAÇÕES SELECIONADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA

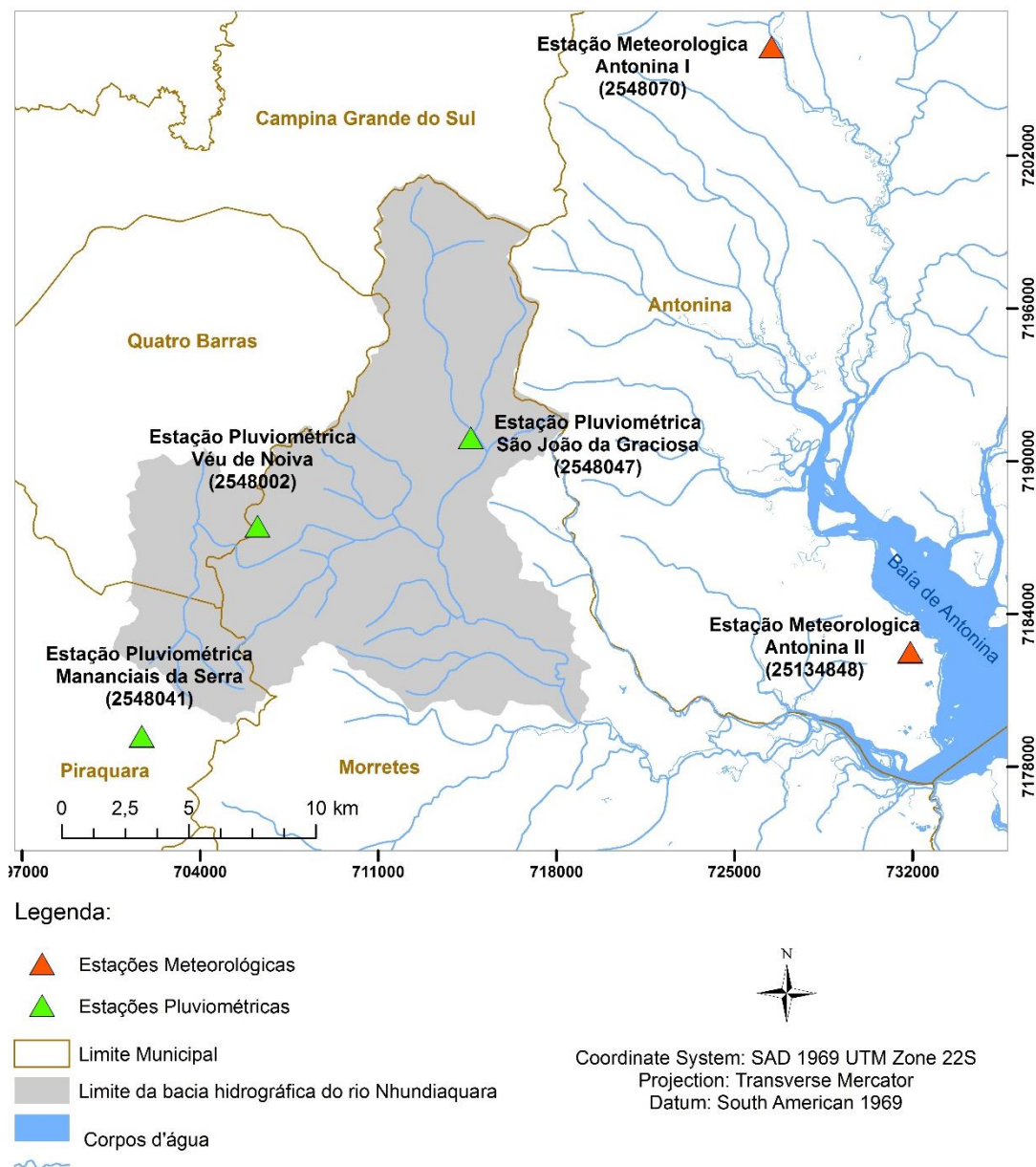
| Nome | Código | Localização | Altitude | Instalação | Fonte |
|--------------------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------------|--------------|
| Mananciais da Serra (P)* | 2548041 | 25°29'33"S 48°59'38"O | 979 m | 1916 | AGUASPARANÁ |
| São João da Graciosa (P) | 258047 | 25°23'19"S 48°51'30"O | 88 m | 1975 | AGUASPARANÁ |
| Véu de Noiva | 2548002 | 25°25'59"S 48°57'00"O | 680 m | 1940 | AGUASPARANÁ |
| Antonina I (M)** | 2548070 | 25°13'00"S 48°48'00"O | 60 m | 1975 | IAPAR |
| Antonina II (M) | 25138848 | 25°27'31"S 48°41'36"O | 60 m | 1999 | SIMEPAR |

FONTE: organizado pela autora (2016)

* (P) Precipitação

** (M) Meteorológica

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E METEOROLÓGICAS



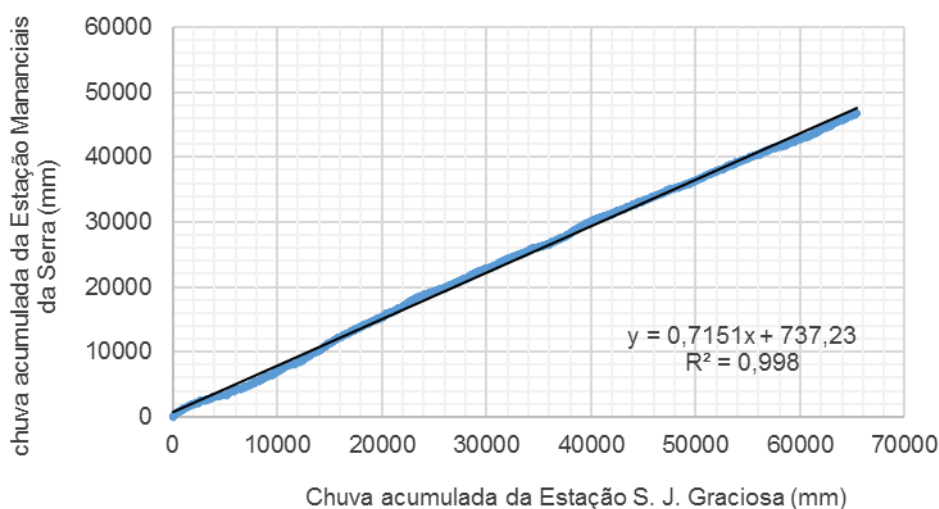
FONTE DOS DADOS: AGUASPARANÁ (2011) / SIMEPAR (2014)

4.3.2 Consistência dos dados pluviométricos

Devido a importância dos dados pluviométricos para o bom desempenho do modelo, foi realizada análise de consistência dos mesmos com o método da curva duplo-acumulativa (Santos et al., 2001) para avaliar a dispersão da chuva acumulada durante o tempo de funcionamento da estação. Também foram realizadas análises de dispersão dos dados de precipitação diária em milímetros das estações São João da

Graciosa (2548047) e Mananciais da Serra (2548041), entre o período de 1990 a 2014. A curva duplo-acumulativa resultou em gráfico linear, apontando a consistência que as estações apresentam entre si (Figura 10).

FIGURA 10 - CURVA DUPLO-ACUMULATIVA ENTRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS MANANCIAIS DA SERRA E SÃO JOÃO DA GRACIOSA



FONTE: a autora (2016)

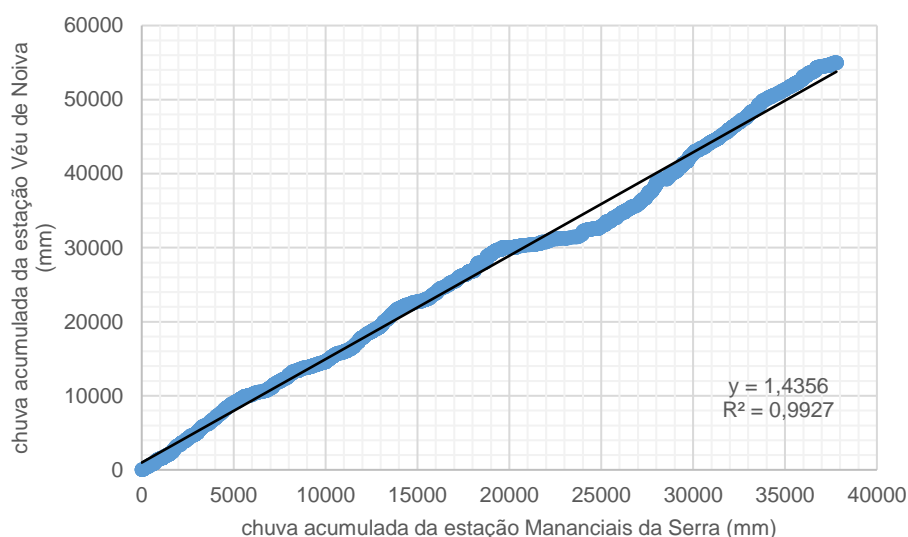
Outro aspecto relevante para consistência e análise de dados pluviométricos na região é a ocorrência do efeito orográfico, principalmente nos meses de verão. A coleta dos dados de chuvas orográficas é um desafio para o monitoramento pluviométrico, pois as chuvas ocorrem de maneira isolada em elevadas altitudes, e não são captadas pelos pluviômetros. O efeito orográfico, conforme cita Galvan et al. (2014), afeta de forma significativa o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, dificultando a calibração de modelos hidrológicos como o SWAT, uma vez que os dados de chuva monitorados não representam a realidade pluviométrica na bacia.

Os dados das estações São João da Graciosa e Mananciais da serra não são adequadas para representar chuvas orográficas de altitude, por estarem localizadas próximas da serra, onde fenômeno não ocorre de maneira isolada. Para solucionar o problema utilizou-se dados da estação Véu de Noiva, extinta em 1996, localizada a 680 metros de altitude dentro do limite da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara. A média anual de 3034 mm registrada na estação sugere a captação de eventos de

chuva orográfica isolados, caracterizando a estação com maior média pluviométrica do litoral do estado.

Assim, foi aplicada uma constante de correção aos dados da estação Mananciais da Serra (ainda em operação) utilizando os dados da estação Veu de Noiva (extinta), no objetivo de representar o efeito orográfico na bacia no período de calibração do modelo. A curva duplo-acumulativa da precipitação entre as duas estações possibilitou a adoção da constante 1,44 para correção das precipitações diárias da estação Mananciais da Serra (Figura 11).

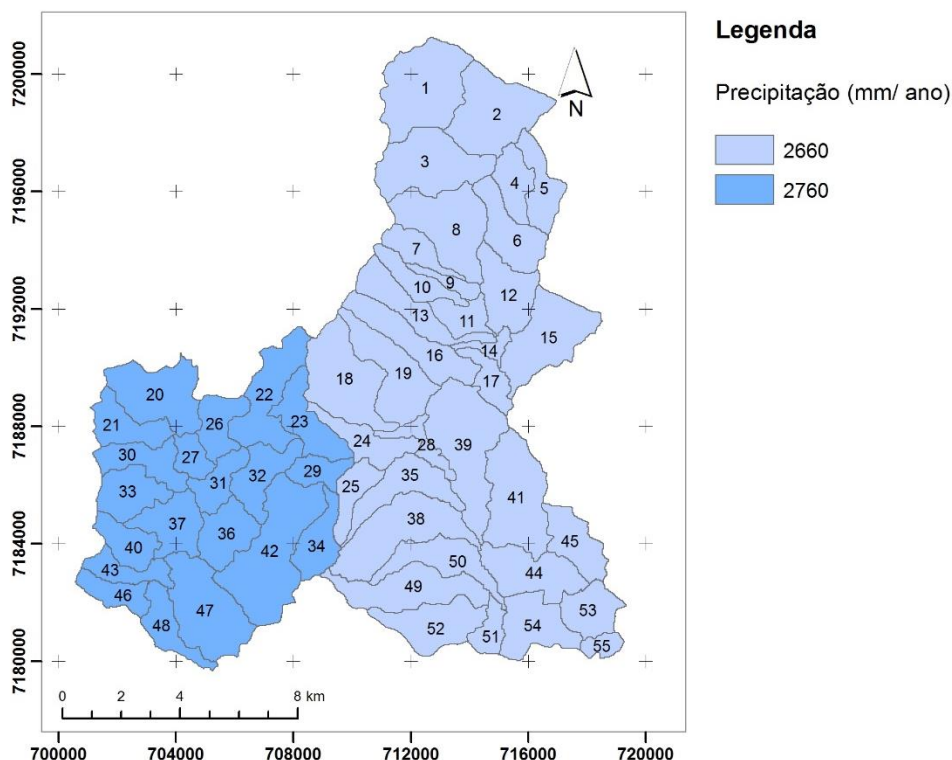
FIGURA 11 - CURVA DUPLO-ACUMULATIVA ENTRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS VÉU DE NOIVA E MANANCIAIS DA SERRA



FONTE: a autora (2016)

O modelo SWAT busca na estação pluviométrica mais próxima os dados de precipitação. Após a correção do efeito orográfico para a estação Mananciais da Serra a chuva média na bacia se estabeleceu aproximadamente entre 2660 mm e 2750 mm.ano⁻¹ (Figura 12).

FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: dados pluviométricos: ÁGUASPARANA (2014); base cartográfica ÁGUASPARANÁ (2011)

4.4 VARIABILIDADE ENTRE A SÉRIE HISTÓRICA E O CENÁRIO FUTURO RCP 8.5

Avaliando os cenários climáticos do grupo SRES (IPCC, 2000) Taveira et al. (2015) evidenciaram a falta de representatividade das variáveis climáticas em relação ao comportamento sazonal do clima na região de estudo. Assim, no presente trabalho optou-se pela avaliação do impacto do cenário RCP 8.5, desenvolvido mais recentemente (IPCC, 2013).

O cenário climático RCP 8.5 foi idealizado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, e avaliado no quinto relatório de mudanças climáticas (AR5) (IPCC, 2013). O cenário de projeções de gases de efeito estufa (GEE) RCP 8.5 foi desenvolvido com o modelo MESSAGE e método *Integrated Assessment Framework*, no Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA), localizado em Luxemburgo, na Áustria. O cenário tem como característica o aumento progressivo de emissão de GEE na atmosfera ao longo do século XXI, representando uma situação “pessimista” de alta emissão de gases estufa (RIAH et al., 2011).

As variáveis climáticas precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), temperatura mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar $\text{MJ}\cdot\text{km}^{-2}$ resultam da média dos resultados gerados por 12 modelos (Tabela 4). Os dados foram compilados e regionalizados para a América do Sul por meio do programa *WEPP/ SWAT Future Climate Input File Generator* (Trotochaud, 2014), desenvolvido na Universidade de Purdue. A utilização da média dos valores gerados por cada modelo é recomendada por Wilby et al. (2004) para utilização dos dados em estudo de impactos. A localização base para obtenção dos dados regionalizados foi dada pelo par de coordenadas da estação pluviométrica São João da Graciosa ($25^{\circ}23'19''\text{S}$; $48^{\circ}51'30''\text{O}$).

Os dados diários de precipitação e temperatura do ar (máximas, médias e mínimas) das séries históricas e cenários, foram avaliados a partir de análise conjunta da distribuição de frequência e sazonalidade. A análise foi realizada considerando as diferenças entre os valores mensais das séries histórica e futura, sendo que a série futura foi dividida em duas partes: futuro próximo (entre 2060 e 2080) e futuro distante (entre 2080 e 2100).

TABELA 4 - MODELOS GLOBAIS DE CIRCULAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS DO CENÁRIO RCP 8.5

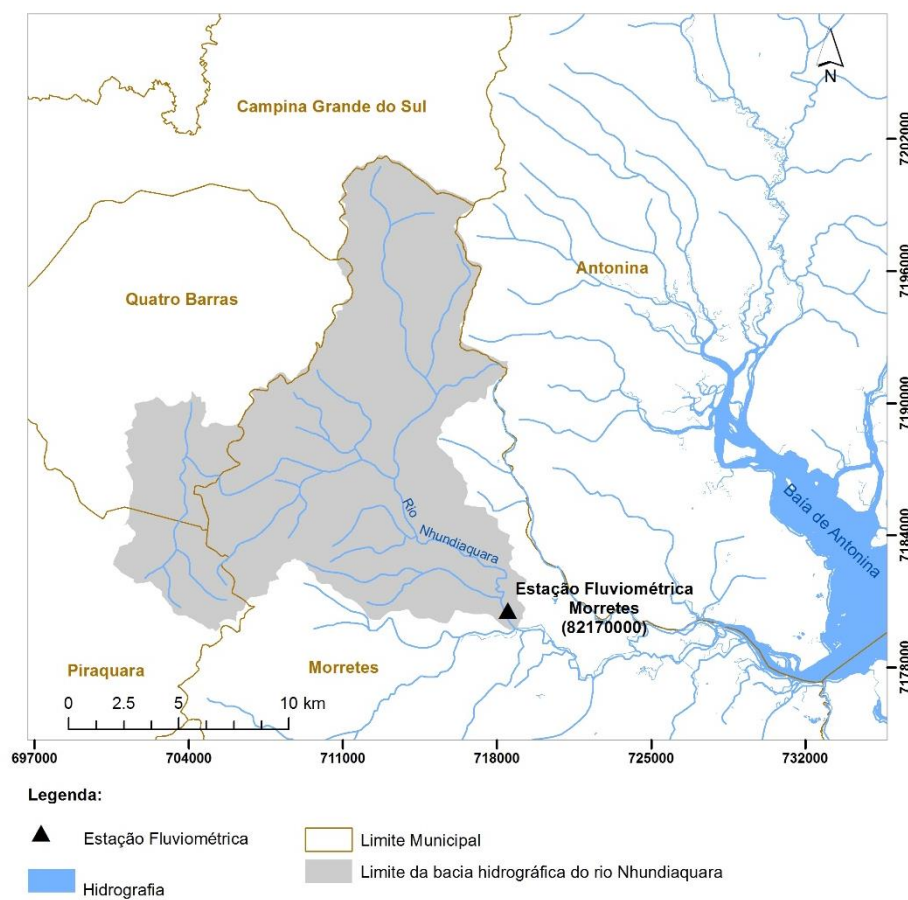
| Modelo | Referência |
|-------------------------|-----------------------|
| CSIRO-MK3-6-0 | COLLIER et al., 2011 |
| BCC-CSML- | WU et al., 2013 |
| FIO-ESM | BAO et al., 2012 |
| GFDL-CM3/ GFDL ESM2M | DUNNE et al., 2012 |
| GISSE2 H/ GISSEER R | MILLER et al., 2014 |
| IPSL CMSA-LR | DUFRES et al., 2013 |
| MIRO-C5/ MIROC-ESM-CHEM | WATANABE et al., 2011 |
| MRI CGM3 | YUKIMOTO et al., 2012 |
| NORESM1-M | BENTSEN et al., 2013 |

FONTE: organizado pela autora (2016).

4.5 VAZÃO LÍQUIDA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO NHUNDIAQUARA

A série histórica de dados fluviométricos monitorados foi necessária para calibração e validação do modelo, uma vez que os dados observados representam a tendência natural da bacia hidrográfica. Os dados referentes à vazão líquida e sólida na bacia do rio Nhundiaquara são da estação Morretes (82170000), em operação desde 1938, caracterizando a mais antiga na região da serra do mar. A estação encontra-se no rio Nhundiaquara com área de drenagem de aproximadamente 215 km² (Figura 13). Os dados provenientes da estação Morretes são: vazão líquida (m³.s⁻¹) e concentração de sedimentos em suspensão (mg.L⁻¹). A concentração de sedimentos foi disponibilizada conforme medições promovidas pelo Instituto das Águas do Paraná. A medição da concentração de sedimentos em suspensão é realizada na estação desde 1982, totalizando 119 medições até o final do ano de 2014.

FIGURA 13 - ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA MORRETES, BACIA DO RIO NHUNDIAQUARA.

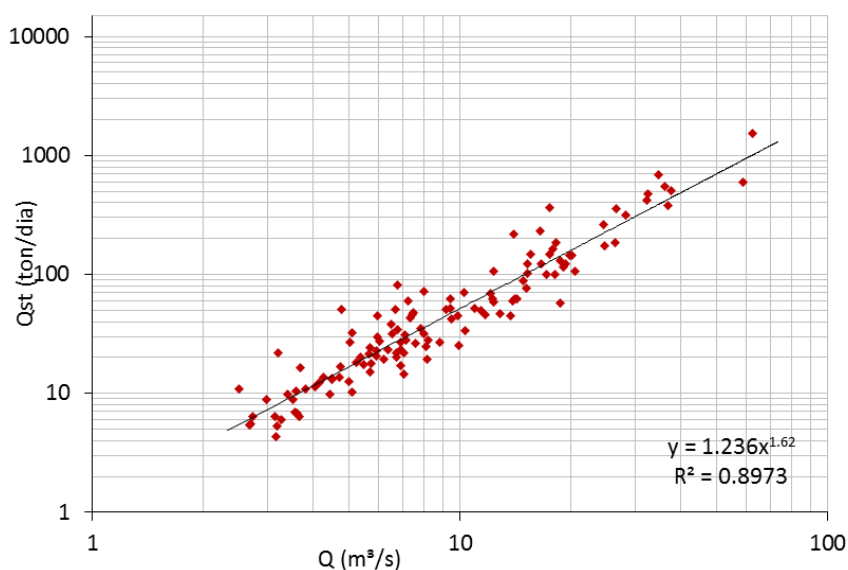


FONTE: Base cartográfica e localização da estação (AGUASPARANÁ, 2011)

A descarga s3lida total em um canal 3e composta pela carga de lavagem (*wash load*), que consiste no material fino transportado pela 3gua e carga de fundo (*bed load*), que compreende o material do leito (CARVALHO, 2008). As medi33es de sedimentos na esta33o fluviom3trica Morretes disp3em apenas do dado relativo 3 carga s3lida em suspens3o (mg.L^{-1}). Para determina33o da descarga s3lida total foi adotado o m3todo de Colby (1957), descrito por Carvalho (2008). O m3todo requer dados de descarga l3quida, velocidade e profundidade m3dias, largura da se33o e concentra33o de sedimentos em suspens3o. A descarga s3lida total (ton.dia^{-1}) resulta da soma da descarga s3lida medida (Q_{sm}) com a descarga s3lida n3o medida (Q_{nm}).

Ap3s a determina33o da descarga s3lida total, foi gerada a curva de descarga s3lida com base na vaz3o para a determina33o dos valores di3rios em toneladas por dia (Figura 14).

FIGURA 14 - CURVA DE DESCARGA S3LIDA DA ESTA33O MORRETES (82170000)



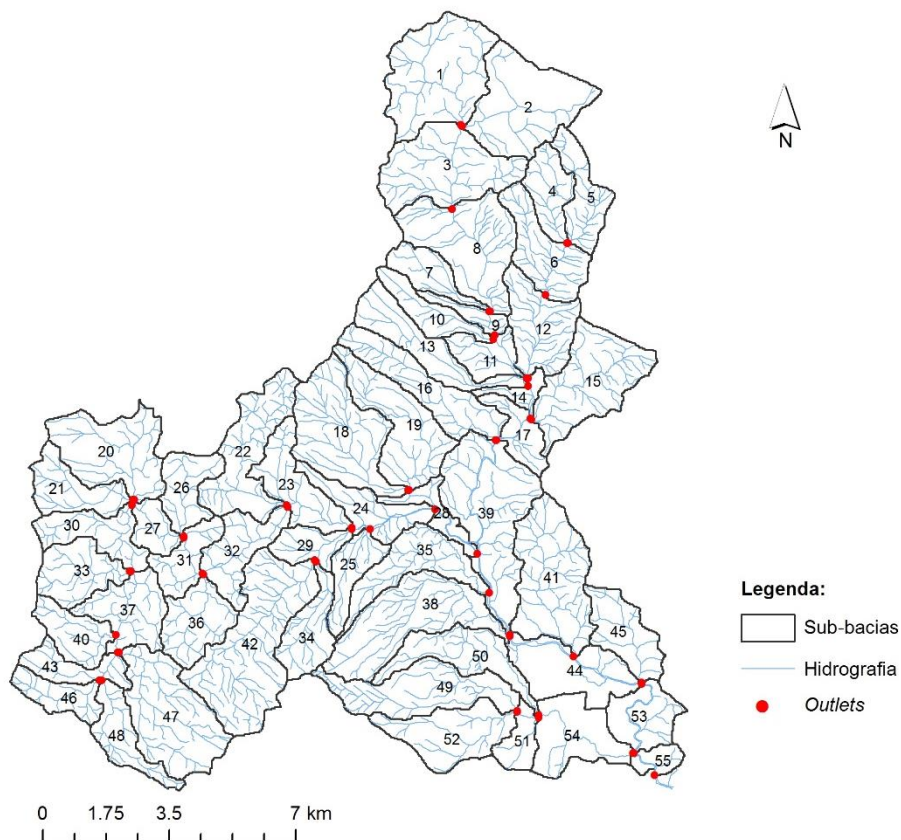
FONTE: a autora (2016)

4.6 APLICA33O DO MODELO SWAT: SUB-BACIAS E UNIDADES DE RESPOSTA HIDROL3GICA

A parametriza33o espacial do modelo tem base na divis3o da bacia hidrogr3fica em sub bacias. A divis3o foi feita a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT). As sub bacias foram compartimentadas em unidades de resposta hidrol3gica (*Hydrologic Response Units -HRU*) que consistem em uma combina33o 3nica de

características físicas da área (relevo, solo, uso da terra). Os processos foram simulados primeiramente para cada HRU, que agregadas formam as sub-bacias. Posteriormente, os fenômenos foram modelados em cada sub-bacia e propagados até o exutório (*outlet*). No presente trabalho a bacia foi subdividida em 1334 unidades de resposta hidrológica, e 55 sub-bacias com área média de 3,84 km² (Figura 15).

FIGURA 15 - SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: a autora (2016)

4.7 EQUACIONAMENTO DO MODELO SWAT

O ciclo hidrológico considerado pelo modelo é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (10)$$

sendo: SW_t armazenamento final de água do solo (mm H₂O); SW_0 a armazenamento inicial de água do solo (mm H₂O); t o tempo (dias); R_{day} a precipitação no dia i (mm H₂O); Q_{surf} o escoamento superficial no dia i (mm H₂O); E_a a evapotranspiração no dia

i (mm H₂O); w_{seep} a percolação no dia i (mm H₂O) e Q_{gw} o fluxo de retorno no dia i (mm H₂O).

O modelo SWAT disponibiliza três métodos para estimar a evapotranspiração potencial: *Penman-Monteith*, *Priestley-Taylor* e *Hargreaves*. No presente trabalho foi adotado o método *Hargreaves* (1985), uma vez que as variáveis climáticas necessárias nesse método condizem com as variáveis disponíveis no cenário climático RCP. 8.5.

O método é dado por:

$$\lambda E_0 = 0,0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{min})^{0,5} (\bar{T}_{av} + 17,8) \quad (11)$$

sendo: λ o calor latente de vaporização (MJKg⁻¹), E_0 a evapotranspiração potencial (mm.dia⁻¹), H_0 a radiação extraterrestre (MJ/m²/dia), T_{mx} a temperatura máxima do ar para um dado dia (°C), T_{min} é a temperatura mínima do ar para um dado dia (°C) e T_{av} é a temperatura média do ar para um dado dia.

Para a determinação do escoamento superficial diário o SWAT utiliza o método curva número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS). O modelo determina a quantidade de chuva que escoar pela superfície em determinada área em função do uso da terra, do tipo de solo e do grupo hidrológico do solo (ZHANG e HUANG, 2004).

$$Q_{surf} = \left(\frac{R_{day} - 0,2S}{R_{day} + 0,8S} \right)^2, R_{day} > I_a \quad (12)$$

sendo: Q_{surf} o escoamento superficial diário (mm); R_{day} a precipitação diária (mm) I_a índice comumente associado a 0,2 e S o parâmetro de retenção (mm).

A erosão causada pela chuva e pelo escoamento superficial é calculada pela equação universal de perda de solo modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1995), na qual o fator de erosividade da chuva da equação universal de perda de solo (USLE) (WISCHEMEIER e SMITH, 1978) foi substituído pelo fator de escoamento, melhorando a projeção da produção de sedimento.

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (13)$$

sendo: sed a produção de sedimento no dia (t/dia⁻¹); Q_{surf} o escoamento superficial (mm/ha); q_{peak} a taxa de escoamento de pico (m³.s⁻¹); $area_{hru}$ a área de drenagem da sub-bacia ou unidade de resposta hidrológica (ha); K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo; C_{USLE} o fator de uso e manejo do solo; P_{USLE} o fator de práticas

conservacionistas; LS_{USLE} o fator topográfico e $CFRG$ fator ligado a rugosidade da superfície inversamente proporcional a pedregosidade do solo. As demais equações utilizadas no modelo são encontradas em Neitsch et al. (2009).

4.7.1 Calibração e análise de sensibilidade do modelo SWAT

No modelo SWAT o processo de calibração divide-se nas seguintes categorias: (1) escoamento superficial e de base; (2) sedimentos; (3) nutrientes e (4) pesticidas (ARNOLD et al., 2012). Considerando que o objetivo do presente trabalho é avaliar a sensibilidade da vazão líquida e sólida à mudanças no sistema climático, foram ajustados apenas parâmetros relativos ao escoamento e sedimentos.

De acordo com Grieseven (2005) os parâmetros que controlam o escoamento são dominantes e seus valores também têm influência no ciclo dos sedimentos e qualidade da água. Dessa forma, primeiramente foi realizada a calibração dos parâmetros de escoamento.

Os parâmetros mais relevantes para o processo de escoamento identificados por Arnold et al. (2012); Lenhart et al. (2002); Santos et al. (2005); Gibertoni et al. (2009); Arnold et al. (2012) e Srinivasan (2014), foram submetidos à análise de sensibilidade global, realizada por meio do *software* SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs*) (ABBASPOUR, 2015).

Após o ajuste dos parâmetros para escoamento, foi realizado novamente o processo de auto calibração para a simulação da formação e transporte de sedimentos. Os principais parâmetros relacionados ao sedimento foram selecionados conforme Schultz et al. (2010); Gibertoni et al. (2009); lensen et al. (2014); Srinivasan (2014).

Os parâmetros mais sensíveis foram ajustados por auto calibração, utilizando o *software* SWAT-CUP através do método estatístico SUFI-2 (ABBASPOUR, 2015). O método permite buscar o valor de parâmetros, dentro de determinado intervalo, que possibilite a simulação que melhor se ajuste aos dados do sistema natural, representados pelos dados de monitoramento.

O ajuste dos parâmetros também está relacionado à escala de tempo da calibração. Primeiramente é recomendável realizar a calibração do modelo com base em dados de média mensal, para então realizar a calibração diária, caso seja o objetivo do trabalho. A representação diária dos processos está intimamente ligada

com a qualidade de dados de monitoramento, e pode tornar-se complexa ou inviável quando a rede de monitoramento de dados climáticos é insuficiente (SRINIVASAN, 2014).

Para avaliação da eficiência do modelo SWAT em representar as condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara foram utilizados métodos estatísticos, bem como análise visual do fluviograma e sedimentograma. De acordo com Moriasi et al. (2007) os principais testes utilizados na avaliação do desempenho do modelo SWAT são: *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) (NASH AND SUTCLIFFE, 1970), *Percent Bias* (PBIAS) e *RMSE-observations standart deviation ratio* (RSR) (MORIASI et al., 2007).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar de $-\infty$ a 1,0, sendo 1 o ajuste perfeito. De acordo com Moriasi et al. (2007) valores entre 0.0 e 1.0 geralmente representam níveis aceitáveis da performance do modelo. Valores abaixo de 0.0 indicam uma performance insuficiente. O coeficiente de *Nash-Sutcliffe* é obtido por meio de:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{med})^2} \right] \quad (14)$$

sendo: y_{obs} = valor do evento observado no dia i , Y_{sim} valor do evento simulado no dia i e Y_{med} média dos eventos observados.

O coeficiente PBIAS mede a tendência média do dado simulado em superestimar ou subestimar os dados observados. Valores do percentual PBIAS mais próximos de 0 indicam melhor eficiência do modelo, sendo 0,0 indicativo de ajuste perfeito. O coeficiente é medido por:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (15)$$

O índice RSR é medido baseando-se no desvio padrão dos dados observados. Comumente, valores mais baixos de RSR indicam boa performance do modelo, sendo o valor zero indicativo de melhor ajuste. O índice RSR é dado por:

$$RSE = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{med})^2} \right]} \quad (16)$$

Moriasi et al. (2007) apresentam intervalos de valores que indicam diferentes níveis de eficiência do modelo SWAT na escala de tempo mensal (Tabela 5).

TABELA 5 – INTERVALOS DE VALORES PARA MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT EM ESCALA DE TEMPO MENSAL

| Performance | RSR | NSE | PBIAS (%) | |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Sedimento | Vazão |
| Muito bom | 0,00 ≤ RSR ≤ 0,50 | 0,75 ≤ NSE ≤ 1,00 | PBIAS < ±10 | PBIAS < ±15 |
| Bom | 0,50 < RSR ≤ 0,60 | 0,65 < NSE ≤ 0,75 | ±10 ≤ PBIAS < ±15 | ±15 ≤ PBIAS < ±30 |
| Satisfatório | 0,60 < RSR ≤ 0,70 | 0,50 < NSE ≤ 0,65 | ±15 ≤ PBIAS < ±25 | ±30 ≤ PBIAS < ±55 |

FONTE: Adaptado de (MORIASI et al., 2007).

Para calibração e verificação do modelo a série de dados de monitoramento foi separada em dois períodos. No período de calibração, entre 1994 e 2004 os parâmetros de entrada do modelo relativos ao escoamento e a sedimentos foram variados até a obtenção de ajuste aceitável entre a simulação e a série histórica de vazão líquida e sólida. No período de verificação, os parâmetros definidos na calibração foram utilizados para a verificação do ajuste do modelo, validando a sua utilização (Tabela 6).

TABELA 6 – PERÍODO DA SÉRIE HISTÓRICA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

| Operação | Período |
|-----------------------|-------------------------|
| Calibração do modelo | 01/01/1994 a 31/12/2004 |
| Verificação do modelo | 01/01/2005 a 31/12/2014 |
| Série de dados | 01/01/1990 a 31/12/2014 |

FONTE: organizado pela autora (2016)

O período inicial, entre 1990 e 1994, foi utilizado aquecimento, tendo em vista a incerteza quanto às condições iniciais do modelo, tais como umidade inicial, crescimento de plantas, entre outros. O período de aquecimento é importante para realizar o ajustamento dos parâmetros para as condições da área de estudo (ARNOLD et al., 2012).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

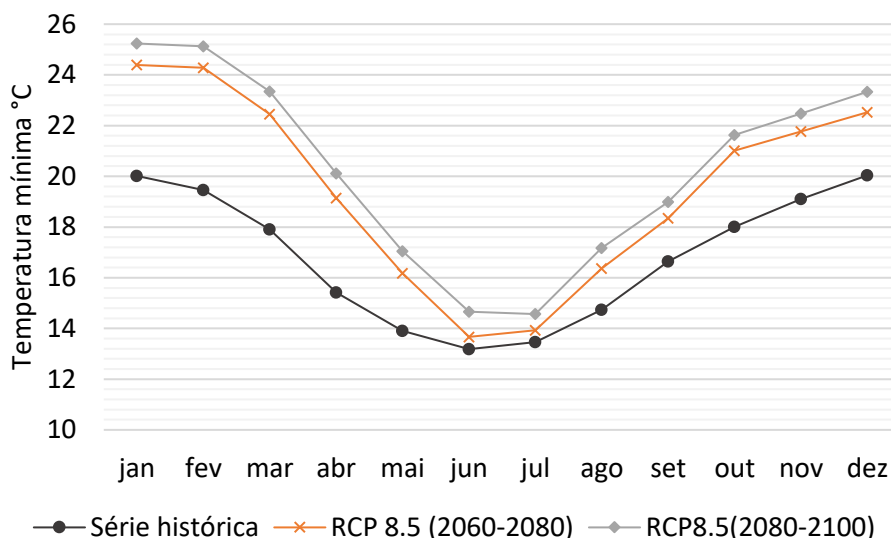
5.1 ANÁLISE DE VARIABILIDADE DA TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO DO CENÁRIO RCP 8.5 (IPCC, 2013) EM RELAÇÃO ÀS SERIES HISTÓRICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.

5.1.1 Temperatura

A variação na temperatura mínima entre a série histórica e os períodos futuros é a mais representativa das variáveis analisadas. A projeção futura representada pelo cenário RCP 8.5 aponta aumento de 15,93% na média da temperatura mínima para o futuro próximo (2060-2080), e, no futuro distante (2080-2100) o aumento previsto é de 20,70%. O comportamento sazonal da temperatura mínima no cenário RCP 8.5 é compatível com o período de referência, concentrando os valores mais baixos nos meses de outono e inverno. No inverno, o aumento da temperatura mínima é de 14,79% e 20,63% nos cenários de futuro próximo e futuro distante, respectivamente. No verão e primavera, o aumento da temperatura mínima é de 16,83% e 20,76% para o futuro próximo e distante (Figura 16).

Nas pesquisas que utilizam o cenário RCP 8.5 para fins de avaliação de impacto, é possível encontrar resultados diversos em relação ao aumento da temperatura mínima. Hyuk et al. (2012) evidenciaram o seu aumento expressivo em relação ao aumento da temperatura máxima no cenário RCP 8.5 ao longo do século XXI, para região Sul do Japão. Outros resultados foram encontrados por Oliveira et al. (2015) que avaliaram o cenário RCP 8.5 em bacia hidrográfica de cabeceira, no estado de Minas Gerais. Os resultados apontaram a variação mais expressiva da temperatura máxima ao longo do século, apresentando aumento gradativo até o ano de 2099, sendo até 61% maior do que na temperatura mínima. Os resultados apontam que as variáveis climáticas baseadas no cenário RCP 8.5 não são homogêneas, apresentando diferentes configurações de acordo com a área para qual foram regionalizados.

FIGURA 16 - SAZONALIDADE DA TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA (1994-2014) E NO CENÁRIO FUTURO RCP 8.5 PRÓXIMO (2060-2080) E DISTANTE (2080-2100)

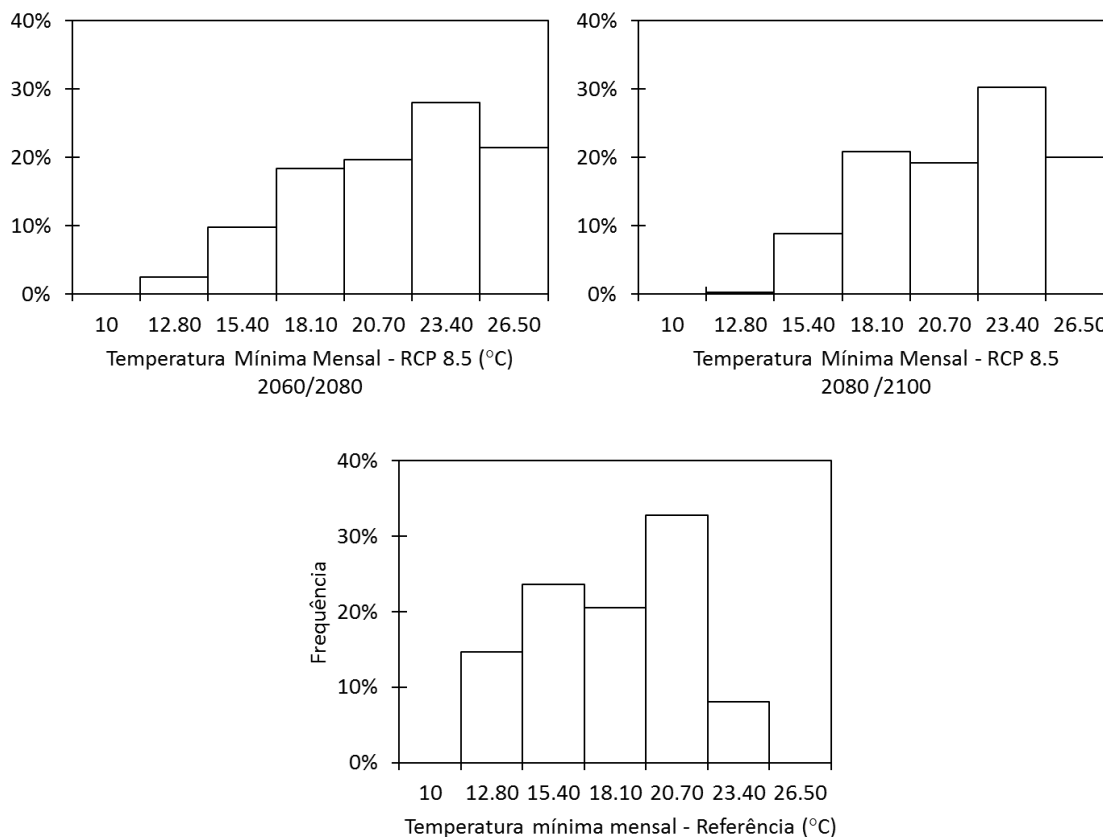


FONTE: a autora (2016)

A distribuição de frequência da temperatura mínima média mensal do cenário RCP 8.5 também apresentou variação significativa em relação ao período de referência. No período de referência, há ocorrência de temperatura mínima entre 10°C e 12,8°C em até 14% do tempo. Na projeção climática futura, temperaturas entre 10°C e 12,8°C ocorrem em apenas 2,5% do tempo durante os 20 anos projetados para o futuro próximo. Valores entre 18,10°C e 20,70°C foram mais comuns entre a média mensal de temperaturas mínimas no período de referência, ocorrendo em até 32% do tempo. Na projeção para o futuro próximo, a maior ocorrência se dá entre 20,70°C e 23,40°C, em 28% do tempo.

Em relação ao período do futuro distante, a ocorrência de temperaturas mínimas médias mensais de até 12,8°C diminui para menos de 1%, e a ocorrência de temperaturas entre 20,70°C e 23,4°C aumenta para 30,28% (Figura 17).

FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA MENSAL PARA O CENÁRIO RCP 8.5 E PERÍODO DE REFERÊNCIA

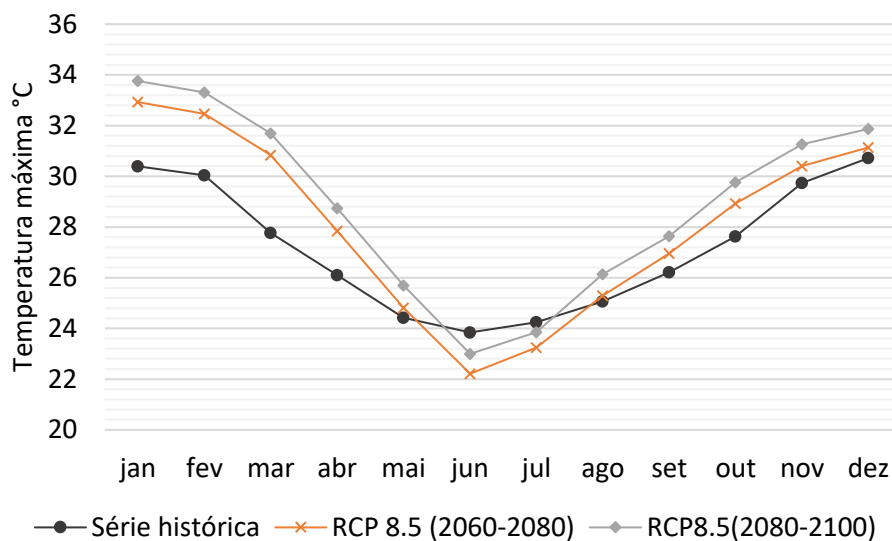


FONTE: a autora (2016)

A variação nas temperaturas médias máximas do cenário RCP 8.5 em relação ao período histórico foi pouco significativa, se comparada à variação na temperatura mínima. O aumento representado para essa variável no cenário RCP 8.5 para o futuro próximo foi da ordem de 3,34%, enquanto que, para o futuro distante, o aumento foi de 6,30%. A sazonalidade da temperatura média máxima prevista para o futuro também seguiu a tendência do período de referência (Figura 18).

A temperatura projetada para o cenário RCP 8.5 nos meses de junho e julho encontra-se abaixo do valor para os mesmos meses no período de referência. Os valores contribuíram para que a variação na temperatura máxima fosse menor do que na mínima. Os aumentos da temperatura média máxima para o inverno e outono no cenário RCP 8.5 são de 1,86% e 5,06% em relação à série histórica no futuro próximo e distante, respectivamente.

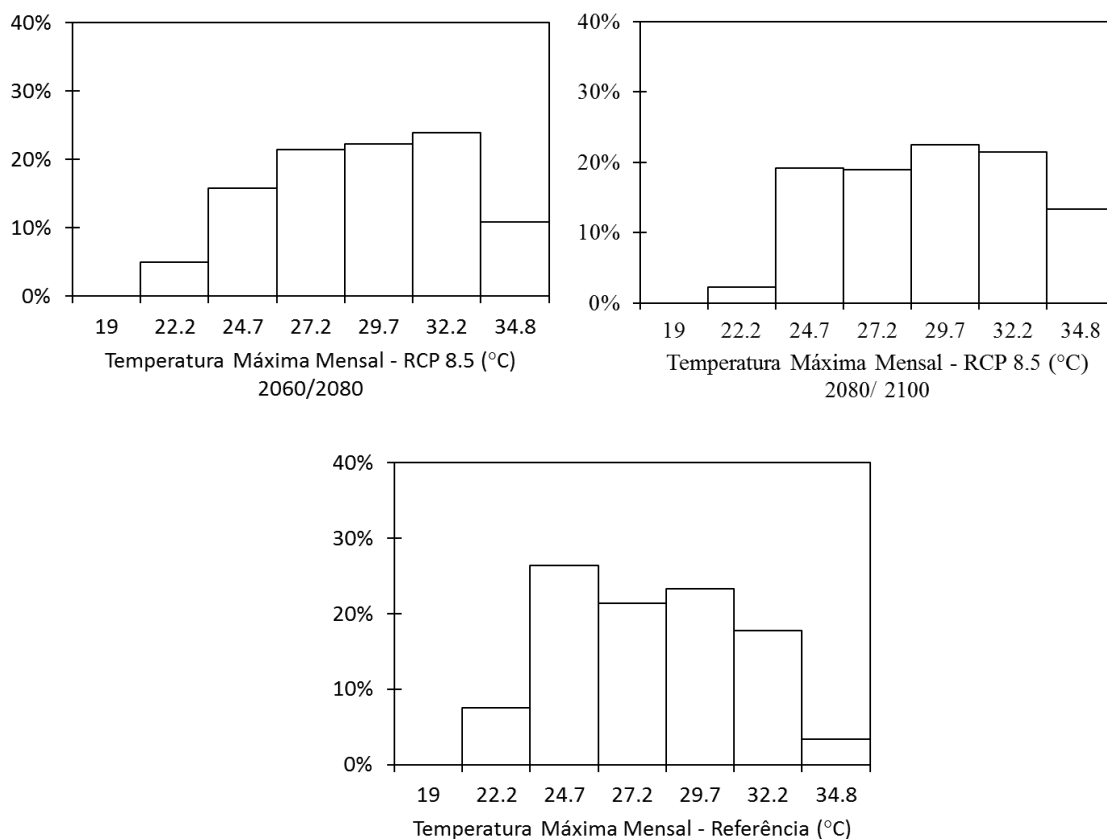
FIGURA 18 - SAZONALIDADE DA TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA (1994-2014) E NO CENÁRIO FUTURO RCP 8.5 PRÓXIMO (2060-2080) E DISTANTE (2080-2100).



FONTE: a autora (2016)

A distribuição de frequência da temperatura máxima mensal apontou aumento na ocorrência de temperaturas altas, entre 32,2 °C e 34,8°C no cenário RCP 8.5 em relação ao período de referência. No período de referência, temperaturas dessa magnitude ocorrem em 3,33% do tempo. Nos períodos futuro próximo e distante, a ocorrência foi de 10,83% e 13,33%, respectivamente (Figura 19).

FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA MENSAL PARA O CENÁRIO RCP 8.5 E PERÍODO DE REFERÊNCIA

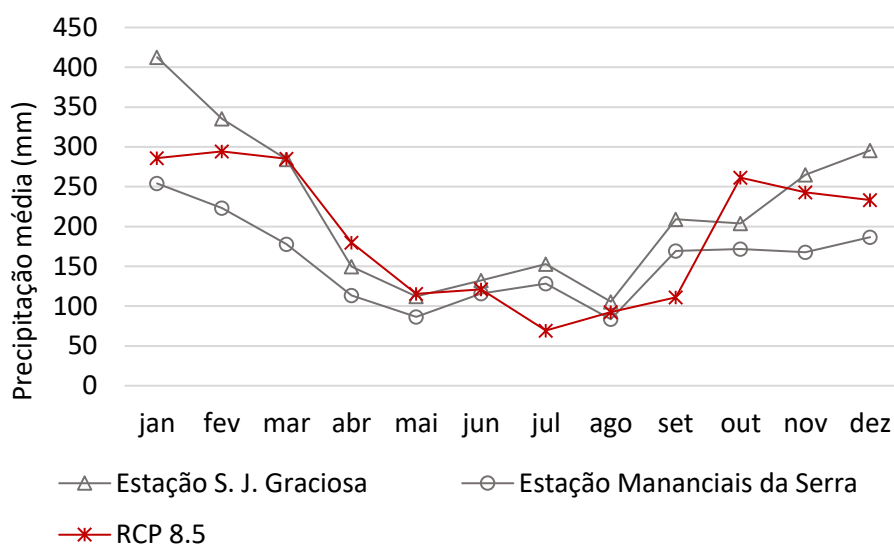


FONTE: a autora (2016)

5.1.2 Precipitação

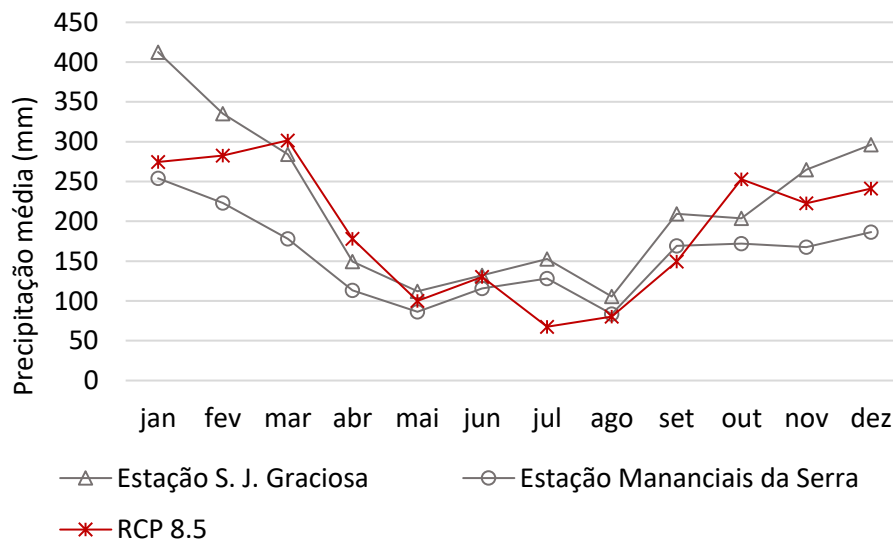
Houve redução da precipitação média nos dois períodos futuros em relação ao período de referência. Notou-se que a precipitação no cenário RCP 8.5 nos dois períodos analisados acompanhou a sazonalidade dos eventos históricos, contudo, apresentou valores mais baixos de precipitação nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, meses de ocorrência mais intensa do efeito orográfico na região (Figuras 20 e 21).

FIGURA 20 - SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E NO CENÁRIO FUTURO PRÓXIMO (2060-2080)



FONTE: a autora (2016)

FIGURA 21 - SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E NO CENÁRIO FUTURO DISTANTE (2080-2100).



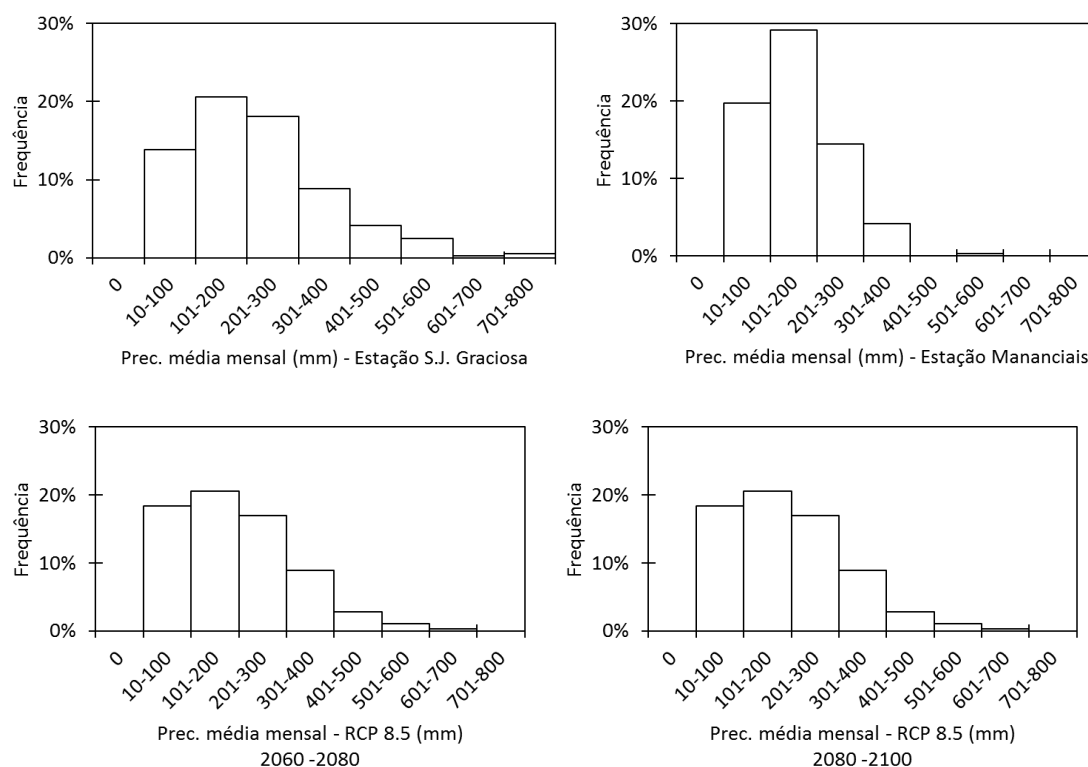
FONTE: a autora (2016)

A distribuição de frequência da precipitação (Figura 22) evidenciou a similaridade entre os dados projetados no cenário RCP 8.5 e dos dados da estação pluviométrica São João da Graciosa. Notou-se aumento da frequência de baixas precipitações pluviométricas no cenário nos dois períodos futuros propostos. Na estação São João da Graciosa a ocorrência de precipitação pluviométrica entre 10

e 100 mm ocorreu em 13% do tempo. No cenário futuro a ocorrência foi de 17,22% para o futuro próximo e de 18,33% para o futuro distante.

A estação Mananciais da Serra apresentou distribuição diferenciada em relação às demais, com maior ocorrência de valores entre 101 e 200 mm (29,17%) contra 23,1% e 20,56% para o cenário futuro em ambos períodos.

FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PARA AS ESTAÇÕES SÃO JOÃO DA GRACIOSA, MANANCIAIS DA SERRA E CENÁRIO RCP 8.5



FONTE: a autora (2016)

Comumente a utilização de cenários climáticos pessimistas em relação à emissão de GEE na atmosfera está associada à ocorrência de eventos pluviométricos extremos em comparação com as séries históricas, conforme descreve de Perazolli et al. (2012). Contudo, os cenários pluviométricos projetados para o futuro apresentaram menor ocorrência de eventos extremos do que a série histórica. No período entre 1994 e 2014 houve a ocorrência de três meses com precipitação média acima de 580 mm, totalizando 0,7% de frequência. No cenário RCP 8.5 a ocorrência de meses com precipitação média dessa magnitude foi de 0,28%, com apenas uma ocorrência no período entre 2060 e 2080, no cenário futuro distante não houve ocorrência de meses

com precipitação média acima de 580 mm. O mesmo resultado foi encontrado por lensen et al. (2014), que identificou a redução de eventos extremos e o aumento da frequência de chuvas menos intensas sob influência do cenário B1 do SRES. (NAKICENOVIC, N. e SWART, R, 2000) na bacia hidrográfica do rio Apucarantina, norte do Paraná.

Em relação à ocorrência de eventos extremos de precipitação na bacia, foi possível inferir sobre a influência do efeito orográfico na região. Apesar de as séries das estações São João da Graciosa e Mananciais da Serra não representarem a totalidade do fenômeno nas vertentes mais íngremes da área de estudo, o alto volume de precipitação é típico da região da serra do mar paranaense, que, de acordo com Paula (2010), configura uma das regiões com índices pluviométricos mais altos do Brasil.

5.2 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.

A calibração do modelo foi realizada com o ajuste de sete parâmetros resultantes da análise de sensibilidade. Os parâmetros, os limites adotados na análise de sensibilidade e os valores ajustados podem ser observados na Tabela 7.

TABELA 7 - VALOR ADOTADO PARA OS PARÂMETROS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO

| Parâmetros | Descrição | Intervalo calibração | Valor |
|-------------------|--|-----------------------------|-----------------------|
| Alpha_bf(v) | Constante de recessão. Índice que evidencia a taxa em que a água subterrânea retorna ao solo. (dias) | 0 - 1 | 0,342 |
| Gw_revap(v) | Coeficiente que controla o fluxo da água da zona saturada para a zona não saturada | 0,02 – 0,2 | 0,037 |
| Sol_awc(r) | Capacidade de água disponível para as plantas em cada camada do solo. (mm) | -0,05 – 0,05 | 0,011 |
| Canmx(r) | Intercepção máxima da vegetação (mm) | 0 - 10 | FRST 3,98 AGRL 0,7 |
| Revapmn(v) | Profundidade de água no aquífero para que ocorra percolação (mm) | 0 - 500 | 200 |
| Usle_P(v) | Fator relativo à práticas de conservação | 0,4 – 0,75 | 0,2 |

| Parâmetros | Descrição | Intervalo calibração | Valor |
|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Slope(r) | Declividade média da bacia m/m | 0 – 0,25 | 0,15 |

(v) – valor substituído; (r) – valor multiplicado

FONTE: a autora (2016)

O resultado da calibração foi satisfatório de acordo com os valores obtidos nos índices de eficiência calculados (Tabela 8).

TABELA 8 – ÍNDICES DE EFICIÊNCIA OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA E SÓLIDA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA

| Período | Vazão | | | Sedimento | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|------------------|-------|--------|
| | NSE | RSR | PBIAS | NSE | RSR | PBIAS |
| Calibração | 0,692 | 0,555 | 5,754 | 0,704 | 0,544 | -6,589 |
| Verificação | 0,672 | 0,573 | 6,589 | 0,571 | 0,655 | -3,93 |

FONTE: a autora (2016)

Os índices apontaram a capacidade do modelo para representar os processos hidrossedimentológicos na área de estudo. Assim, a performance do modelo pode ser avaliada entre boa e muito boa de acordo com os intervalos de valores propostos por Moriasi et al. (2007). Dessa forma, entende-se que o modelo é adequado para simular cenários futuros.

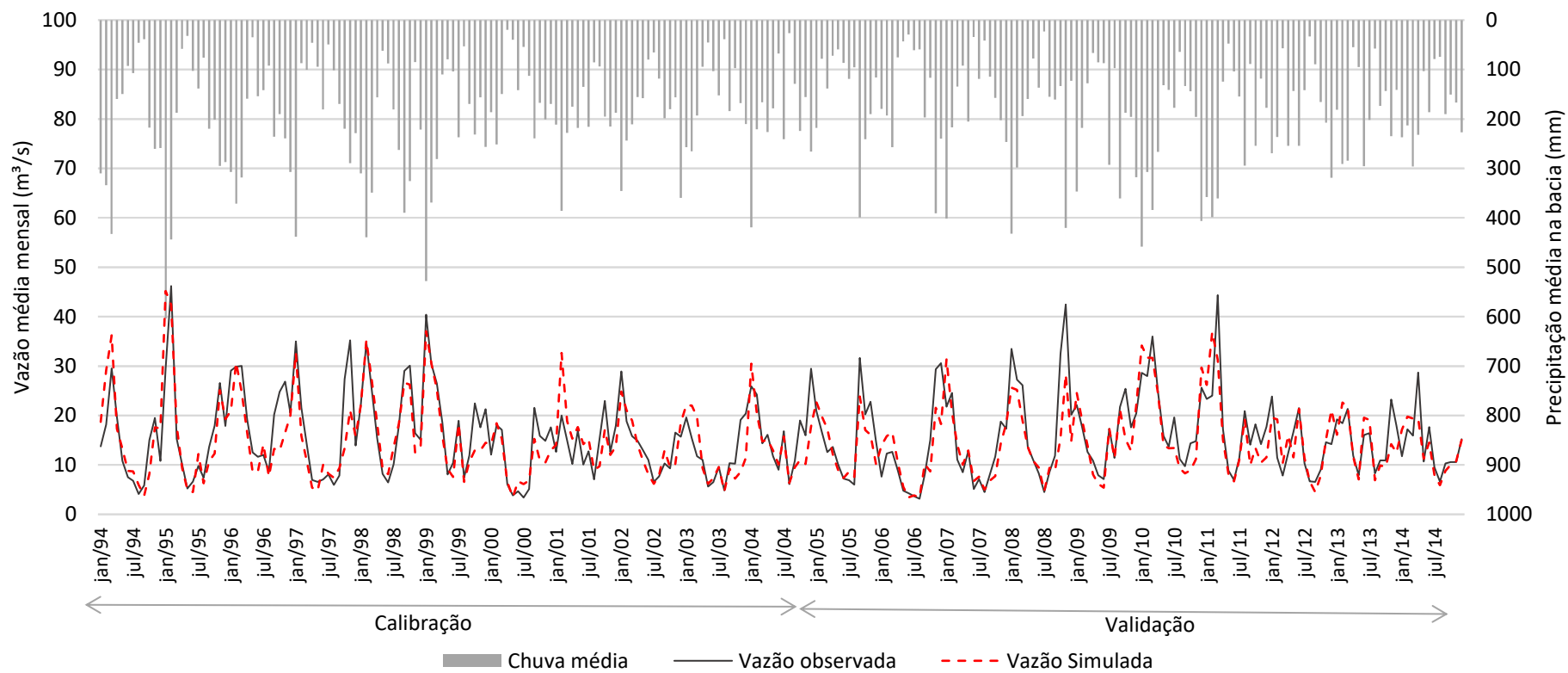
De acordo com Hunke (2015), a disponibilidade de cenários climáticos futuros com séries longas (maiores que 10 anos) possibilita a avaliação de impacto, uma vez que permite avaliar o resultado da média de vários anos, não tomando como base apenas eventos isolados.

5.2.1 Vazão

A vazão mensal simulada possui boa concordância com as vazões líquidas observadas (Figura 23). O modelo respondeu a todos os eventos de precipitação, e, ainda que houvesse momentos em que a vazão foi subestimada ou superestimada, de maneira geral e conforme atestam os índices de eficiência, os resultados da simulação da vazão líquida foram satisfatórios.

O modelo respondeu melhor aos eventos com maior precipitação pluviométrica, não estimando adequadamente os picos de vazão que ocorreram nos períodos de estiagem. Por outro lado, os picos de vazão que ocorreram nos meses de verão tenderam a ser subestimados pelo modelo. Logo, pode-se considerar que, apesar da aplicação da constante para correção do efeito orográfico, a precipitação medida da bacia não representou a potencialidade do efeito, cuja consequência é visível no fluviograma. De maneira geral, a vazão simulada no modelo foi levemente subestimada em relação aos dados observados.

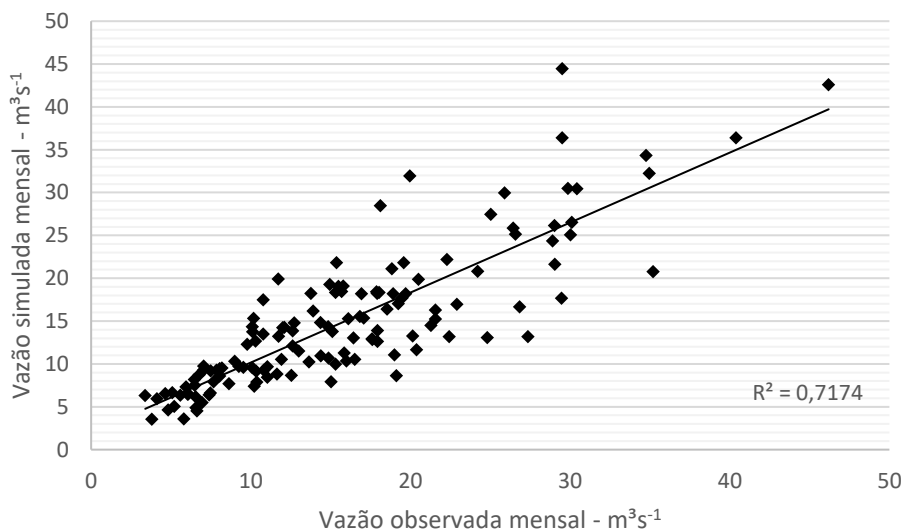
FIGURA 23 - VAZÃO MENSAL OBSERVADA E SIMULADA NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO



FONTE: a autora (2016)

Na análise de regressão linear a correlação entre as vazões mensais observadas e simuladas para todo o período estudado, obteve um coeficiente de determinação $R^2 = 0,7174$ (Figura 24).

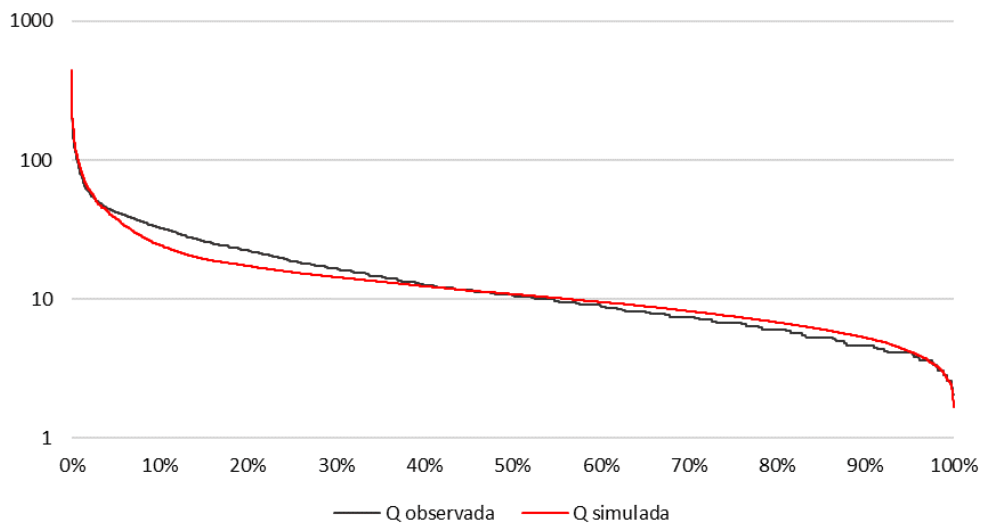
FIGURA 24 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE VAZÃO LÍQUIDA MENSAL OBSERVADA E SIMULADA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: a autora (2016)

Na análise da permanência das vazões em escala diária, foi possível notar que o SWAT subestimou a ocorrência de vazões mais elevadas, ao passo que superestimou a ocorrência de vazões mais baixas. Contudo, de maneira geral, a tendência do processo está bem representado (Figura 25).

FIGURA 25 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



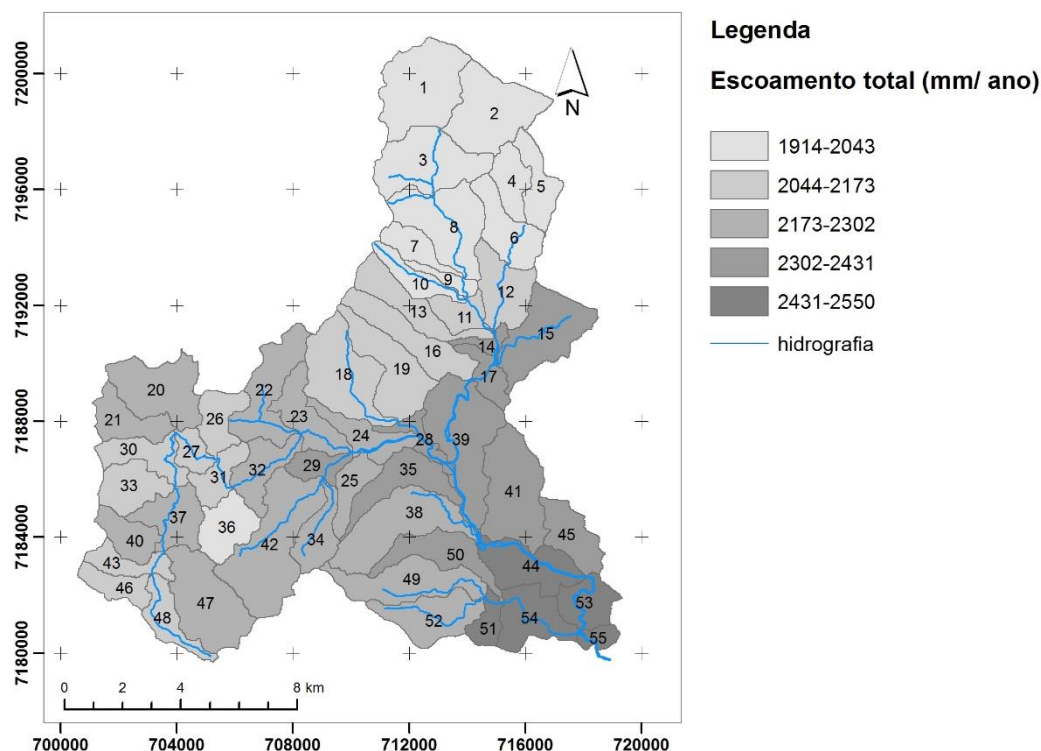
FONTE: a autora (2016)

Outras pesquisas apresentaram dificuldade do modelo em representar picos de vazão, embora tenham apresentado resultados satisfatórios, a exemplo de Baldissera (2005) e lensen et al. (2014).

O escoamento total médio simulado na bacia variou entre 1900 a 2550 mm.ano⁻¹, concentrando valores elevados nas áreas de planície, com ocupação agrícola e urbana (Figura 26). O aumento no volume total de escoamento nessa região da bacia ocorreu devido ao aumento de 115% no escoamento de base, em relação às regiões de vegetação natural, mais elevadas na bacia.

A relação entre a vegetação e o escoamento total encontrada na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara também evidencia maior volume em áreas urbanizadas, contudo, a distribuição do escoamento total também está relacionada à declividade da área de estudo.

FIGURA 26 - ESCOAMENTO TOTAL SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.

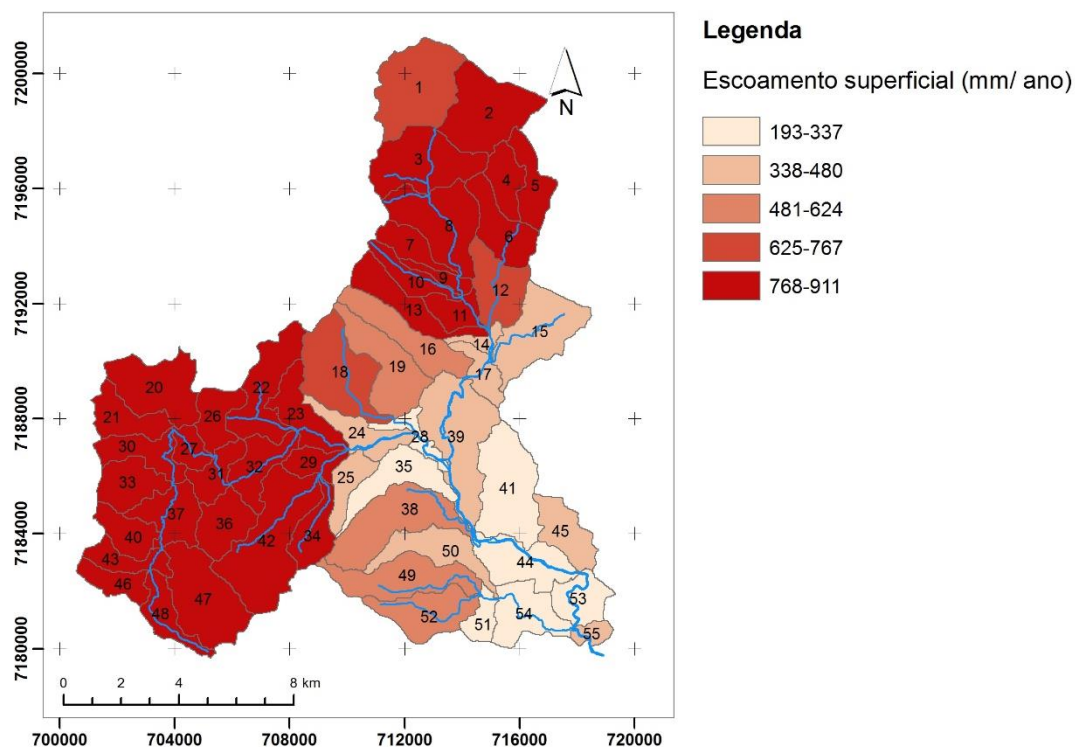


FONTE: a autora (2016)

A relação entre o escoamento e a declividade na bacia do rio Nhundiaquara ficou evidente na análise do escoamento superficial, que apresenta volume até 33% maior em áreas de montanha, com solos pouco profundos (Figura 27).

Moro (2005) constatou a importância do uso da terra combinado ao relevo para obter bons resultados do escoamento superficial. De forma geral, áreas com maior altitude associadas a vegetação natural e agrícola ocorrem maiores volumes de escoamento superficial. Dessa forma, supõe-se para a bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara que o volume expressivamente mais alto do escoamento superficial em áreas combinadas de vegetação nativa e declividade elevada se dá, especialmente devido à configuração de solos rasos com afloramento rochoso característico de regiões montanhosas.

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.

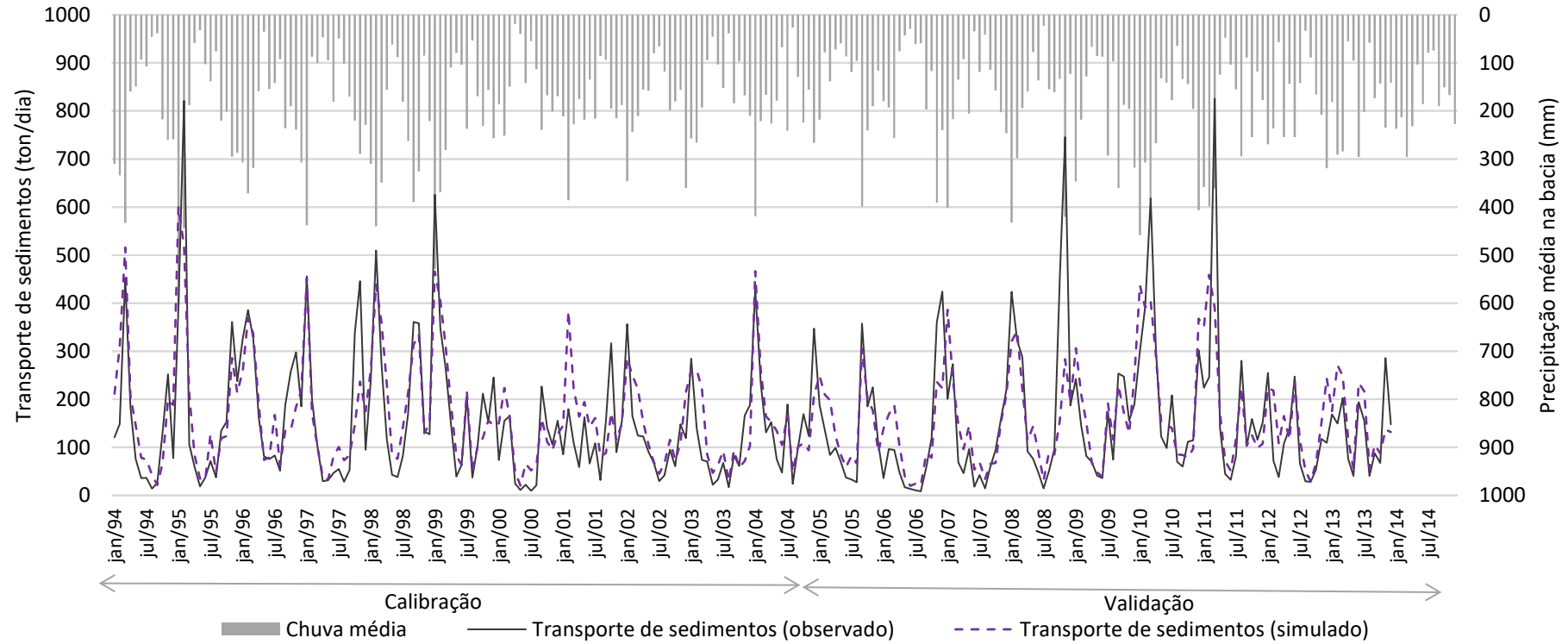


FONTE: a autora (2016)

5.2.2 Transporte de sedimentos

A calibração e validação do transporte de sedimentos no modelo SWAT é complexa. A simulação do processo tende a apresentar resultados menos satisfatórios do que na simulação do escoamento (SRINIVASAN, 2014). Apesar dos problemas observados, é possível notar que o modelo representou de forma satisfatória o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica estudada, conforme constatado pelos índices de eficiência medidos, e conforme tendência geral do sedimentograma (Figura 28).

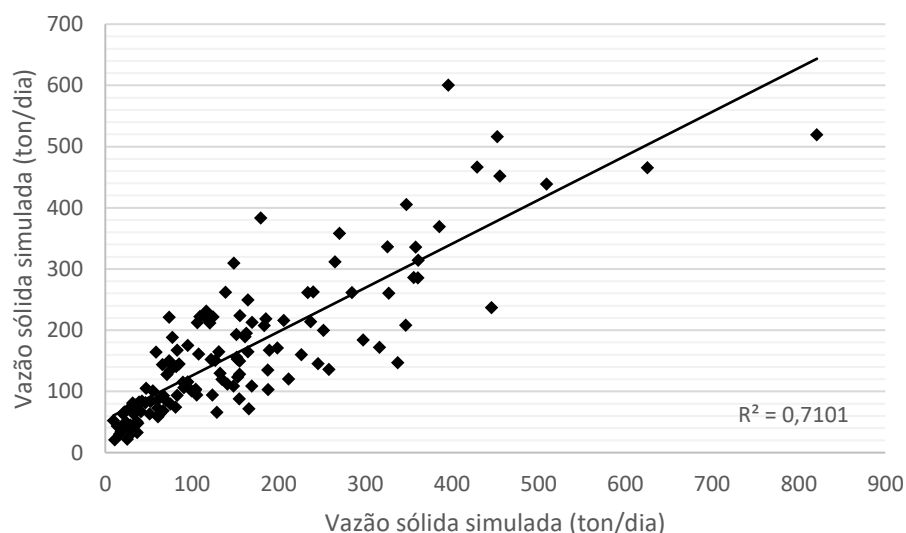
FIGURA 28 - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS MENSAL OBSERVADO E SIMULADO NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO



FONTE: a autora (2016)

Na análise de regressão linear e correlação entre as vazões sólida mensais observada e simulada, para todo o período estudado (1994-2004) obteve-se $R^2=0,7101$ (Figura 29).

FIGURA 29 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE VAZÃO SÓLIDA MENSAL OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA

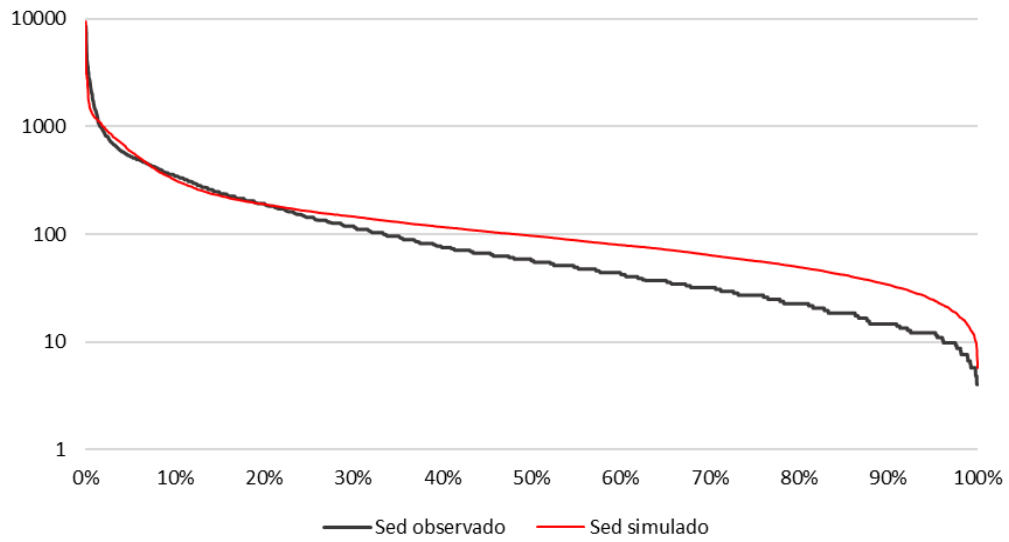


FONTE: a autora (2016)

Os grandes picos de transporte de sedimentos ocorreram principalmente no verão, sendo subestimados pelo modelo SWAT. Por outro lado, o modelo apresentou a tendência em superestimar valores mais baixos, que apresentaram maior ocorrência na bacia, correlacionando-se com os resultados obtidos para vazão líquida. A análise da permanência em escala diária dos dados possibilitou observar o momento em que o modelo passa a superestimar os valores de sedimento transportados na bacia (Figura 30).

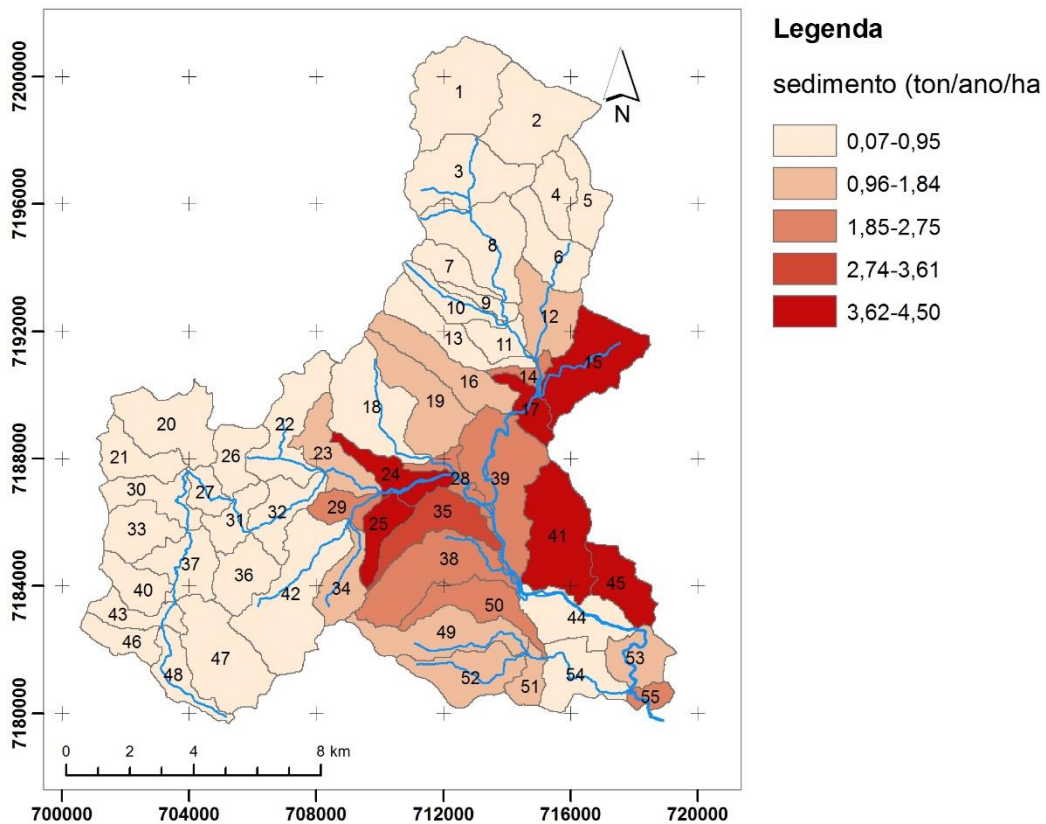
A distribuição do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara evidenciou a importância da vegetação natural na proteção do solo. De maneira geral, o escoamento superficial é fator determinante no transporte de sedimentos (CARVALHO, 2008; MORGAN 2005). Porém, na área de estudo nota-se que a vegetação nativa de Floresta Ombrófila Densa minimiza o efeito do escoamento superficial, contribuindo para que a área ocupada por floresta apresente o menor volume de sedimentos da bacia (Figura 31).

FIGURA 30- PERMANENCIA DE VAZÃO SÓLIDA DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA



FONTE: a autora (2016)

FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SIMULADA NAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.



FONTE: a autora (2016)

De acordo com Bertoni & Lombardi Neto (2005), a gota de precipitação que ocorre sobre áreas florestadas se divide em gotículas, diminuindo o impacto sobre o solo. Em áreas descobertas, a gota de chuva possui maior potencial de desprendimento do solo, facilitando seu transporte água. Esse aspecto ficou evidente na área de estudo, uma vez que o maior aporte de sedimentos se concentra em áreas com pouca cobertura vegetal.

Conforme indicado por IPARDES (1989), a floresta na região da serra do mar configura elemento de estabilização da paisagem, freando a formação de sedimentos em área de clima e relevo com potencial para erosão, concordando com o resultado obtido para a bacia do rio Nhundiaquara. Gibertoni et al. (2009), avaliando a influência de diferentes usos da terra na bacia do rio Nhundiaquara, concluíram que a expansão da área de floresta em toda a bacia causaria a redução do aporte de sedimentos em 16,5%, enquanto que a expansão agrícola em toda a área da bacia resultaria no aumento de 1147% no aporte de sedimentos. Os resultados obtidos por Gibertoni et al. (2009) reafirmam a importância do uso da terra para configuração da distribuição e quantidade de sedimentos na bacia do rio Nhundiaquara.

Iensen et al. (2014) e Perazzoli et al. (2013) avaliaram a influência de diferentes usos da terra em bacias hidrográficas em distintas regiões brasileira, concluindo que áreas de floresta tendem a diminuir a produção de sedimentos. O resultado indica que a presença de vegetação tende a ser um fator responsável pelo controle da produção de sedimento de uma região.

A associação das áreas de produção de sedimentos na bacia com o uso da terra permite inferir que aproximadamente 35% das áreas que possuem ocupação antrópica estão relacionadas à produção de sedimento acima de 1,85 ton/ano.ha. Nas áreas com vegetação, o aporte de sedimentos acima de 1,85 ton/ano.ha foi menor, ficando em 20%.

Nas sub-bacias 15, 17, 41 e 45, que apresentam maior aporte de sedimentos há presença de pastagem, associada a amplitudes altimétricas entre 220 e 400 metros. Nas sub-bacias 24 e 25, verificou-se a ocorrência de campos de altitude associados a áreas com amplitude altimétrica de até 1000 metros. Esses fatores evidenciam a importância do relevo e da cobertura vegetal na configuração da formação de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara.

5.3 EFEITO DO CENÁRIO CLIMÁTICO SOBRE A VAZÃO LÍQUIDA, SÓLIDA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA

Após avaliar a eficiência do SWAT para representar os processos relativos ao ciclo hidrossedimentológico na bacia, variáveis climáticas do cenário climático RCP 8.5 foram utilizadas para avaliar possíveis impactos causados na vazão e transporte de sedimentos nas condições da área de estudo.

A simulação do SWAT utilizando o cenário RCP 8.5 resultou em mudanças no ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara. O efeito da variação no clima foi analisado em dois períodos: 1/1/2060 até 31/12/2080; e 1/1/2080 até 31/12/2100. Em ambos, a modificação nas variáveis climáticas consiste no aumento da temperatura atmosférica e diminuição da precipitação. A variação climática com o cenário RCP 8.5 resultou em redução da evapotranspiração, e da vazão líquida e sólida na bacia no decorrer do tempo.

Os resultados apontam a redução da evapotranspiração real (ET) em 20,64% no cenário RCP 8.5 futuro próximo em relação ao período histórico. No cenário futuro distante, o decréscimo foi de 8,32%. A evotranspiração potencial (PET) teve decréscimo de 3,5% no cenário futuro próximo em relação ao período histórico, e no cenário futuro distante a diminuição foi de 1,44%. No cenário futuro distante é possível inferir que os valores de PET e ET reduziram devido à diminuição da precipitação média na bacia, que foi de 14,35% no cenário de futuro próximo em relação ao período histórico e de 17,87% no futuro distante (FIGURA 32).

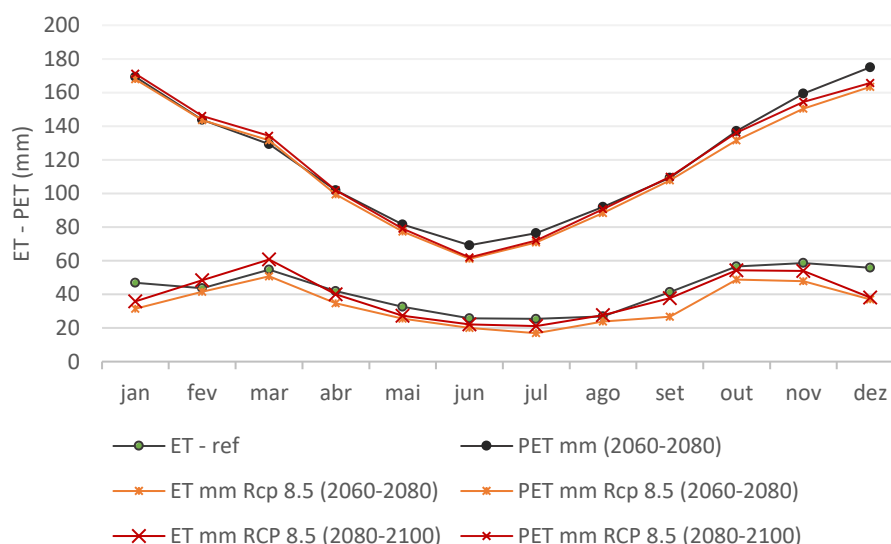
Apesar de haver queda da precipitação no cenário futuro distante em 0,95% em relação ao cenário futuro próximo, ocorreu aumento da ET em 15,51% e da PET de 2,13%. Esse fator está relacionado ao aumento da temperatura ao longo do século, previsto para o cenário RCP 8.5, confirmando a afirmação de Langbein & Schumm (1956) de que a temperatura controla e aumenta proporcionalmente a perda de água por evapotraspiração (Figura 32).

Pesquisas realizadas por Goulden et al. (2014), em bacia hidrográfica na região da serra nevada na Califórnia, e Hunke (2015), em bacia hidrográfica no cerrado brasileiro, indicaram que o aumento da temperatura atmosférica referente ao cenário RCP 8.5 proporciona aumento nos volumes de Evapotranspiração e redução na vazão. As pesquisas justificam o aumento da evapotranspiração em decorrência do aumento na temperatura e do crescimento acelerado das plantas ocasionado pelo

incremento de CO₂ na atmosfera, contribuindo para maior ocorrência de evapotranspiração.

No entanto, o aumento da temperatura previsto nos cenários não foi significativo para o aumento da ET e PET nas condições da área de estudo. As alterações na precipitação proporcionam maior influência do que a temperatura sobre o balanço hídrico na bacia do rio Nhundiçara. Resultados similares foram encontrados na avaliação da influência do cenário B1 (SRES, 2000) por lensen et al. (2014) em bacia hidrográfica na região norte do Paraná.

FIGURA 32 - EFEITO DO CENÁRIO CLIMÁTICO RCP 8.5 NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL.

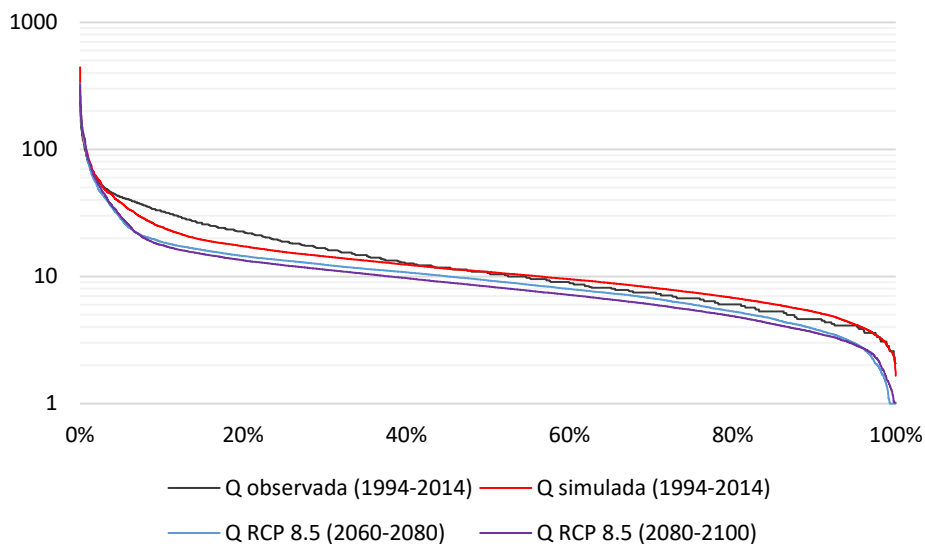


FONTE: a autora (2016)

Com relação à vazão, verificou-se a diminuição da vazão durante todo o período analisado. Os efeitos do cenário climático RCP 8.5 na vazão líquida consistiram na redução da vazão média em 21,34% e 24,96% no cenário futuro próximo e futuro distante, respectivamente (Figura 33).

A redução da vazão resulta da redução da precipitação, prevista no cenário RCP 8.5. A redução na vazão líquida provocada pela redução na precipitação, sob efeito de cenários climáticos de alta emissão de gases estufa foi encontrada também por lensen et al. (2014) e Oliveira et al., (2015), ambos em condições brasileiras.

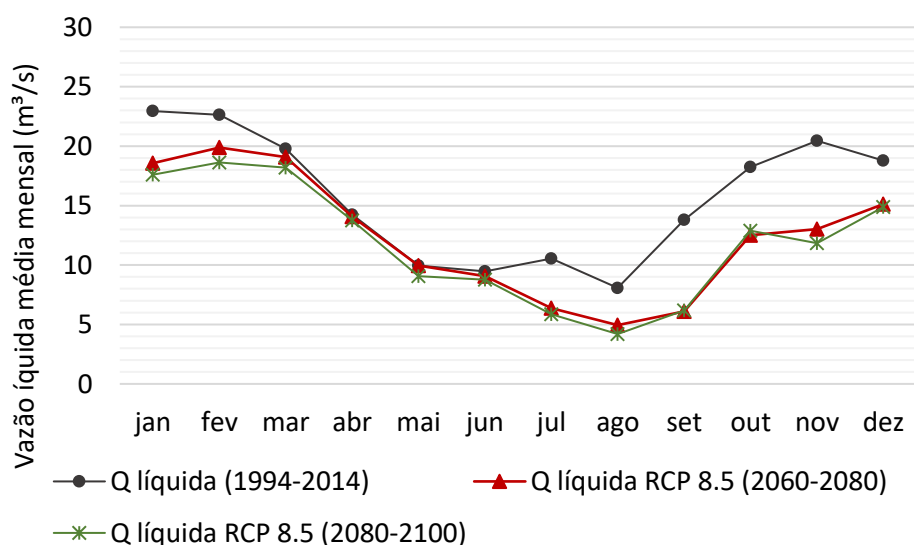
FIGURA 33 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO DIÁRIA OBSERVADA E SIMULADA PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA, E SIMULADA SOB INFLUÊNCIA DO CENÁRIO RCP 8.5 NO FUTURO PRÓXIMO E NO FUTURO DISTANTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.



FONTE: a autora (2016)

A redução da vazão relacionou-se com a sazonalidade da precipitação, assim, apresentou valores mais reduzidos entre junho e setembro (Figura 34).

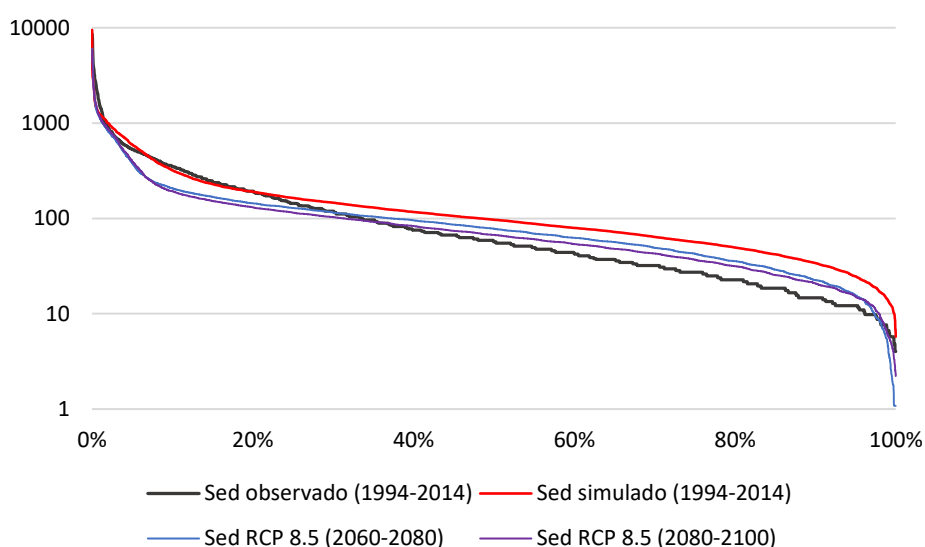
FIGURA 34 - SAZONALIDADE DA VAZÃO LÍQUIDA MEDIDA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E SIMULADA COM O MODELO SWAT PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA NO CENÁRIO RCP 8.5.



FONTE: a autora (2016)

O efeito do cenário climático RCP 8.5 resultou na redução na média de transporte de sedimentos em 15,44% e 19,93% para o futuro próximo e distante, respectivamente. A redução nos sedimentos ocorreu de acordo com a redução da vazão, ocasionada pela variação no volume e distribuição da precipitação previsto no cenário RCP 8.5. O aumento na frequência das menores precipitações pluviométricas ocasionou a redução nos eventos extremos de formação de sedimentos e o aumento na formação de sedimentos da ordem de 10 a 100 toneladas por dia (Figura 35).

FIGURA 35 - PERMANÊNCIA DE VAZÃO SÓLIDA OBSERVADA E SIMULADA PARA O PERÍODO DE REFERÊNCIA, E SIMULADA SOB INFLUÊNCIA DO CENÁRIO RCP 8.5 NO FUTURO PRÓXIMO E NO FUTURO DISTANTE, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA.



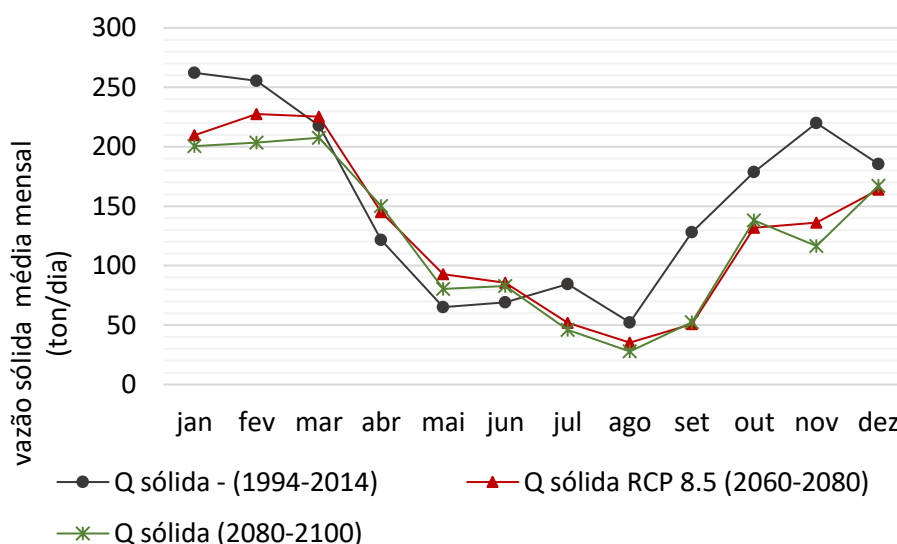
FONTE: a autora (2016)

De acordo com Carvalho (2008), 70% a 90% dos sedimentos é transportado na bacia hidrográfica em épocas de chuva, principalmente em eventos de grande intensidade. Sendo assim, a redução da intensidade das chuvas prevista no cenário climático RCP 8.5 é suficiente para causar a redução na média total da vazão sólida. Além disso, percebe-se que o aumento na formação de sedimentos em eventos de menor magnitude é insignificante, uma vez que é menor do que a simulação da formação de sedimentos gerada pelo modelo para o período de referência.

A sazonalidade na formação de sedimentos na bacia (Figura 36) aponta maior redução na formação de sedimentos entre os meses de julho e setembro,

acompanhando a redução na vazão provocada pelo período de estiagem representado no modelo.

FIGURA 36 - SAZONALIDADE DA VAZÃO SÓLIDA MEDIDA NO PERÍODO DE REFERÊNCIA E SIMULADA NO CENÁRIO RCP 8.5



FONTE: a autora (2016)

De acordo com Langbein & Schumm (1956), variações na temperatura, intensidade da precipitação, ocorrência de tempestades, a distribuição sazonal e espacial da precipitação podem afetar a formação e transporte de sedimentos em determinada região. No caso da bacia do rio Nhundiaquara, a redução dos sedimentos no cenário climático RCP 8.5 pode ser explicada pela redução nos eventos extremos de precipitação (tempestades) nos meses de verão, evidenciando a importância da precipitação na configuração do ciclo hidrossedimentológico na área de estudo.

Dessa forma, é possível afirmar que a variabilidade climática prevista para o cenário RCP 8.5 aponta para a redução do volume de água na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, o que pode configurar uma situação de redução da disponibilidade hídrica na região até o final do século XXI. A redução na disponibilidade hídrica, que por sua vez é consequência da redução nos eventos de intensa precipitação, tem como consequência a menor formação e transporte de sedimentos na bacia.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões obtidas no decorrer da pesquisa apontam que:

- O modelo SWAT reproduziu satisfatoriamente o ciclo da vazão líquida e sólida na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, com índice de eficiência NSE para vazão e sedimento de 0,69 e 0,70 respectivamente.
- A heterogeneidade da distribuição dos processos na bacia indicou expressiva influência do relevo no escoamento superficial e da vegetação no transporte de sedimentos. Em relação ao escoamento, a combinação de solos pouco profundos e afloramentos rochosos ao relevo acidentado configurou valores de até 900 mm.ano⁻¹ para o escoamento superficial em áreas próximas as nascentes. A distribuição do transporte de sedimentos, por outro lado, demonstrou-se menos elevada em áreas de declividade acentuada, apontando relação expressiva com a cobertura vegetal. Os resultados apontaram que áreas com cobertura vegetal natural de floresta ombrófila densa são menos propensas a erosão e transporte de sedimentos, mesmo estando sob a influência de maior volume de escoamento superficial.
- A temperatura mínima prevista foi 15,9% maior para o cenário futuro próximo e 20,7% maior no futuro distante. Para a temperatura máxima o aumento foi de 3,3% no futuro próximo e 6,3% no futuro distante. Em relação à precipitação, a redução dos eventos de maior intensidade resultou na diminuição de até 15%, em média, quando comparada ao período histórico.
- A relação temperatura e evapotranspiração na bacia hidrográfica mostrou-se pouco expressiva, uma vez que a redução da precipitação foi dominante para redução de água em todas as fases do ciclo hidrológico, sob influência do cenário RCP 8.5. Associou-se à redução na vazão e no sedimento a ocorrência de precipitações pluviométricas menores nos cenários futuros.
- A permanência da vazão e do transporte de sedimentos acompanhou a modificação na permanência da precipitação, sendo que a ocorrência de precipitações pluviométricas maiores tornou-se menos recorrente no cenário RCP 8.5, tendo como consequência a redução nos picos de vazão e de transporte de sedimento; Esse aspecto resultou na diminuição média da vazão de 21,3% e 24,9% nos período de futuro próximo e futuro distante

respectivamente; e redução de 15,4% e 19.9% no transporte de sedimentos para os mesmos períodos.

De maneira geral, as limitações no desenvolvimento do trabalho ressaltam a importância da rede de monitoramento climático para análise de dados ambientais e modelagem hidrológica, uma vez que a qualidade da simulação dos processos e calibração do modelo dependem de dados observados. Nesse mesmo contexto é possível salientar a relevância do efeito orográfico na configuração da vazão na bacia do rio Nhundiaquara e a deficiência na rede de monitoramento para representar a influência desse efeito na distribuição têmporo-espacial e no volume da precipitação.

Além da importância da influência de fatores climáticos, a pesquisa evidenciou que a vegetação e relevo são fatores ambientais condicionantes da heterogeneidade espacial da vazão e transporte de sedimentos na bacia, apontando a necessidade de atualização e aprimoramento de estudos que avaliem a influência desses aspectos ambientais no ciclo hidrossedimentológico na área de estudo.

Em relação ao cenário climático RCP 8.5, nota-se que o cenário climático futuro está associado a problemas de disponibilidade hídrica, uma vez que a redução prevista da precipitação (HTUT, et al., 2015; OLIVEIRA, et al., 2015), ou o aumento na evapotranspiração (GOULDEN, et al., 2014) pode diminuir a vazão em canais perenes. Assim sendo, evidencia-se a necessidade da avaliação dos demais cenários propostos pelo IPCC (2013), buscando analisar os possíveis resultados em comparação com outras pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H., & KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, V.524, 733-752. 2015.

ANDRIOLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C.; CAMARGO, A.S.G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI simpósio sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas. Belo Horizonte. **Anais do VI SPMCH**. V. 1. p. 1-17. 2008.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIESVEN, A.; VAN LIEW, M. N.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: model use, calibration and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. V. 55 p. 1491-1508. 2012.

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

BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá, MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Programa de pós-graduação em física e meio ambiente. Universidade Federal do Mato Grosso, 148p. 2005.

BAO, Y., F. L. QIAO, AND Z. Y. SONG. "The historical global carbon cycle simulation of FIO-ESM." **Anais EGU General Assembly Conference Abstracts**. Vienna, Austria V. 14. 2012.

BENTSEN, M.; BETHKE, I.; DEBERNARD, J.B.; IVERSEN, T.; KIRKEVAG, A.; SELAND, O.; DRANGE, H.; ROELAND, C.; SEIERSTAD, I.A.; HOOSE, C.; KRISTJÁNSSON, J.E. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. **Geoscientific Model Development** V.6 P. 687-720, 2013.

BERTONI, J.; LOMBARD NETO, F.L. **Conservação do solo**. São Paulo. Ed. Ícone, 2005. 5ª ed. p. 355.

BINGNER, R. L.; THEURER, F. D.; YUAN, Y. **AnnAGNPS technical processes**. USDA-ARS. National Sedimentation Laboratory, 2003. Relatório Técnico.

BOGEN, J. Sediment transport and deposition in mountain rivers. **Sediment and water quality in river catchments**, p. 437-451, 1995.

BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH, 1993. p.915-43.

BOURAOUI, F.; DILLAHA, T. A. ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. **Journal of Environmental Engineering**, V. 122, n. 6, p. 493-502, 1996.

BRITEZ, R.M.; PRESTES, M. MACHADO, M. A. Mapeamento da vegetação do litoral do Paraná. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação**. Curitiba, PR. 2015.

CAMPOS, C.G.C., MALANDRIN, D., MARENGO, J.A.M., BRAGA, H.J., PANDOLFO, C., MASSIGNAM, A. Análises dos Padrões Climáticos Futuros de Precipitação na Região Sul do Brasil. **Anais: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Guarapari - ES. Julho, 2011.

CARVALHO, N de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM. 372p. 2008.

CASSETI, Valter. **Geomorfologia**. [S.I.]. 2005. Acesso em Dezembro de 2015.

CHEN, X.; ALIZAD, K.; WANG, D. HAGEN, S. C. Climate Change Impact on Runoff and Sediment Loads to the Apalachicola River at Seasonal and Event Scales. **Climate change impacts on surface water systems**. V. 31, p. 32-42. 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 236 p. 1999.

COLBY, Bruce R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, V. 38, n. 5, p. 708-717, 1957.

COLLIER, S.J.; ROTSTAYN, L.D; WONG, K.K.; DRAVITZKI, S.M.; MOESENEDER, C.; HAMALAINEN, C.; SYKTUS, J.I.; SUPPIAH, R.; ANTONY, J.; ZEIN, A.; AFIT, M. The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication. **Anais: 19th International Congress on Modelling and Simulation**, Perth, Australia, 12–16. 2011.

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

DUFRESNE J. L.; · FOUJOLS, M.A.; · DENVIL, S. · CAUBEL, A. · MARTI, O. · AUMONT, O · BALKANSKI, Y · BEKKI, S · BELLENGER, H · BENSHILA, R · BONY, S · BOPP, L · BRACONNOT, P · BROCKMANN, P · CADULE, P · CHERUY, F · CODRON, F · COZIC, A · CUGNET, D · DE NOBLET, N · DUVEL, J.P.; · ETH'E, C · FAIRHEAD, L · FICHEFET, T · FLAVONI, S · FRIEDLINGSTEIN, P · GRANDPEIX, J-Y · GUEZ, L · GUILYARDI, E · HAUGLUSTAINE, D · HOURDIN, F · IDELKADI, A · GHATTAS, J · JOUSSAUME, S · KAGEYAMA, M · KRINNER, G · LABETOULLE, S · LAHELLEC, A · LEFEVRE, M.P · LEFEVRE, F · LEVY, C · LI, Z. X. · LLOYD, J · LOTT, F · MADEC, G · MANCIP, M · MARCHAND, M · MASSON, S · MEURDESOF, Y · MIGNOT, J · MUSAT, I · PAROUTY, S · POLCHER, J · RIO, C · SCHULZ, M · SWINGEDOUW, D · SZOPA, S · TALANDIER, C · TERRAY, P · VIOVY, N. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. **Climate Dynamics**. V. 40. P.2123-2165. 2013.

DUNNE, J.P.; JOHN, J.G.; SHEVLIAKOVA, E.; STOUFFER, R.J.; KRASTING, J.P.; MALYSHEV, S.L.; MILLY, P.C.D; SENTMAN, L. T.; ADCROFT, A.J.; COOKE, W.; DUNNE, K. A.; GRIFFIES, S.M.; HALLBERG, R.W.; HARRISON, M.J.; LEVY, H.; WITTENBERG, A.T.; PHILLIPS, J; ZADEH, N. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. **Journal of Climate**, v. 26, p.2247-2267. 2013.

DUNNE, L.J.; WYMAN, B.L.; HEMLER, R. S.; HOROWITZ, L.W.; MING, Y.; ZHAO, M.; GOLAZ, J. C.; GINOUX, P.; LIN, S.J.; SCHWARZKOPF, D.; AUSTIN, J.; ALAKA, G.; COOKE, W.F.; DELWORTH, T.L.; FREDENREICH, S.M.; GORDON, C.T.; GRIFFIES, S.M.; HELD I. M.; HURLIN, W.J.; KLEIN, S.A.; KNUTSON, T.R.; LANGENHORST, A.R.; LEE, H.C.; LIN, YANLUAN.; MAGI, B.I.; MALYSHEV, S.L.; MILLY, P.C.D; NAIK,V.; NATH, M.J.; PINCUS, R.; PLOSHAY, J.J.; RAMASWAMY, V.; SEMAN, C.J.; SHEVLIAKOVA, E.; SIRUTIS, J.J.; STERN, W.F.; STOUFFER, R.J.; WILSON, R.J.; WINTON, M.; WITTENBERG, A.T.; ZENG, F. The Dynamical Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. **Journal of Climate**. V. 24 p.6646-6665. 2011.

ELLISON, W.D. Soil erosion by rainstorms. **Science**. V.111 p. 245-249,1950.
EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Centro nacional de pesquisa de solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306 P.2013.

FILL, H.D. **Informações Hidrológicas - Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**, São Paulo, Nobel/ABRH p. 95 - 210.1987.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. WEPP user summary—NSERL Report no. 11. **USDA—ARS NSERL: West Lafayette, IN**, 1995. Relatório Técnico.
GALVAN, L.; OLIAS, M.; IZQUIERDO, T.; CERON, J.C.; VILLARAN, F. Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation. **Journal of Hydrology**. V.54. p. 257-265. 2014.

GIBERTONI, R.F.; SANTOS, I.; MÜLLER, I.I.; PEREIRA, P. S.; Modelagem da produção de sedimentos em bacias hidrográficas do litoral paranaense: o caso da bacia do rio Nhundiaquara. **Anais: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, MS. 2009.

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

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

GOULDEN, M.L.; BALES, R. C. Mountain runoff vulnerability to increased evapotranspiration with vegetation expansion. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. V.111 p. 14071-14075. 2014.

GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. Spatial modeling of catchment dynamics. In: **Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modeling**. Cambridge University Press, p.51-81.2000.

GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M. & SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, V.324, p.10-23. 2013.

HE, X.; ZHOU, J.; ZHANG, X.; TANG, K. Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. **Reg. Environ Change**. V. 6 p. 62-70. 2006.

HIROTA, M. M.; MANTOVANI, M. C.; GARRIDO, O.; BALAZINA, A.; HERRERA, A. G.; RIBEIRO, M. L.; BASTOS, A.; BOLZAN, M. **Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica período 2012-2013**. São Paulo 2014. Relatório Técnico.

HIRSCHI, M. C.; BARFIELD, B. J. KYERMO—A Physically Based Research Erosion Model Part I. Model Development. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 3, p. 804-0813, 1988.

HTUT, A. Y.; SHRESTHA, S. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change of the Bago River Basin in Myanmar. **Excellent Science in ASEAN**, p. 26. 2015.

HUNKE, P.P. **The Brazilian Cerrado: ecohydrological assessment of water and soil degradation in heavily modified meso-scale catchments**. Dissertação (Mestrado) Institut für-und Umweltwissenschaften Arbeitsgruppe Okohydrologie. University of Potsdam 136 p. 2015.

HYUK, J; HONG, W.Y; JEONG, H. G.; KIM, S.J. Comparison of Grid-based and SWAT HRU modeling approaches for evaluating the climate change impact on watershed hydrology. **Anais: Books of Abstracts, SWAT Conference**, Nova Delhi, Índia, 2012. p.105. disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/56841/Book-of-abstracts.pdf>. Acesso em: Janeiro 2015.

IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) Censo 2010. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: Janeiro de 2016.

IENSEN, I.R.R., SCHULTZ, G.B., SANTOS, I. Simulation of hydrosedimentological impacts caused by climate change in the Apucarantina River watershed, southern Brazil. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea (Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, 11–14 December 2014)* pp. 367-373. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Climate Change 2013. The physical Science Basis**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Acesso em: Julho 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Novos cenários climáticos**. 2007. Disponível em <[http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC pdf](http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC_pdf)>. Acesso em jul. 2014.

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social) / Fundação Édison Vieira. **Zoneamento do Litoral Paranaense**. Curitiba, Convênio SEPL (Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral) /IPARDES. 175p. 1989.

JONES, C.D; HUGHES, J.K.; BELLOUIN, N.; HARDIMAN, S.C.; JONES, G.S.; KNIGHT, J.; LIDDICOAT, F.M.; O'CONNOR, F.M.; ANDRES, R.J.; BELL, C.; BOO, K.O.; BOZZO, A.; BUTCHART, N.; CADULE, P.; CORBIN, K.D.; BOUCHER, M.D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GORNALL, J.; GRAY, L.; HALLORAN, P.R.; HURTT, G.; INGRAM, W.J.; LAMARQUE, J.F.; LAW, R.M.; MEINSHAUSEN, M.; OSPREY, S.; PALIN, E.J.; CHINI, P.; RADDATZ, T.; SANDERSON, M.G.; SELLAR, A.A.; SCHURER, A.; VALDES, P.; WOOD, N.; WOODWART, S.; YOSHIOKA, M.; ZERROUKAT, M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**. V. 4 p543-570,2011.

LANGBEIN, W.B.; SCHUM, S.A. Yield of sediment relation to mean annual precipitation. *Transactions, American Geophysical Union*. V. 39. 1956.

LE BISSONNAIS, Y. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. **Catena Supplement** v. 17. p.13–28. 1990.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; FONSECA, A. S.; LIMA, D. C. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Revista Ambiente & Água**. V. 6. n.2. 282-294. 2011.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

LIMA, J.E.F.W.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; KOIDE, S. Hidrologia comparativa: relações entre características físicas, comportamento hidrológico e resultados do modelo SWAT em diferentes regiões do Brasil. **Revista brasileira de geografia física**. V.07, p. 1187-1195. 2014.

LOU, R.F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.

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

LUO, Y.; FLICKIN, L. D.; LIU, X.; ZHANG, M. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with watershed modeling approach. **Science of the Total Environment** V.450–451. p. 72–82. 2013.

MACHADO, R.E; VETTORAZZI, C.A.; XAVIER, A.C.; Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de ciência do solo**. V. 27 p. 727-733. 2003.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental). Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba149f. 1999.

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

MEDEIROS, Y. D. P. Análise dos impactos das mudanças climáticas em região semi-árida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** V. 8 n.2 p.127-136. 2003.

MEER, H. V.; FELER, M.; GARRA, D. P. Hydrological Response of a Mountainous Catchment to Different Climate Scenarios. **Anais: Book of Abstracts of the 2014 SWAT Conference**. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/99100/book-of-abstracts-final-2014-07-14.pdf>. Acesso em: 05/2015.

MILLER, R.L.; SCHMIDT, G.A.; NAZARENKO, L.S.; TAUSNEV, N.; BAUER, S.E.; DELGENIO, A.D.; KELLEY, M.; LO, K.K.;RUEDY, R.; SHINDEL, D.T.; ALEINOV, I.; BAUER, M.; BLACK, N.; CANUTO, V.; CHEN, Y.; CLUNE, T. L.; FALUVEGI, G.; HANSEN, J. E.; HEALY, R.J.; KIANG, N.Y.; KOCH, D.; LACIS, A.A.; LEGRANDE, A.N.; LERNER, J.; MENON, S.; OINAS, V.; PANDO, C.P.G.; PERLWITZ, J.P.; PUMA, M.J.; RIND, D.; ROMANOU, A.; RUSSEL, G.L.; SATO, M.; SUN, S.; TSIGARIDIS, K.; UNGER, N.; VOLCAGARIS, A.; YAO, M.S.; ZHANG, J. CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**. V.6 P. 441-477. 2014.

MOREIRA, I.A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2005.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3ª ed. Malden, MA: Blackwell, 2005, 304 p.

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

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em agronomia. Escola superior de agronomia Luiz de Queiroz, 101 p. 2005.

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

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

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. Special report on emissions scenarios. **Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart**, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000., v. 1, 2000. Relatório Técnico.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD J. G; KINIRY J. R.; WILLIAMS J. R.; KING, K. W. NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R; KING, K.W. Soil and water assessment tool: **Theoretical documentation**, vs. 2000. Texas Texas Water Resources Institute, College Station, 2002. Relatório Técnico.

NGO, T.S.; NGUYEN, D. B.; RAJENDRA, P.S. Effect of land use change on runoff and sediment yield in Da River Basin of Hoa Binh province, Northwest Vietnam. **Journal of Mountain Science**. V. 12, p. 1051-1064. 2015.

OLIVEIRA, V.; VIOLA, M.; MELLO, C.; SRINIVASAN, R. Modelling the potential impacts of climate change on streamflow in a headwater of the Grande River Basin, Southeastern of Brazil. **Anais: Books of Abstracts, SWAT Conference**, Purdue. EUA. p. 48. 2015 disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/114933/swat-purdue-2015-book-of-abstracts.pdf> Acesso em: janeiro de 2016.

OUYANG, F.; ZHU, Y.; FU, G.; LÜ, H.; ZHANG, A.; YU, Z.; CHEN, Y. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. **Stoch Environ Res Risk Asses**. V. 29 p. 1781-1795. 2015.

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

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR: uma abordagem geopedológica**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia UFPR, 168 p. 2010.

PARANÁ. Instituto das Águas do Paraná. Bacias hidrográficas do Paraná (shapefile). Curitiba: AGUASPARANA 2011. Escala 1.100.000

PARANÁ. Insituto das Águas do Paraná. Altimetria do Estado do Paraná (shapefile). Curitiba. AGUASPARANA 2011. Escala 1.100.000

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

PERILLO, G.M.E. Geomorphology and sedimentology of Estuaries: An Introduction. In. Geomorphology and sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology. **Elsevier Science B.V.** p. 1 – 14. 1995.

RAMOS, M. C.; CASASNOVAS-MARTÍNEZ, J. A.; Climate change influence on runoff and soil losses in a rainfed basin with Mediterranean climate. **Natural Hazards**. V. 78, p. 1065-1089. 2015.

RIAHI, K.; GRÜBLER, A.; NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting & Social Change** v. 74 p. 887-935. 2007.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKNOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMAN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP8.5 – a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**. V. 109. p. 33-57. 2011.

RIBEIRO, C. B. M.; MOHANTY B. P.; BRESSIANI, D. A.; FERNANDES, J. G.; ROTUNNO, F.O C R. Parameterization of physical and climatic characteristics in the Amazon basin for hydrological simulation with SWAT model. **Anais: Book of Abstracts of the 2014 SWAT Conference**. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/99100/book-of-abstracts-final-2014-07-14.pdf>. Acessado em: 05/2015.

ROECKNER, E. et al. UKMO **Model Information of Potential Use to the IPCC Lead Authors and the AR4**: ECHAM5MPI-OM. available from www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php, 2005. Relatório Técnico.

ROUTCHECK, A.; SCHIMDT, J.; KREIENKAMP, F. Impact of climate change on soil erosion - A high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany. **Catena**. V. 121. p. 99 – 109. 2014.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio pequeno, São José dos Pinhais – Pr.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR. 2001.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H. KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, F. C. L. Hidrometria Aplicada. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SCAPIN, J.; PAIVA, J.B.D. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria – RS. **Anais: 7º Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa.** 2005.

SCHULTZ, G.B.; SOUZA, R.M.; SANTOS, I. Simulação da produção e transportes de sedimentos na bacia do Altíssimo Rio Negro com o modelo SWAT. **Anais do IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.** Brasília, DF, V. 1. p. 01-09. 2010.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E. e CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**, São Carlos – SP, Brasil: 2ª edição – revista e ampliada. Editora Rima, 2007. 153 p.

SILVA, A.; FERNANDES, N. Assessment of streamflow responses to different land use and land cover changes in a mountainous area of Rio de Janeiro, Brazil. **Anais: Book of Abstracts of the 2014 SWAT Conference.** Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/99100/book-of-abstracts-final-2014-07-14.pdf>. Acessado em: 05/2015.

TROTOCHAUD, J. WEPP/SWAT Future Climate Input File Generator: **Instructions Manual A simplified process for obtaining future climate inputs for the WEPP or SWAT models.** 2014. Relatório Técnico. Disponível em: http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad_hoc/36021500WEPP/cligen/future/WEPP%20SWAT%20Future%20Climate%20Input%20File%20Generator%20ReadMe%201.1.pdf Acesso em Novembro de 2015.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. Ed. Porto Alegre, Editora ABRH, 2005
VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, B.T.; FRANCO, R.A. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do córrego tres barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** V. 14 2010.

WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El Niño” e “La Niña” e estimativas para cenários climáticos futuros.** 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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

WATANABE, S.; HAJIMA, T.; SUDO, K.; NAGASHIMA, T.; TAKEMURA, T.; OKAJINA, H.; NOZAWA, T.; KAWASE, H.; ABE, M.; YOKOHATA, T.; ISE, T.; SATO, H.; KATO, E.; TAKATA, K.; EMORI, S.; KAWAMIYA, M. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development** V.4 845-872 2011.

WAYNE, G. P. Representative Concentrations Pathway. The beginners guide. **Skeptical Science**. V. 25. 2013.

WILKINSON, S., HENDERSON, A., CHEN, Y.; SHERMAN, B. **SedNet user guide**. Client report. 2005. Relatório Técnico.

WILLIAMS, J.R. Chapter 25. The EPIC Model. In: Computer Models of Watershed Hydrology. **Water Resources Publications**. p. 909-1000. 1995.

WISCHEMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Soil loss estimation as a tool in the soil and water management planning. International Association of Science, **Hydrology Pub**, pp. 148-159. 1965.

WU, T.; LI, W.; JI, J.; XIN, X.; LI, L.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; LI, J.; ZHANG, F.; WEI, M.; SHI, X.; WU, F.; ZHANG, LI.; CHU, M.; JIE, W.; LIU, Y.; WANG, F.; LIU, X.; LI, Q.; DONG, M.; LIU, Q.; ZHANG, J. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century. **Journal of Geophysical Research**. V. 118. p. 4326-4347. 2013.

XAVIER, A.P. SILVA, A.M. SANTOS, C.A.; SILVA. R.M. Estimativa da produção de sedimentos utilizando a SDR e MUSLE para a bacia do rio Mamuaba, paraíba. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de recursos hídricos do nordeste**. Natal RN. 2014.

YUKIMOTO, S.; ADACHI, Y.; HOSAKA, M.; SAKAMI, T.; YOUSHIKAWA, H.; HIRABARA, M.; TANATA, T.; SHINDO, E.; TSUJINO, H.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; MIZUTA, R.; YABU, S.; OBATA, A.; NAKANO, H.; KOSHIRO, T.; OSE, T.; KITOH, A. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3: Model Description and Basic Performance. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. V.90-A P. 23-64. 2012.