

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

**A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo
de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com
modelagem numérica**

Mônica Rodrigues de Queiroz

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências. Área de concentração:
Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2014**

Mônica Rodrigues de Queiroz
Bacharel em Meteorologia

**A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da
vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **HUMBERTO RIBEIRO DA ROCHA**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências. Área de concentração:
Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2014**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Queiroz, Mônica Rodrigues de

A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: Um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica / Mônica Rodrigues de Queiroz. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
110 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2014.

1. Vazão 2. Fluxo de sedimentos 3. SWAT I. Título

CDD 551.483
Q3v

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Ao meu filho, ***Kauan de Queiroz Veiga***, amor incondicional.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

O Deus, por estar ao meu lado e me ajudar com serenidade a enfrentar todas as adversidades da vida.

Ao meu orientador Humberto Ribeiro da Rocha, pela oportunidade e apoio a minha formação de Doutora.

A meus pais, Antônio Audmard de Queiroz Filho e Vania dos Santos Rodrigues, pelo amor, carinho e paciência.

Ao meu marido José Augusto Paixão Veiga, pelo amor, apoio e confiança depositada em mim.

A meus amigos e colegas do Laboratório de Clima e Biosfera IAG/USP que me deram apoio e estímulo durante o período de minha vida acadêmica.

A meus amigos e colegas de trabalho do UNINORTE/LAUREATE.

A Mara Casarin, prestativa e sempre atenciosa, sem ela a Ecologia Aplicada não seria a mesma.

A CAPES, por ter me concedido o financiamento de minha pesquisa de Pós-Graduação através de bolsa de doutorado.

A minha Família que sempre me apoiou em minhas decisões.

A todos, muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivos.....	28
1.1.1 Objetivo geral.....	28
1.1.2 Objetivos específicos	28
2 MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1 Área de estudo.....	31
2.1.1 Bacia do rio Piracicaba.....	31
2.1.2 Microbacia do Ribeirão das Posses.....	39
2.2 Modelagem.....	46
2.3 Calibração.....	49
2.4 Dados.....	53
2.4.1 Sistema Computacional.....	53
2.4.2 Dados Meteorológicos.....	53
2.4.3 Dados Hidrológicos.....	54
2.2.4 Dados de entrada do modelo SWAT.....	55
2.5 Cenários.....	55
2.5.1 Bacia do rio Piracicaba.....	56
2.5.2 Microbacia do Ribeirão das Posses.....	56
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
3.1 Bacia do rio Piracicaba.....	59
3.2 Microbacia do Ribeirão das Posses.....	76
4 CONCLUSÕES.....	87
5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS.....	91
ANEXOS.....	97

RESUMO

A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica

O objetivo desta tese foi avaliar os impactos decorrentes das mudanças de uso da terra e da variabilidade climática nos recursos hídricos (vazão e fluxo de sedimentos), em mesoescala (bacia do rio Piracicaba) e em pequena escala (microbacia do Ribeirão das Posses), através de um estudo de modelagem numérica com o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Foram utilizados dados de modelo numérico de terreno, mapas de solo e uso da terra, temperatura, precipitação, vento, radiação solar e umidade relativa para forçar o modelo SWAT. O modelo mostrou resultados satisfatórios de desempenho na comparação com dados observados, conforme mostram os índices estatísticos na bacia do rio Piracicaba (COE entre 0,97 e 0,99 para vazão e de 0,90 para fluxo de sedimentos) e no Ribeirão das Posses (COE de 0,53 para a vazão e 0,7 para fluxo de sedimentos). Nas simulações de modificações de uso da terra os resultados indicam que em ambas as bacias as maiores vazões ocorrem nos cenários de desflorestamento, sendo o cenário de pastagem o de valores mais expressivos. O modelo correspondeu às evidências de que as vazões máximas, por exemplo os eventos de inundações, podem ser mitigados com o reflorestamento e que o cenário de antropização com gramíneas, no caso das pastagens e cana-de-açúcar, os eventos extremos tendem a ser aumentados ainda mais. Na avaliação da simulação dos fluxos de sedimentos, o cenário de reflorestamento por eucalipto mostra redução na perda do solo, porém ainda abaixo do cenário de reflorestamento por vegetação nativa, que apresentou os menores valores de fluxo de sedimentos, em ambas as bacias. Na simulação levando-se em consideração as mudanças climáticas, os resultados mostram aumento de vazão para o futuro (2078-2098) e consequente aumento de fluxo de sedimento, sendo um aumento médio de 12 % nas vazões do Piracicaba e de 19 % no fluxo de sedimentos. No Ribeirão das Posses este padrão de resposta também ocorreu, com aumento de 46% na vazão e 40 % no fluxo de sedimentos.

Palavras-chave: Vazão; Fluxo de sedimentos; SWAT

ABSTRACT

The climate variability and land use changes: a case study of flow and sediments in the Piracicaba River basin with numerical modeling

The aim of this thesis was to evaluate the impacts of changes in land use and climate variability on water resources (discharge and sediment fluxes), into mesoscale (Piracicaba River basin) and small-scale (watershed Ribeirão das Posses) processes throughout a study of numerical modeling with SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). Data of numerical model of terrain, soil maps and land use, temperature, precipitation, wind speed, solar radiation and relative humidity forced the SWAT model. The model showed a satisfactory performance in comparison with the observed data, as showed by the statistical indices of the Piracicaba River Basin (COE between 0.97 and 0.99 to 0.90 for flow and sediment fluxes) and Ribeirão das Posses (COE of 0.53 to 0.7 for flow and sediment fluxes). In simulations of changes in land use the results indicate that in both basins larger flows occur in the case of deforestation scenarios, being the scene of the pasture the highest values. The model corresponded to the evidence that peak flows, for example the events of flooding can be mitigated with reforestation and the scenario of anthropogenic with grasses for grazing land and sugar cane, extreme events tend to be further enhanced too. In assessing the simulation of sediment flows, the scenario of reforestation with eucalyptus shows reduction in soil loss, but still below the scenario reforestation with native vegetation, which presented the lowest values of sediment flux in both basins. In the simulation taking into account climate change, the results show increased flow to the future (2078-2098) and consequent increase in stream sediment, with an average 12% increase in the flows of Piracicaba and 19 % in the flow sediment. In Ribeirão das Posses this response pattern also occurred with a 46% increase in throughput and 40 % in the stream sediments.

Keywords: Flow; Sediment flux; SWAT

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Rio Piracicaba.....	31
Figura 2 - Bacias e represas que compõem o Sistema Cantareira.....	33
Figura 3 - (a) Climatologia da temperatura média, mínima e máxima do ar (°C), (b) Radiação Solar (Wm^{-2}), Pressão atmosférica (hPa), (d) Umidade Relativa (%) e (e) Velocidade do vento (ms^{-1}), para a bacia do rio Piracicaba.....	34
Figura 4 - Mapa com pontos em análise para vazão (vermelho) e fluxo de sedimentos (preto).....	35
Figura 5 - Modelo Numérico de terreno para a bacia do rio Piracicaba.....	36
Figura 6 - Mapa de solos da bacia do rio Piracicaba com os tipos de solos: areias quartzosas (AQ), cambissolos (CA), latossolo vermelho-escuro (LE), latossolo vermelho-amarelo (LV) e o podzólico vermelho-amarelo (PV).....	37
Figura 7 - Mapa de usos da terra para a bacia do rio Piracicaba onde os tipos de usos são: floresta (FRSE), pastagem (PAST), água (WATR), área urbana (URMD), cana de açúcar (CANA) e eucalipto (EUCA).....	38
Figura 8 - Mapa de localização da microbacia do Ribeirão das Posses, localização do Sistema Cantareira e Bacia do rio Piracicaba....	40
Figura 9 - Área de estudo, reservatórios e nascente, Extrema-MG.....	40
Figura 10 - (a) Climatologia da temperatura média, mínima e máxima do ar (°C), (b) Radiação Solar (Wm^{-2}), Pressão atmosférica (hPa), (d) Umidade Relativa (%) e (e) Velocidade do vento (ms^{-1}), para a microbacia do Ribeirão das Posses.....	41
Figura 11 - Climatologia da precipitação (mm) e hidrograma da vazão (m^3s^{-1}) para a microbacia do Ribeirão das Posses.....	42
Figura 12 - MNT da microbacia do Ribeirão das Posses.....	43
Figura 13 - Mapa de uso da terra da microbacia do Ribeirão das Posses, onde pastagem (pasg), água, mata atlântica (mata) e eucalipto (euca).....	44

Figura 14 - Mapa de solo da microbacia do Ribeirão das Posses, onde Neossolo Flúvico (neofluv), Cambissolo Húmido (cambhum), Neossolo Litólico (neolito), Cambissolo Háplico (cambhap) e Argissolo Vermelho e Amarelo (argverama).....	45
Figura 15 - Mapa de localização e pontos de monitoramento (circulo em verde) da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG.....	46
Figura 16 - Fluxograma de trabalho do modelo SWAT.....	48
Figura 17 - Vazão média mensal (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Recreio.....	60
Figura 18 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada e simulada para o posto Recreio.....	60
Figura 19 - Hidrograma médio de Vazão (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Recreio, para o período de 2000 a 2010.....	61
Figura 20 - Vazão média mensal (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Carioba.....	62
Figura 21 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada e simulada para o posto Carioba.....	62
Figura 22- Hidrograma médio de Vazão (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Carioba, para o período de 2000 a 2010.....	63
Figura 23 - Ranque de sensibilidade dos parametros de controle da produção e fluxo de sedimentos para a bacia do rio Piracicaba, para os parâmetros Fator de cobertura do canal (Ch_Cov), Fator de erodibilidade do canal (Ch_Erod), Coeficiente linear de fluxo de sedimento (Spcon), Coeficiente exponencial de fluxo de sedimento (Spexp), Fator de cobertura vegetal (Usle_C) e Fator relativo às praticas de conservação e manejo do solo (Usle_P).....	63
Figura 24 - Fluxo de sedimentos diária ($ton\ ha^{-1}$) observada (OBS - pontos em pretos) e simulado com calibração (SIM – pontos	

em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 2007.....	65
Figura 25 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha^{-1}) observada (OBS - pontos em pretos) e simulado com calibração (SIM – pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 2008.....	65
Figura 26 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha^{-1}) observada (OBS - pontos em pretos) e simulado com calibração (SIM – pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 2009.....	66
Figura 27 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha^{-1}) observada (OBS - pontos em pretos) e simulado com calibração (SIM – pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 2010.....	66
Figura 28 - Dispersão dos dados de fluxo de sedimentos média diária (ton ha^{-1}) observada e simulada para o ponto de coleta do rio Atibaia.....	67
Figura 29 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal simulada nos cenários de CTRL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara), CAN (linha laranja) e PAS (linha vermelha) no posto Recreio, nos anos de 2000 a 2010.....	68
Figura 30 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal simulada nos cenários de CTRL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara), CAN (linha laranja) e PAS (linha vermelha) no posto Carioba, nos anos de 2000 a 2010.....	70
Figura 31 - Fluxo de sedimentos média diária (ton ha^{-1}) simulada nos cenários de CTRL (ponto cinza), FLO (ponto verde escuro), EUC (ponto verde clara), CAN (ponto laranja) e PAS (ponto vermelha) para o ponto de coleta no rio Atibaia, observações	

nos anos de 1997 a 2000.....	72
Figura 32 - Hidrograma médio anual para o ponto posto Artemis, nos cenários de mudança de clima SWAT_CTRL (linha preta) e SWAT_FUT (linha azul) e anomalia da precipitação entre os cenários (barra).....	73
Figura 33 - Sedimentograma médio anual para o ponto no posto Artemis, nos cenários de mudança de clima SWAT_CTRL (linha preta) e SWAT_FUT (linha azul) e anomalia da precipitação entre os cenários (barra).....	74
Figura 34 - Mapas de produção de sedimentos (ton ha^{-1}) médio anual por subbacias para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a bacia do rio Piracicaba.....	75
Figura 35 - Ranque de sensibilidade dos parametros de controle da produção e fluxo de sedimentos para a bacia do Ribeirão das Posses, para os parâmetros Fator de cobertura do canal (Ch_Cov), Fator de erodibilidade do canal (Ch_Erod), Coeficiente linear de fluxo de sedimento (Spcon), Coeficiente exponencial de fluxo de sedimento (Spexp), Fator de cobertura vegetal (Usle_C) e Fator relativo às praticas de conservação e manejo do solo (Usle_P).....	76
Figura 36 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada (linha preta) e modelada com o cenário CTRL_CAL (linha vermelha) para os anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses....	77
Figura 37 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada modelada com o cenário controle para os anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses.....	78
Figura 38 - Fluxo de sedimento (ton ha^{-1}) média mensal observada (linha preta) e modelada com o cenário controle (linha vermelha) para os anos de 2009 a 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses, a linha azul separada o período de warm-up do modelo.....	79
Figura 39 - Dispersão dos dados de fluxo de sedimentos (ton ha^{-1}) média mensal observada modelada com o cenário controle para os	

anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses....	79
Figura 40 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal dos cenários de CTRL_CAL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara) e PAS (linha vermelha) para a microbacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2011 e 2012.....	81
Figura 41 - Fluxo de sedimento ($ton\ ha^{-1}$) média mensal dos cenários de CTRL_CAL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara) e PAS (linha vermelha) para a microbacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2011 e 2012.....	82
Figura 42 - Hidrograma (m^3s^{-1}) médio anual dos cenários SWAT_CTRL (linha preta), SWAT_FUT (linha azul) e anomalia de precipitação (barra) para a microbacia do Ribeirão das Posses.....	83
Figura 43 - Fluxo de sedimento ($ton\ ha^{-1}$) médio anual dos cenários SWAT_CTRL (linha preta), SWAT_FUT (linha azul) e anomalia de precipitação (barra) para a microbacia do Ribeirão das Posses.....	83
Figura 44 - Mapas de produção de sedimentos ($ton\ ha^{-1}$) médio anual por subbacias para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a microbacia do Ribeirão das Posses.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações fluviométricas do DAEE utilizadas para comparação com resultados das simulações do modelo.....	35
Tabela 2 - Tipos de Solos que compõem a bacia do Piracicaba, código no modelo e porcentagem de distribuição da área total.....	37
Tabela 3 - Usos da terra que compõem a bacia do Piracicaba, código no modelo e porcentagem de distribuição de área total.....	39
Tabela 4 - Porcentagem de uso da terra da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG.....	44
Tabela 5 - Porcentagem de solo da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG.....	45
Tabela 6 - Parâmetros fisiológicos dos tipos de cobertura vegetal, obtidos na calibração da evapotranspiração, segundo Silva (2014). A altura máxima da vegetação (chtmx) não foi modificada durante a calibração, sendo prescrita segundo a literatura existente.....	50
Tabela 7 - Classificação dos resultados para os índices de eficiência com o SWAT para estimativas mensais (MORIASI et al., 2007)	52
Tabela 8 - Localização das estações de pontos de monitoramento de precipitação, da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG.....	54
Tabela 9 – Parâmetros otimizados utilizados para calibração do fluxo de sedimentos.....	64
Tabela 10 - Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema máxima Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem e Q_{95} (m^3s^{-1}), e evapotranspiração media anual (ET) em (mm) calculada nos cenários de CTRL, FLO, EUC, CAN e PAS no posto Recreio, nos anos de 2000 a 2010.....	69
Tabela 11 - Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema máxima Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem Q_{95} (m^3s^{-1}), calculada nos cenários de CTRL, FLO, EUC, CAN e PAS no posto Recreio, nos anos de 2000 a 2010.....	70
Tabela 12 - Fluxo de sedimentos média anual (ton ha^{-1}), vazão sólida	

extrema máxima Q_{s_2} , vazão sólida de estiagem Q_{s_95} , produção de sedimentos (ton ha^{-1}) calculado nos cenários de CTRL, FLO, EUC, PAS e CAN para o ponto de coleta no rio Atibaia, observações nos anos de 1997 a 2000.....	71
Tabela 13 - Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem Q_{95} (m^3s^{-1}), calculada utilizando os cenários de mudanças de uso da terra FLO, PAS e EUC, para os anos de 2011 e 2012.....	81
Tabela 14 - Fluxo de sedimento (ton ha^{-1}) calculado utilizando os cenários de mudanças de uso da terra FLO, PAS e EUC, para os anos de 2011 e 2012.....	82

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da funcionalidade hídrica nos ecossistemas brasileiros e da variabilidade climática é um dos fatores que geram competência para se formularem estratégias inteligentes de gestão hídrica, promovendo informações que suportem as demandas de ocupação futuras. A boa formulação de políticas de uso da terra depende também da expectativa de mudanças do clima nas próximas décadas, assim como a cobertura e o manejo da superfície devem se adequar às vocações socioeconômicas regionais. Dos 3% da água do planeta disponível como água doce, somente 15% estão disponíveis superficialmente para consumo (TUNDISI, 2003). Da água disponível 65% são utilizados em atividades agrícolas, 22% pela indústria, 7% pelos municípios e 6% são perdidos. Em um cenário onde se anunciam prováveis alterações na temperatura e na precipitação do planeta, o planejamento da ocupação do solo e suas tendências de evolução deverão se constituir em um dos elementos de adaptação, com vistas à eficaz gestão dos recursos hídricos (NUNES, 2006).

O código das águas, decreto 24.643 de 1934, era o único instrumento legal e específico sobre os recursos hídricos no Brasil até a publicação da Lei 9433 de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SNGRH), com o objetivo de coordenar a gestão integrada das águas. Em 2000 a Lei 9984 criou a Agência Nacional de Águas (ANA), que regulamenta os Comitês de Bacias Hidrográficas, que são organismos com atribuições específicas no gerenciamento dos usos, da conservação da água e dos corpos hídricos, tendo como base o planejamento e a gestão da bacia hidrográfica. Surge assim, baseado em instrumentos legais o Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), no ano de 2003.

Uma bacia hidrográfica é uma determinada área de terreno que drena água, partículas de solo e material dissolvido para um ponto de saída comum, situado ao longo de um rio, riacho ou ribeirão (DUNNE; LEOPOLD, 1978). A gestão dos recursos hídricos no Brasil é realizada em todas as esferas do poder, a União gerencia o uso da água através da Agência Nacional de Águas (ANA), que supervisiona os Comitês de Bacias Hidrográficas, onde interage o poder público

(Estadual e Municipal), usuários de água e organizações da sociedade, debatendo questões sobre gestão dos recursos hídricos, propiciando o cuidado aos corpos d'água e ecossistemas naturais, recuperação e conservação de água para garantir sua utilização racional e sustentável (ANA, 2008). Todavia, há um enorme espaço para a comunidade científica interagir mais eficazmente com os Comitês de Bacias Hidrográficas e apontar soluções alternativas que venham a contribuir para mitigar os problemas atuais e futuros.

As modificações no uso da terra potencialmente influenciam a quantidade e a qualidade das águas, podendo contribuir para as inundações e alterações no ambiente. Adicionalmente, as mudanças e variabilidades naturais do clima, sejam elas de causa natural ou antrópica, podem degradar diretamente a qualidade de vida humana. Um dos principais efeitos do clima ocorre no regime de vazões líquidas e sólidas nas bacias hidrográficas, que por sua vez, repercute na oferta e demanda da água em diversos setores como os de saneamento urbano (principalmente tratamento e abastecimento), irrigação e energia. O clima, pela ação do regime das chuvas, temperatura e ventos, controla a decomposição e transporte de elementos químicos desde rochas e solos até os corpos da água, em que a cobertura vegetal e seu manejo mostram-se fatores importantes na redução das taxas de erosão do solo devido à proteção do solo contra o impacto da chuva, diminuição da velocidade do escoamento superficial e o aumento da capacidade de infiltração de água no solo.

A forma de utilização dos recursos hídricos sem critérios sustentáveis foi aplicada durante séculos, sem que houvesse grande preocupação com a degradação ambiental (POSTEL et al., 2000). As obras de engenharia utilizaram critérios de dimensionamento supondo uma variabilidade hidroclimática baseada em dados que não representam a realidade atual, em parte devido à própria perturbação do ambiente e seus efeitos nos escoamentos dos rios e gestão de reservatórios, e em parte às projeções climáticas que apontam para cenários muito distintos dos atuais (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2001).

O planejamento urbano e rural brasileiro pragmático e com pouca atenção a sustentabilidade degradou a relação entre a infraestrutura e os recursos hídricos, sendo um dos principais impactos o da drenagem urbana, na forma de aumento da frequência e magnitude das inundações, a perda de biodiversidade ao longo dos rios

e lagos, o aumento do custo de tratamento da água e a escassez hídrico-energética em alguns centros metropolitanos durante períodos climáticos críticos. No Brasil as ações de controle e monitoramento vão desde as restrições legislativas, a consciência do consumidor (população), e a cadeia produtiva (indústrias, agronegócio, entre outros) na tentativa de reduzir os impactos de disponibilidade hídrica e da qualidade da água nas bacias.

As potenciais mudanças climáticas globais projetam um rompimento nos padrões hidrológicos além de aumentar os riscos de ocorrência de extremos hidrológicos, como secas e inundações (OPPERMAN et al., 2011). Por exemplo, Tucci e Clarke (1997, 1998) identificaram grandes variações de vazão em várias subbacias do rio da Prata, devido a dois componentes principais: modificações antrópicas e variabilidade climática. As alterações climáticas se refletiram nas modificações das variáveis representativas do clima, como a precipitação e temperatura, com alterações nas suas estatísticas, alterando a resposta da bacia (TUCCI, 2005).

A modelagem numérica do regime hidrológico de superfície em bacias hidrográficas é utilizada no gerenciamento dos recursos hídricos com o objetivo de se compreender como diversos fatores ambientais controlam a disponibilidade e a qualidade de água. Para se avaliar a funcionalidade hidrológica de uma bacia hidrográfica sob condições de vegetação natural e pós ação antrópica, deve-se realizar uma análise no processo precipitação – vazão, estabelecendo relações entre os processos hidrológicos, através de monitoramento e modelagem numérica (CARAM, 2010).

O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido para estimar os impactos das práticas de manejo sobre o balanço hídrico, fluxo de sedimentos e agroquímicos, em bacias hidrográficas que variam o uso e cobertura dos solos e as condições de manejo durante um longo período de tempo (NEITSCH et al., 2005). Desde 2000 o SWAT vem sendo utilizado com maior ênfase no Brasil.

Embora o Brasil seja um país com extensas reservas hídricas, estas reservas não estão bem distribuídas em função das concentrações das populações, ou seja, nem sempre as regiões onde ocorrem as maiores concentrações urbanas e por conseguinte as altas demandas de recursos hídricos, possuem recursos hídricos suficientes, o que ocasiona problemas de abastecimento. Exemplo desta

problemática é a bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BH-PCJ) de onde são retirados $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (10 milhões de habitantes). Nas nascentes da bacia do Piracicaba são desenvolvidos projetos, como o “Conservador de Águas” que visa aumentar a sustentabilidade sócio-econômica e ambiental, por meio do incentivo financeiro aos serviços ambientais prestados por ação dos proprietários rurais no município de Extrema-MG (KFOURI e FAVERO, 2011). Vários trabalhos relacionados a esta problemática estão sendo desenvolvidos, tentando auxiliar os tomadores de decisão da gestão dos recursos hídricos nestas bacias como: Krusche et al. (1997), Martinelli et al. (2002), Ballester et al. (1999), Machado (2002), Folegatti et al. (2010), Zolin (2011), Orellana–Gonzalez et al. (2011), Silva (2014), entre outros.

Machado (2002) utilizando o modelo SWAT aplicado para simular a carga de sedimentos produzida pela microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba (SP), no biênio 1999/2000, obteve resultados de produção de sedimentos comparados aos dados observados em um posto hidrossedimentométrico, utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) e o desvio dos dados simulados em relação aos observados (Dv). Para as condições específicas da microbacia, os resultados obtidos na simulação da produção de sedimentos pelo modelo, após a calibração, foram de 0,83, para o COE, e de -3,2 %, para o Dv, indicando um bom ajuste dos dados calculados comparados aos dados observados.

Baldissera (2005) procurando avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT para simulações de vazões líquidas mensais para a bacia do Rio Cuiabá (MT), obteve o COE de 0,69 e o Dv de -8,15, demonstrando que o SWAT tem aplicações satisfatórias para a região. Moro (2005) simulou a produção de sedimentos e o escoamento superficial na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP) com cenários alternativos de uso da terra, obtendo um COE de 0,90 e um Dv de -12,7, concluindo que a microbacia é muito suscetível a processos erosivos e também as mudanças de uso de solo.

Lino (2009) fez a análise hidrossedimentológica através do modelo SWAT da bacia Rio Preto do Sul (SP) e verificou através de cenários de mudança de uso e cobertura vegetal o comportamento hidrossedimentológico da bacia. Obtendo COE de 0,5. Souza et al, (2009) aplicando o SWAT como ferramenta para gestão dos

recursos hídricos avaliando a aplicação de outorgas para a bacia do Altíssimo Rio Negro (SC-PR), obteve um COE de 0,72, mostrando que o modelo representou bem a vazão na bacia.

Visando fornecer estimativas do impacto da variabilidade climática sobre a hidrologia Ficklin et al. (2009) aplicaram o SWAT na bacia hidrográfica do rio San Joaquin (Califórnia). No estudo foram obtidas modelagem das respostas hidrológicas com variações de CO₂ atmosférico, temperatura e precipitação com base nas projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Os resultados mostraram que mudanças no CO₂, temperatura e precipitação têm efeitos significativos no rendimento de água, evapotranspiração, uso da água para irrigação e vazão.

Baltokoski et al, (2010), utilizou o modelo SWAT para avaliar sua sensibilidade na predição da vazão e do fluxo de massa do Fósforo total. O estudo foi realizado em duas microbacias hidrográficas contíguas, dos rios Conrado e Pinheiro (PR), obtendo valores de COE de 0,7, constatando que o modelo realizou de forma aceitável as simulações de vazão de Fósforo Total nas bacias.

Blainski et al. (2010) analisando a perda de solo e disponibilidade hídrica para uma bacia não instrumentada, utilizando cenários de reflorestamento constatou que tanto a vazão quanto a perda de solo são alteradas de acordo com o uso e ocupação do solo, além de verificar que culturas anuais tendem a aumentar significativamente a erosão do solo. Bortolotto (2011) fez uma avaliação hidrossedimentológica para a bacia do Rio Cunha (SC) obtendo um COE de 0,43 e Dv de -0,02, não obtendo um resultado expressivo para suas simulações, ressaltando que a diferença entre dados observados e simulados pode estar associada a falta de dados na bacia.

Malutta (2012) utilizando o SWAT fez simulações para a bacia do Rio Negrinho (SC) junto com a simulação foi realizada monitoramento hidrossedimentológico, obtendo assim valores de COE entre 0,48 a 0,61, resultados satisfatórios para as simulações na bacia. Lelis (2012) utilizou o SWAT para a verificação de cenários futuros para a bacia do Ribeirão São Bartolomeu (DF) obtendo COE de 0,99 e Dv de 0,8, encontrando excelentes valores para a simulação do modelo na bacia e assim possibilitando um plano de gestão minimizando impactos futuros. Qiu et al. (2012) avaliando o SWAT para uma bacia na China (bacia Zhifanggou) testando as

variáveis de escoamento superficial de fluxo de sedimentos, obtiveram resultados aceitáveis, porém o modelo subestimou o escoamento superficial nos eventos de cheia e subestimou o fluxo de sedimentos (nos períodos de calibração e validação).

Silva (2014) com um estudo de modelagem numérica utilizando o modelo SWAT avaliou o impacto causado com cenários de Áreas de Preservação Permanentes (APPs) ripárias no regime hidrológico nas bacias dos rios Piracicaba (mesoescala) e Ribeirão das Posses (pequena escala). Dentre os diferentes cenários de reflorestamento simulados no Ribeirão das Posses, sugeriu que as APPs, nas formas de reflorestamento ripário em pequena escala, mostram uma redução do escoamento superficial e da vazão média anual, mas em termos de serviços ambientais reflete-se muito mais favoravelmente na redução dos eventos de inundação devido à diminuição dos pulsos hidrológicos extremos, e no aumento da vazão de estiagem devido ao aumento do escoamento básico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta tese foi o de avaliar por meio de modelagem numérica os impactos decorrentes das mudanças de uso da terra e da variabilidade climática nos recursos hídricos (vazão e fluxo de sedimentos), em mesoescala (bacia do rio Piracicaba) e em pequena escala (microbacia do Ribeirão das Posses).

1.1.2 Objetivos Específicos

- (a) Descrever e analisar a hidroclimatologia regional da bacia do rio Piracicaba e da microbacia do Ribeirão das Posses;
- (b) Configurar, calibrar e validar o modelo SWAT para a bacia do rio Piracicaba e para a microbacia do Ribeirão das Posses;
- (c) Investigar a variabilidade simulada nos fluxos hidrológicos e de sedimentos com cenários de mudança de uso da terra e cenários de mudanças climáticas, para auxiliar na interpretação de potenciais impactos.

Esta tese está estruturada em três partes. Na primeira parte (metodologia) é descrita a área de estudo, os dados e as técnicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Na segunda parte encontram-se os resultados alcançados e por fim na terceira parte estão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

2.1.1 Bacia do rio Piracicaba

Situada na porção Centro-Leste da bacia sedimentar do Paraná, entre as coordenadas 45°50' e 48°30' Oeste e 22°00' e 23°20' Sul, a bacia do rio Piracicaba tem grande importância econômica nacional (Figura 1) estendendo-se por uma área de aproximadamente 12.500km², entre os estados de São Paulo e Minas Gerais.



Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Rio Piracicaba

Fonte: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2010

Na bacia ocorrem rochas cristalinas do embasamento, rochas sedimentares correspondentes à Bacia Sedimentar do Paraná, rochas ígneas básicas e coberturas sedimentares cenozoicas. As rochas sustentam as seguintes formas de relevo: planície aluvial, colinas, morrotes, morros, serras/montanhas, mesas basálticas, encostas com cânions locais e escarpas, e especificamente no caso da porção mineira, grandes monolitos de rocha sã, com formas evoluindo para o tipo “pão-de-

açúcar” (IBGE, 2010). A parte mais alta da bacia, na Serra da Mantiqueira, localiza-se a Leste com 2030m de altitude e a parte mais baixa, a foz no rio Tietê, localiza-se a Oeste, com 450m de altitude.

Os solos encontrados na bacia são classificados como Areias quartzosas, Cambissolos, Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo e Podzólicos Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2011). Na cobertura da bacia se observa grande área de pastagem, áreas de floresta perene (mata atlântica, cerrado), cana-de-açúcar, eucaliptos e áreas urbanas. Áreas de preservação permanente (com mata atlântica) correspondem à serra da bacia do Corumbataí, entorno da Bacia do Cantareira, próximo à cidade de Rafard, Serra do Japi e no corredor Cantareira - Serra da Mantiqueira. Já as áreas de cerrado, encontram-se na porção Leste da bacia, nas localidades de Descalvado, de São Pedro a Itirapina, Ipeúna a São Pedro e Barreiro Rico.

Os principais cursos d'água na bacia são os rios Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Corumbataí, Jaguari e o Piracicaba. Na bacia estão localizados os reservatórios da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita (rio Piracicaba), o reservatório Salto Grande (rio Atibaia), o reservatório Jaguari-Jacareí (rio Jacareí), o reservatório Atibainha (rio Atibainha) e o reservatório Cachoeira (rio Cachoeira).

A agricultura na bacia se destaca pelo predomínio de produção de cana-de-açúcar, a pecuária (corte e leiteira) e culturas como a batata, milho e feijão (porção mineira). Existe alta atividade industrial, abrigando os setores mais modernos da economia do país, como as indústrias de alimentos, bebidas, o parque têxtil, o pólo Petroquímico e o de alta tecnologia.

Os reservatórios Jaguari-Jacareí (rio Jaguari e Jacareí), Atibainha (rio Atibainha), Cachoeira (rio Cachoeira), e Juquery (localizado na bacia do Alto Tietê) formam um sistema de abastecimento denominado de Sistema Cantareira (Figura 2). O Sistema Cantareira tem uma área aproximada de 2.279km², abrangendo um total de 12 municípios. Neste sistema ocorre a transposição de água da Bacia do Piracicaba para a Bacia do Alto-Tietê. Responsável pela produção de aproximadamente metade da água consumida pela Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

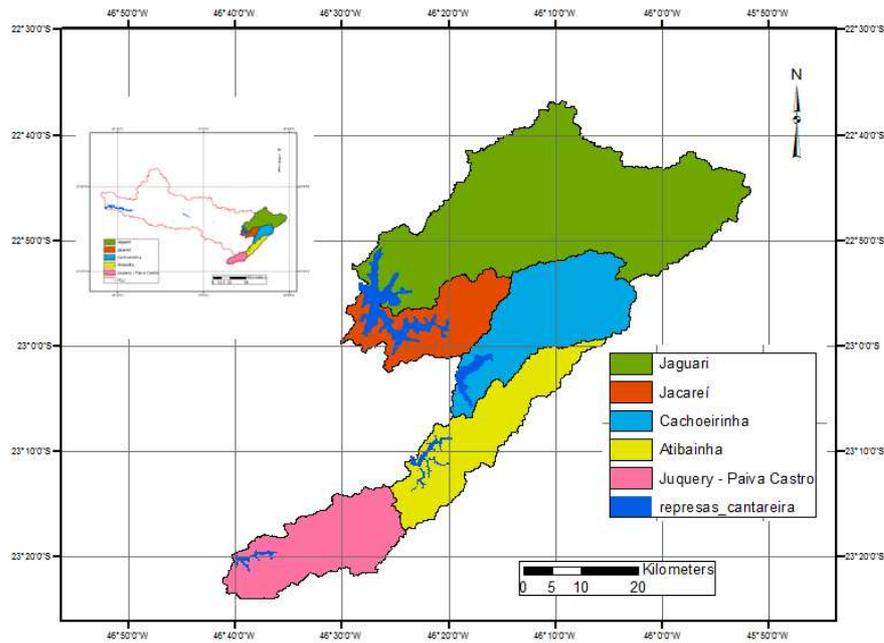


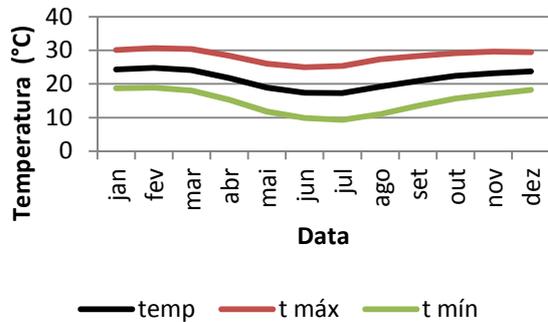
Figura 2 – Bacias e represas que compõem o Sistema Cantareira

Fonte: Arquivo pessoal

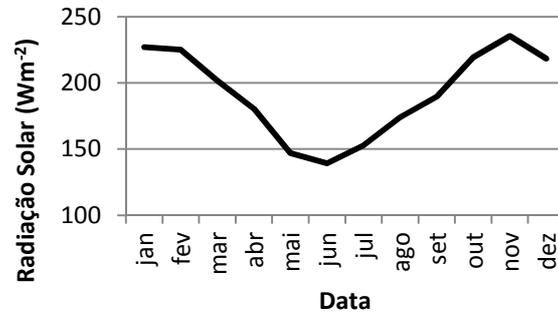
Em 1966 teve início a construção do Sistema Cantareira, com objetivo de solucionar os problemas de abastecimento da RMSP. Sua inauguração ocorreu em 1973, passando a operar somente no ano de 1974. O Sistema produz $33\text{m}^3\text{s}^{-1}$, destes, $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ são provenientes da bacia do Piracicaba e $2\text{m}^3\text{s}^{-1}$ proveniente da bacia do Alto Tietê (COMITÊ PCJ, 2004). A relação entre demanda e disponibilidade hídrica na bacia do rio Piracicaba é considerada muito crítica. O rio Piracicaba inicia no município de Americana, pela junção dos rios Jaguarí e Atibaia, seguindo até a represa de Barra Bonita (SP), onde ocorre sua foz junto ao rio Tietê. A bacia do rio Piracicaba tem clima temperado úmido, com período seco no inverno e chuvoso no verão (classificação de Köppen).

Na climatologia de médias mensais (Figura 3) da região observamos a radiação solar (Figura 3b) incidente na superfície com média anual de 192 Wm^{-2} , e as temperaturas médias em torno de $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ com máximas chegando a $28,2\text{ }^\circ\text{C}$ e mínimas de $14,7\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 3a). O total anual médio de precipitação é de 1432 mm , onde encontramos os maiores valores nos meses de outubro a março caracterizando assim a estação chuvosa, e de abril a setembro a estação seca com os menores valores de precipitação (Figura 3f). A umidade relativa (Figura 3d) média

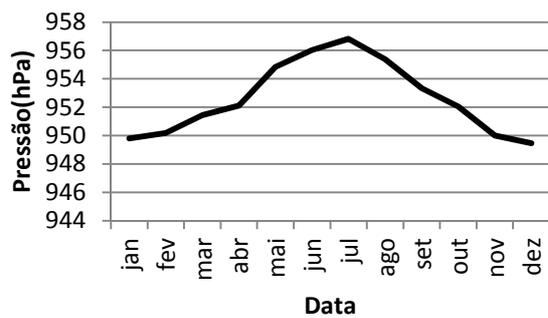
é de 72,3 %, o vento médio (Figura 3e) de $2,5 \text{ ms}^{-1}$. A pressão atmosférica média na superfície (Figura 3c) é de 952,6 hPa, que assim como o vento é defasada sazonalmente da precipitação, temperatura, umidade e radiação solar. Como esperado.



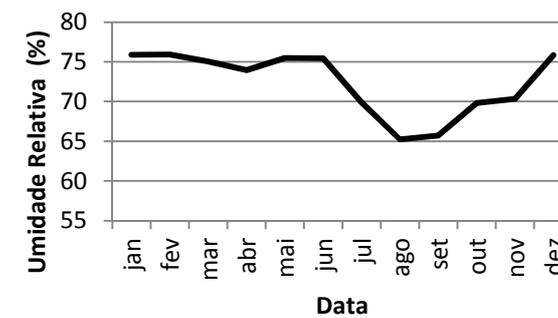
(a)



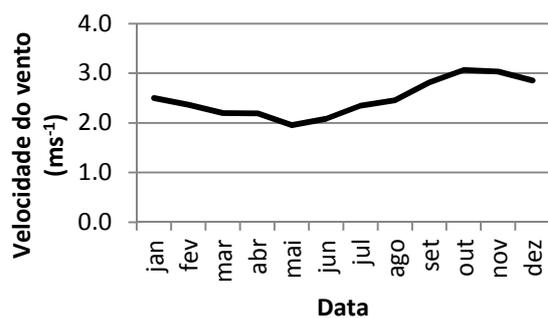
(b)



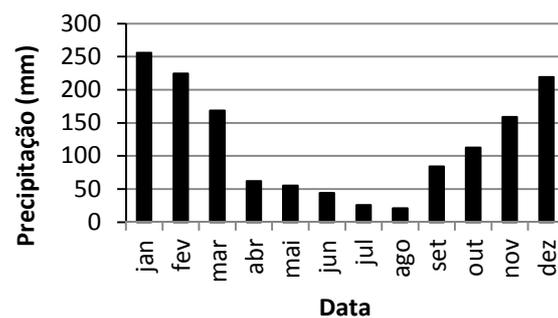
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3 - (a) Climatologia da temperatura média, mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), (b) Radiação Solar (Wm^{-2}), Pressão atmosférica (hPa), (d) Umidade Relativa (%) e (e) Velocidade do vento (ms^{-1}), para a bacia do rio Piracicaba

A Figura 4 mostra os pontos de vazão líquida e fluxo de sedimentos, escolhidos para análise das simulações incluindo-se três estações de vazão do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE (Tabela 1). Para a calibração da vazão do modelo foram utilizados apenas dois pontos, os postos Recreio e Carioba e para a calibração de fluxo de sedimentos foi utilizado o posto Atibaia.

Tabela 1 - Estações fluviométricas do DAEE utilizadas para comparação com resultados das simulações do modelo

ID	Nome do posto	Latitude	Longitude	Área de drenagem
4D-021	Recreio	22°37'Sul	47°41'Oeste	1.648 Km ²
4D-010	Carioba	22°43'Sul	47°21'Oeste	7.078 Km ²
4D-007	Artemis	22°41'Sul	47°47'Oeste	11.040 Km ²

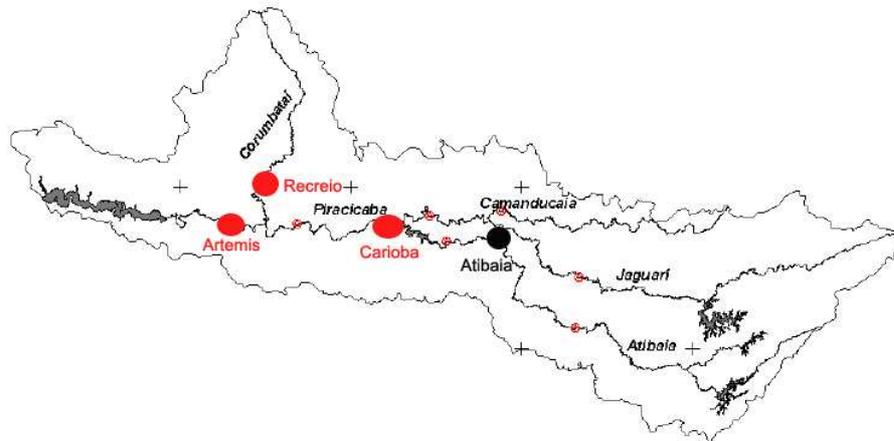


Figura 4 – Locais dos pontos de análise para vazão (vermelho) e fluxo de sedimentos (preto)

Fonte: Adaptado de PIRACENA (2014)

Como conduta de planejar os experimentos de modelagem visando ao estudo dos fluxos de sedimentos, de forma preparatória às simulações propriamente ditas com o modelo SWAT, é necessário configurar o modelo preparando os dados de entrada (forçantes) e as condições de contorno, e mais além calibrar os parâmetros e validar o modelo para a área de estudo. A configuração do modelo é descrita a seguir.

O Modelo Numérico de Terreno (MNT) ou Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática da distribuição espacial da elevação sobre a superfície terrestre. Se essa elevação for a altura média acima do nível do mar, será chamado de MNT. Para a bacia do rio Piracicaba o MNT mostra um desnível topográfico variando de 2030m nas cabeceiras da bacia a Leste até 450m no exutório junto ao rio Tietê (Figura 5).

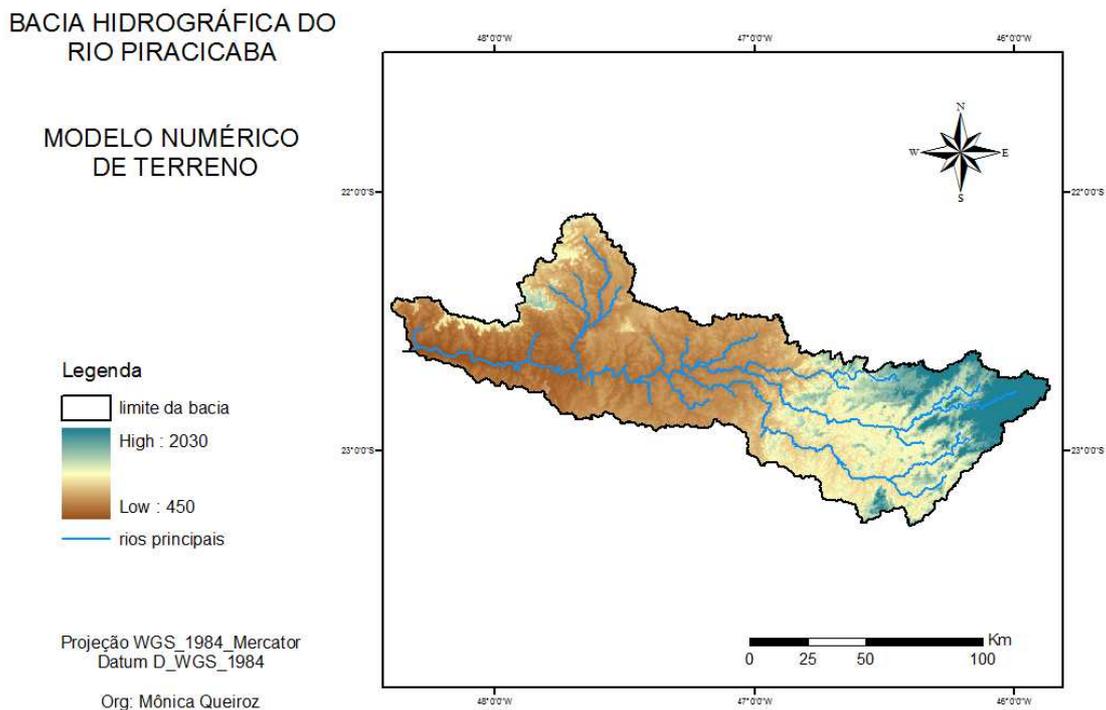


Figura 5 - Modelo Numérico de terreno para a bacia do rio Piracicaba

Fonte: GDEM (Global Digital Elevation Model), 2013

O mapa de solos da bacia do Piracicaba (Figura 6) apresenta cinco classes classificadas como: areias quartzosas, cambissolos, latossolo vermelho-escuro, latossolo vermelho-amarelo e o podzólico vermelho-amarelo (EMPRAPA, 2011). A bacia apresenta maiores ocorrências de solos Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolos (Tabela 2). As características físicas e os parâmetros dos solos utilizados para a simulação do SWAT estão descritas em Baldissera (2005).

BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO PIRACICABA

TIPO DE SOLO

Legenda

-  limite da bacia
-  rios principais
-  PV
-  CA
-  LE
-  LV
-  AQ

Projeção WGS_1984_Mercator
Datum D_WGS_1984

Org: Mônica Queiroz

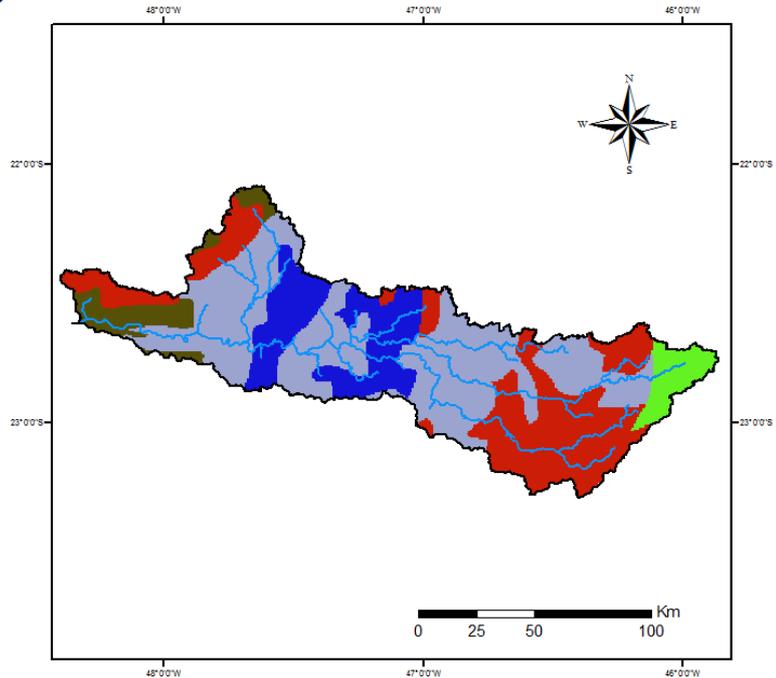


Figura 6 - Mapa de solos da bacia do rio Piracicaba com os tipos de solos: areias quartzosas (AQ), cambissolos (CA), latossolo vermelho-escuro (LE), latossolo vermelho-amarelo (LV) e o podzólico vermelho-amarelo (PV)

Fonte: EMPRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), 2011

Tabela 2 – Tipos de Solos que compõem a bacia do Piracicaba, código no modelo e porcentagem de distribuição da área total

Solo	Código SWAT	Porcentagem (%)
Podzólico Vermelho Amarelo	PV	43,32
Cambissolo	CA	3,78
Latossolo Vermelho Escuro	LE	16,31
Latossolo Vermelho Amarelo	LV	29,56
Areias Quartzosas	AQ	7,03
TOTAL		100

O modelo requer a prescrição de informações do uso da terra (Figura 7) e suas características (SILVA et al., 2008). Na Tabela 3 verificam-se as porcentagens de usos da terra, em que dominam as áreas de pastagem seguidas por áreas de cana de açúcar.

BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA

USO DO SOLO

Legenda

-  limite da bacia
-  rios principais
-  FRSE
-  PAST
-  WATR
-  URMD
-  CANA
-  EUCA

Projeção WGS_1984_Mercator
Datum D_WGS_1984

Org: Mônica Queiroz

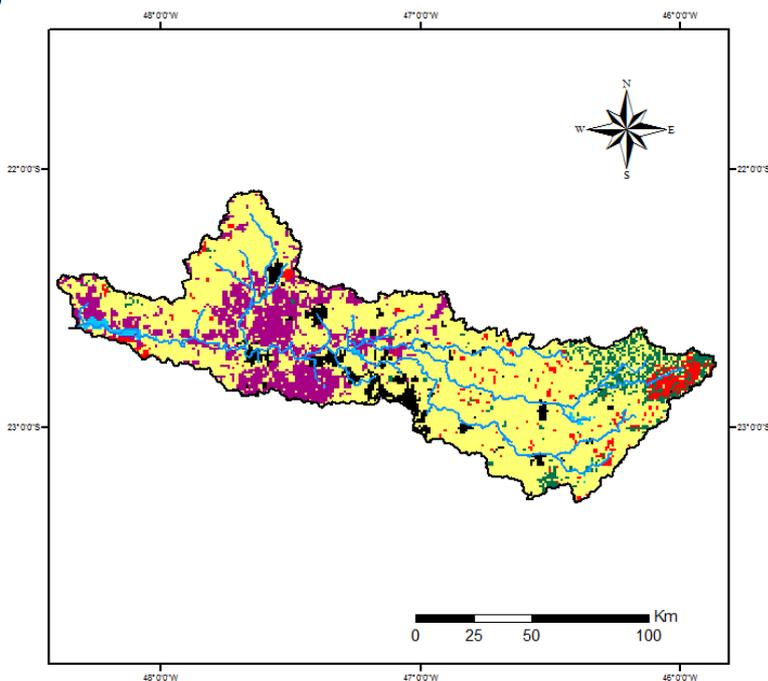


Figura 7 - Mapa de usos da terra para a bacia do rio Piracicaba onde os tipos de usos são: floresta (FRSE), pastagem (PAST), água (WATR), área urbana (URMD), cana de açúcar (CANA) e eucalipto (EUCA)

Fonte: SILVA et al., 2008

Tabela 3 – Usos da terra que compõem a bacia do Piracicaba, código no modelo e porcentagem de distribuição de área total

Uso da terra	Código SWAT	Porcentagem (%)
Floresta	FRSE	4,41
Pastagem	PAST	69,37
Água	WATR	1,03
Urbanização	URBN	5,18
Cana de açúcar	SUGC	16,28
Eucalipto	EUCA	3,73
TOTAL		100

Devido ao represamento da água nos reservatórios do sistema Cantareira, que interrompe o regime natural do fluxo de sedimentos, configura-se o modelo de forma que a área à montante dos reservatórios não é incluída nos cálculos (denominada de “Inland” na terminologia do modelo). Desta forma, para considerar apropriadamente o regime de vazão à jusante dos reservatórios, foram informadas as vazões referentes às descargas dos reservatórios Jaguari-Jacarei, Cachoeira e Atibaia do Sistema Cantareira na saída de cada um, para fim de considerar os processos antrópicos e não controlados pelos ciclos naturais, e analisar a simulação no restante da bacia com coerência.

2.1.2 Microbacia do Ribeirão das Posses

A microbacia hidrográfica do Ribeirão das Posses (Figura 8) está localizada no município de Extrema-MG. Ocupa uma área de 12km² no perímetro rural com pouca ocupação populacional (1000 vezes menor que a bacia do rio Piracicaba), nas regiões das nascentes do rio Piracicaba, sendo suas águas tributárias do rio Jaguari (Figura 9). A microbacia faz parte do projeto “Conservador de Águas” que realiza pagamentos por serviços ambientais aos proprietários rurais, visando mitigar efeitos de escassez de água.

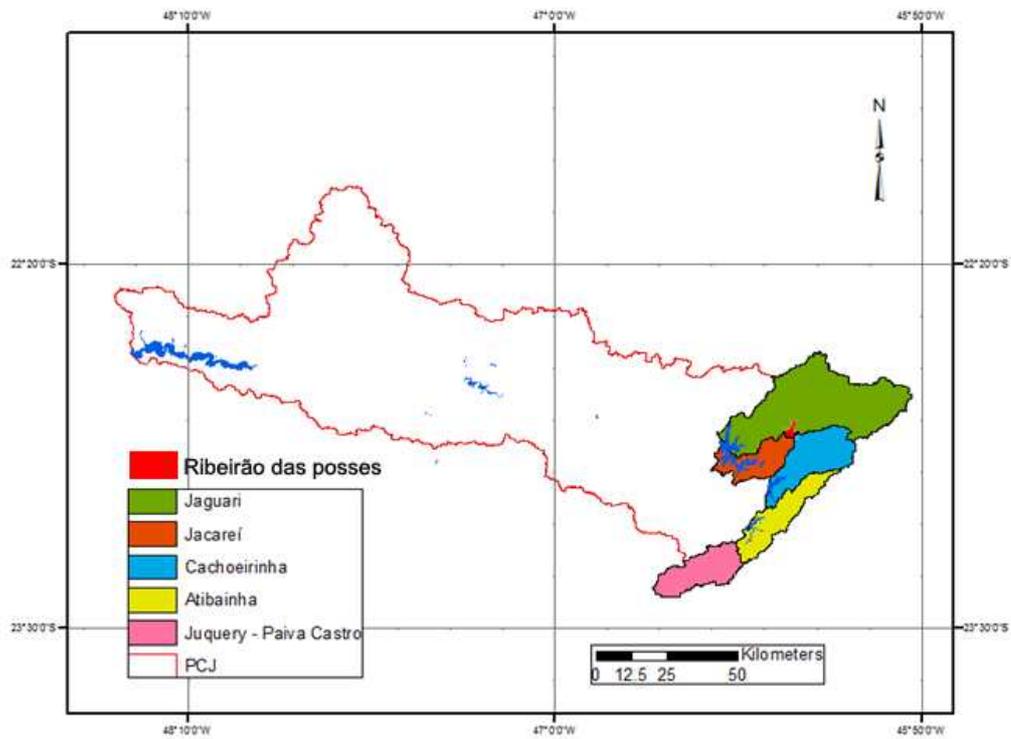


Figura 8 - Mapa de localização da microbacia do Ribeirão das Posses, localização do Sistema Cantareira e Bacia do rio Piracicaba



Figura 9 – Reservatório Jaguarí e nascente, Extrema-MG

Fonte: Arquivo pessoal

Pela localização de 950 m acima do nível do mar a microbacia do Ribeirão das Posses apresenta um clima temperado úmido (Köppen). A região tem radiação solar (Figura 10b) média de 202 Wm^{-2} , temperatura média (Figura 10a) em torno de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ com máximas médias chegando a $27 \text{ }^\circ\text{C}$ e mínimas chegando a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. A pressão atmosférica média (Figura 10c) fica em torno de 897 hPa , com umidade relativa (Figura 10d) de 82% , e a velocidade do vento média (Figura 10e) fica em torno de $2,5 \text{ ms}^{-1}$.

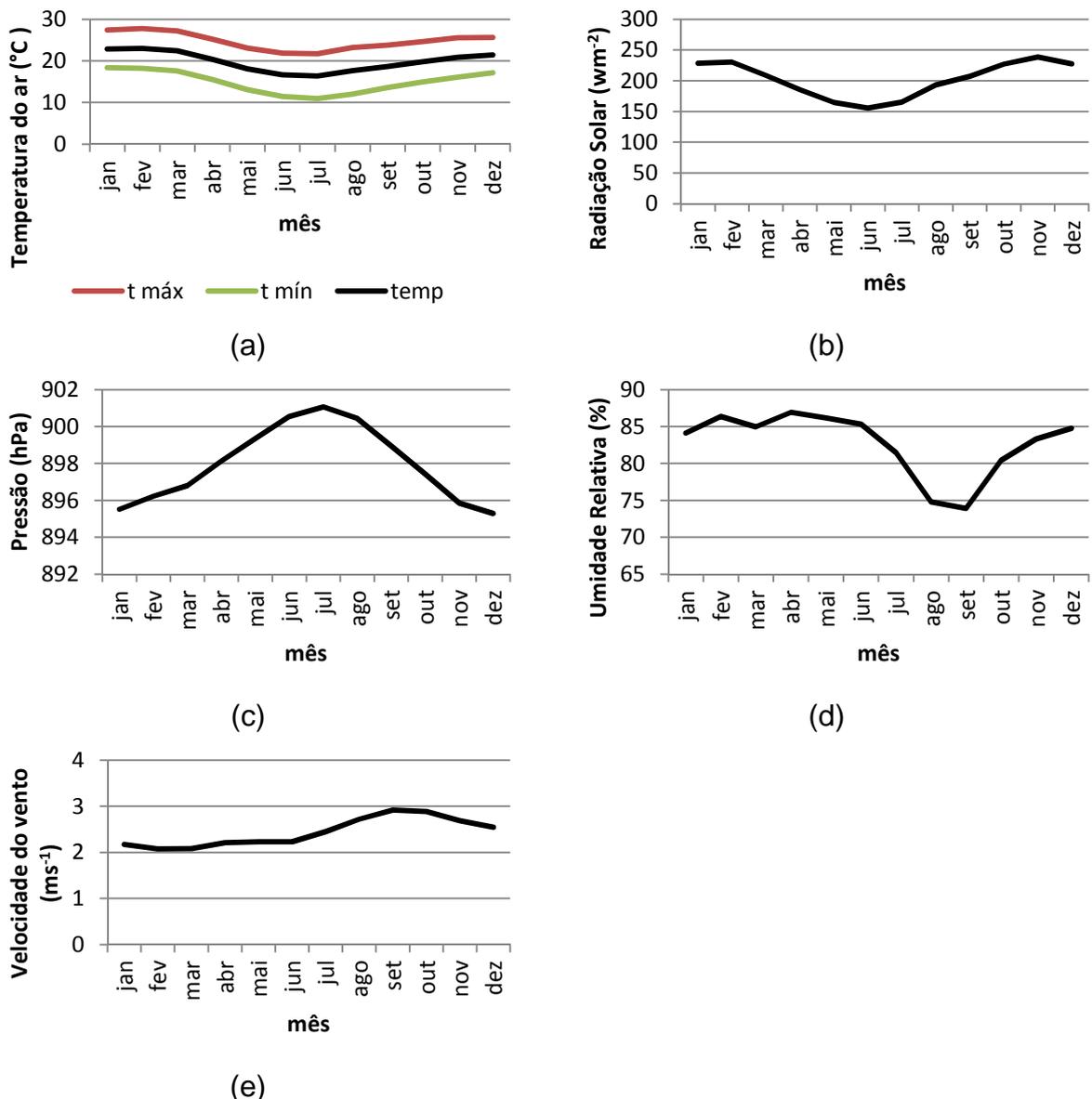


Figura 10 - (a) Climatologia da temperatura média, mínima e máxima do ar ($^\circ\text{C}$), (b) Radiação Solar (Wm^{-2}), Pressão atmosférica (hPa), (d) Umidade Relativa (%) e (e) Velocidade do vento (ms^{-1}), para a microbacia do Ribeirão das Posses

Fonte: CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), 2012

Na Figura 11 observamos a climatologia da precipitação (mm) para a região em estudo, com uma distribuição sazonal de precipitação semelhante à distribuição média na bacia do Piracicaba (Figura 11), no entanto com mais chuva nos meses de Inverno devido ao efeito orográfico. O hidrograma de vazão (m^3s^{-1}) observado durante 2 anos de medidas mostra um acompanhamento do ciclo anual de precipitação, variando entre 0,1 e 0,6 m^3s^{-1} .

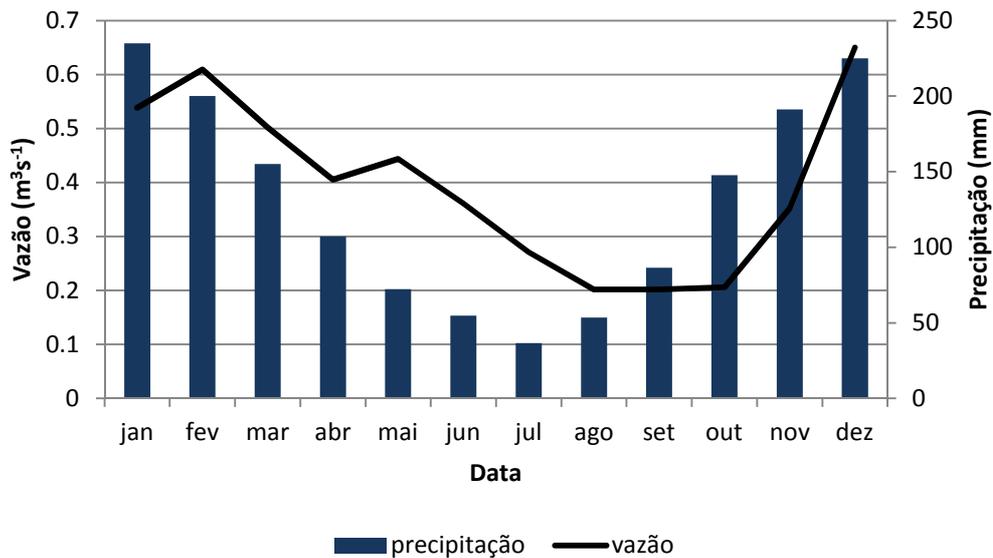


Figura 11 - Climatologia da precipitação (mm) e hidrograma da vazão (m^3s^{-1}) para a microbacia do Ribeirão das Posses

Fonte: ANA/CPRM (Agência Nacional de Águas e Serviço Geológico do Brasil)

O modelo numérico de terreno da microbacia do Ribeirão das Posses tem um acentuado grau de declive, com diferença de 500 m entre o divisor de águas da bacia no ponto mais alto com 1452 m e o seu exutório com 952 m (Figura 12).

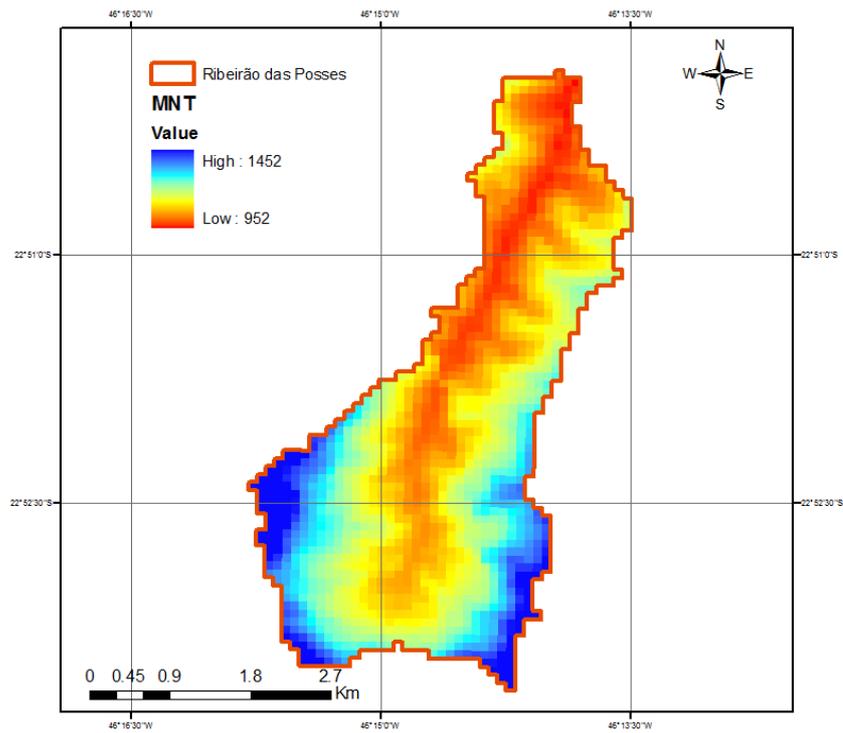


Figura 12 - MNT da microbacia do Ribeirão das Posses

Fonte: GDEM (Global Digital Elevation Model), 2013

O mapa de uso da terra da microbacia do Ribeirão das Posses (Figura 13) apresenta áreas de pastagem, mata atlântica, eucalipto e água (Tabela 4). Sendo que a microbacia tem predominância de uso da terra por áreas de pastagem, seguida de áreas de mata atlântica.

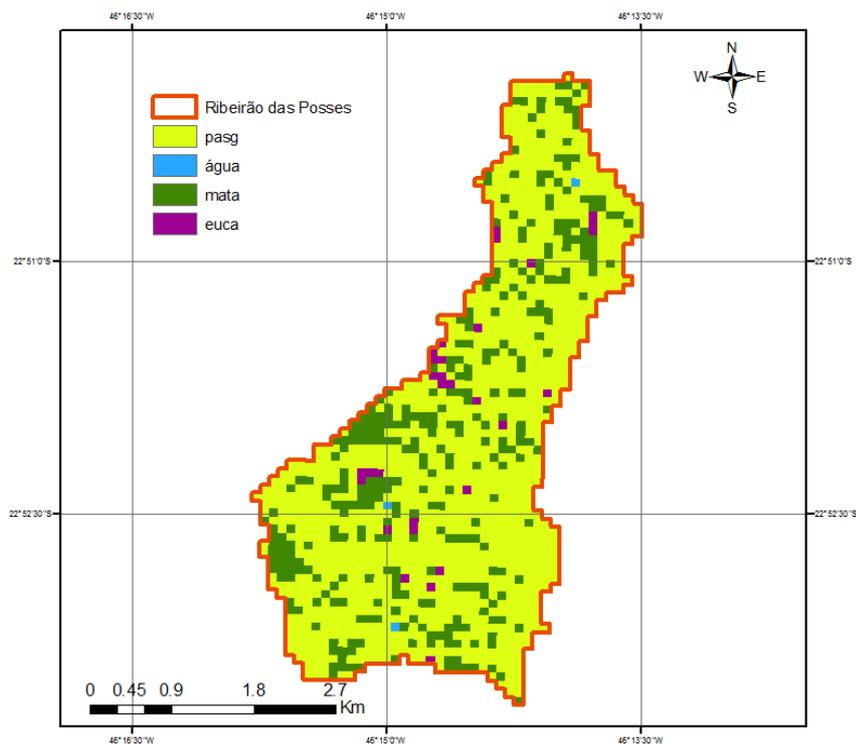


Figura 13 - Mapa de uso da terra da microbacia do Ribeirão das Posses, onde pastagem (pasg), água, mata atlântica (mata) e eucalipto (euca)

Fonte: AZEVEDO, 2009

Tabela 4 - Porcentagem de uso da terra da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG

Nome	Uso da terra	Cobertura (%)
PASG	Pastagem	75.95
ÁGUA	Água	0.19
MATA	Mata Atlântica	21.92
EUCA	Eucalipto	1.94
TOTAL		100

A Figura 14 mostra o mapa de solos da microbacia do Ribeirão das Posses tendo os seguintes tipos de solos: Neossolo Flúvico, Cambissolo Húmido, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico e Argissolo Vermelho e Amarelo (Tabela 5) com predominância dos solos Cambissolo Háplico e Argissolo Vermelho e Amarelo.

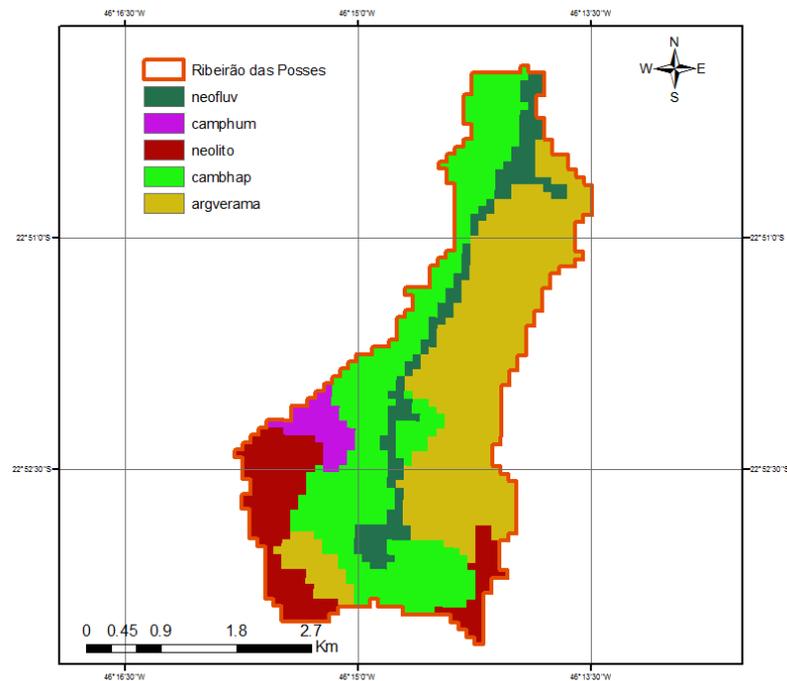


Figura 14 - Mapa de solo da microbacia do Ribeirão das Posses, onde Neossolo Flúvico (neoflúv), Cambissolo Húmido (cambhum), Neossolo Litólico (neolito), Cambissolo Háplico (cambhap) e Argissolo Vermelho e Amarelo (argverama)

Fonte: CALHEIROS, 2009

Tabela 5 - Porcentagem de solo da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG

Nome	Solo	Cobertura (%)
NEOFLUV	Neossolo fluvico	9.67
CAMPHUM	Cambissolo húmido	3.48
NEOLITO	Neossolo litólico	13.03
CAMBHAP	Cambissolo háplico	34.24
ARGVERAMA	Argissolo vermelho e amarelo	39.58
TOTAL		100

O mapa com locais das estações de dados meteorológicos utilizados para a simulação (Figura 15) mostra as cinco estações de precipitação da Agencia Nacional de Águas (ANA/CPRM).

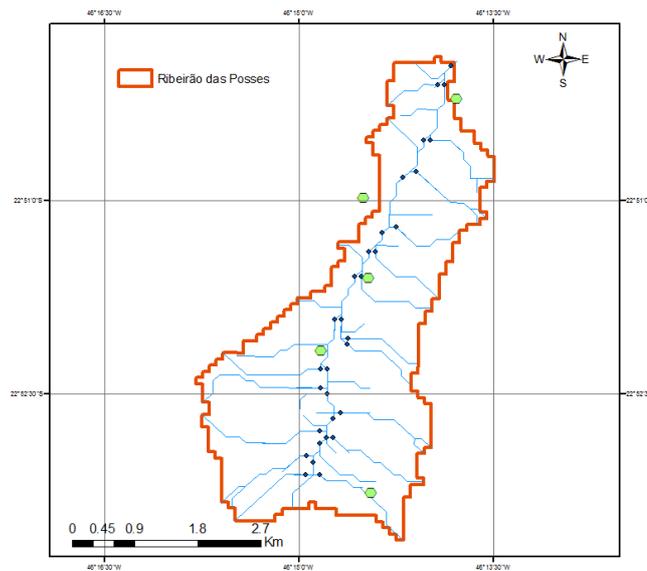


Figura 15 - Mapa de localização e pontos de monitoramento (círculo em verde), exutórios de subbacias (pontos em azul) da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG

2.2 Modelagem

Modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas para melhorar o entendimento e a representação dos fluxos hidrológicos, o que inclui também a dependência das condições da bacia hidrográfica. O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido pelo Grassland, Soil and Water Research Laboratory no Texas/USA, para prever o impacto, a longo prazo, das práticas de manejo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, na qualidade de água e fluxo de sedimentos em bacias hidrográficas (NEITSCH et al., 2005). É classificado como um modelo matemático, biogeoquímico, contínuo, dinâmico, determinístico, distribuído e de balanço hídrico. Todos os processos são simulados em escala de tempo diária.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem, e é de maneira geral, um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros (RENNÓ; SOARES, 2000). Devido à complexidade dos processos hidrológicos no solo, associados à influência da cobertura vegetal e da distribuição espacial da precipitação a utilização de modelos matemáticos é praticamente

imprescindível para uma adequada interpretação dos fenômenos envolvidos (COLLISCHONN, 2003).

O SWAT é integrado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), e requer informações específicas sobre o clima, solo, topografia, vegetação e práticas de manejo que ocorrem na bacia. Para a simulação, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias.. O modelo realiza o delineamento da bacia hidrográfica, das sub-bacias e da rede hidrográfica baseado no modelo numérico de terreno (MNT), sendo possível também a inserção de uma rede hidrográfica digitalizada.

O modelo requer como dados de entrada, em especial as condições de contorno:

- I. O modelo numérico de terreno (MNT);
- II. Mapa de solos e suas propriedades;
- III. Mapa de vegetação ou uso da terra e suas propriedades;

E as forçantes temporais seguintes:

- I. Dados meteorológicos (dados diários):
 - a. Irradiância solar ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 - b. Precipitação (mm);
 - c. Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$);
 - d. Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$);
 - e. Velocidade do vento (ms^{-1}).
 - f. Umidade relativa (fração da unidade)

A partir da combinação do MNT, mapa de solos e uso da terra, o SWAT gera as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) para cada sub-bacia. Nesta etapa o modelo analisa as diferenças nos processos hidrológicos em função das características específicas de cada HRU. Cada sub-bacia pode conter uma ou mais HRUs, sendo seu número em função da representatividade de cada unidade na sub-bacia e do nível de detalhamento desejado. Para um melhor entendimento dos processos de trabalho do modelo, o fluxograma de tarefas é mostrado na Figura 16.

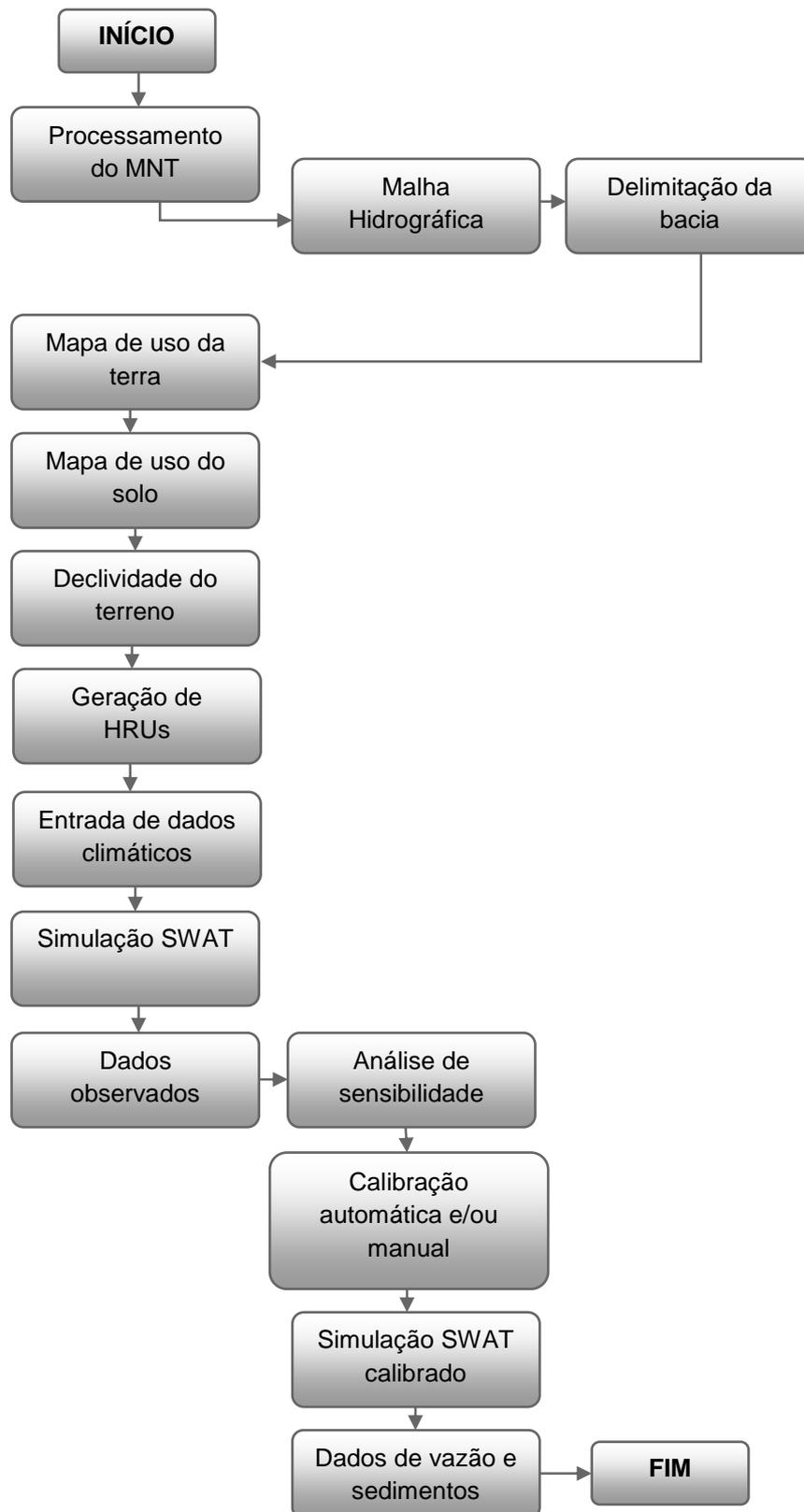


Figura 16 - Fluxograma de trabalho do modelo SWAT

O SWAT foi fundamentado em uma estrutura de comandos que propaga o escoamento, sedimentos e substâncias químicas através da bacia, seu equacionamento quanto ao ciclo hidrológico e sedimentos encontra-se no ANEXO A. Seus componentes principais incluem a hidrologia, clima, sedimentos, crescimento de plantas, nutrientes e manejo agrícola. O componente hidrológico tem rotinas de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno ao aquífero raso e evapotranspiração, sendo composto por quatro compartimentos:

- I. Reservatório superficial;
- II. Reservatório subsuperficial;
- III. Reservatório subterrâneo – aquífero raso;
- IV. Reservatório subterrâneo – aquífero profundo.

2.3 Calibração e períodos de simulação

As simulações para a bacia do rio Piracicaba compreenderam o período de tempo de 1994 a 2010, onde os três primeiros anos foram suprimidos da análise devido ao *warm-up* do modelo. Primeiramente foi realizada a análise de sensibilidade (para o fluxo de sedimentos) dos parâmetros mais sensíveis do modelo. Após este procedimento foi realizada a calibração automática do modelo. O período de tempo utilizado para calibração foi de 2000 a 2004 em 2 postos fluviométricos (Recreio e Carioba) na bacia e no posto com dados hidrosedimentológicos (Atibaia) foi realizada a calibração no período de 1997 a 2000. Os dados do posto de Artemis foram utilizados para comparação da vazão referente a bacia do Piracicaba para as simulação com cenário de mudança do clima.

Todas as análises na microbacia do Ribeirão das Posses serão realizadas no ponto do seu exutório. Os dois primeiros anos (2009-2010) de simulação são descartados, devido ao *warm-up* do modelo. A validação do modelo não foi realizada devido aos dados observados de vazão estarem com diversas falhas e sua série de dados ser muito pequena (2 anos). O período utilizado para análise foram os anos de 2011 e 2012.

Os parâmetros calibrados para evapotranspiração e vazão na bacia do rio Piracicaba foram obtidos de Silva (2014), que realizou simulações em períodos e

áreas semelhantes às realizadas neste trabalho. Silva (2014) iniciou a calibração manual do modelo hidrológico pela evapotranspiração, seguida de calibração automática da vazão e procedendo das subbacias a montante para jusante. Tanto quanto a precipitação, a evapotranspiração é um elemento chave para fechamento do balanço hídrico, e sua calibração é importante para se obter uma melhor representação da vazão. A calibração da evapotranspiração de Silva (2014) consistiu basicamente no desenvolvimento de três etapas, a primeira de implementação no modelo de uma função para prescrever o Índice de Área Foliar (IAF) sazonalmente para diferentes vegetações; a segunda de prescrever o albedo solar global para diferentes vegetações, e a terceira a calibração manual de parâmetros de controle da fração evaporativa. No SWAT o IAF influencia diretamente no cálculo de dois processos: a transpiração potencial, a partir do método de Penman-Monteith, e a interceptação da precipitação pelo dossel, que posteriormente será evaporada e contabilizada no cálculo da evapotranspiração. A Tabela 6 mostra os parâmetros utilizados para calibração da evapotranspiração, a condutância estomática máxima (gsi), a capacidade máxima de interceptação do dossel (canmx), a altura máxima do dossel (chtmx), a profundidade máxima das raízes (rdmx), o coeficiente de evaporação do solo (esco), o IAF máximo (blai) e o IAF mínimo (alai_{min}).

Tabela 6 - Parâmetros fisiológicos dos tipos de cobertura vegetal, obtidos na calibração da evapotranspiração, segundo Silva (2014). A altura máxima da vegetação (chtmx) não foi modificada durante a calibração, sendo prescrita segundo a literatura existente

Uso da terra	Gsi (ms⁻¹)	canmx (mm)	chtmx (m)	rdmx (m)	esco	blai (m²s⁻²)	alai_{min} (m²m²)
Cana de açúcar	0,0025	1	4	2	1	4	1,5
Cerrado	0,0035	1,6	10	6	1	3,5	1,8
Eucalipto	0,009	1,6	21	6	1	5,5	1,5
Floresta	0,005	1,8	30	6	1	6	4,5
Pastagem	0,003	0,7	1,2	1,5	0,98	3	1,5

Para realizar a calibração de fluxo de sedimentos foram utilizados os dados de Nascimento (2001). Estes dados consistem em valores pontuais de fluxo de sedimentos coletados em eventos não regulares no período de 09/01/1997 a 22/04/2010, realizadas no mesmo local de coleta de vazão do rio Atibaia, no Distrito de Souzas em Campinas - SP.

Antes de realizar a calibração do fluxo de sedimentos foi feita a análise de sensibilidade automática dos parâmetros que envolvem o cálculo do fluxo de sedimentos. A análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes de resposta do modelo em função de mudanças de valores nos parâmetros de entrada. A análise de sensibilidade realiza uma avaliação dos parâmetros empregados na simulação em função da qualidade de suas respostas em relação aos dados observados. O modelo SWAT emprega dois métodos de avaliação de sensibilidade de parâmetros, o *Latin Hypercube (LH)* e o *One-factor-at-a-time (OAT)*, os quais estão descritos em Arabi et al., (2007) e Mulungu e Munishi (2007). Esta análise de sensibilidade contemplou seis parâmetros analisados: o Fator de cobertura do canal (Ch_Cov), o Fator de erodibilidade do canal (Ch_Erod), o Coeficiente linear de fluxo de sedimento (Spcon), o Coeficiente exponencial de fluxo de sedimento (Spexp), o Fator de cobertura vegetal (Usle_C) e o Fator relativo às práticas de conservação e manejo do solo (Usle_P). A análise de sensibilidade provê como resposta o ranque de sensibilidade dos parâmetros, com valores variando entre 1 (maior sensibilidade) e 28 (menor sensibilidade).

Para a análise de fluxo de sedimentos não foi realizada a validação devido ao pouco número de dados existentes e também devido às coletas de dados esporádicas.

Vários trabalhos utilizaram técnicas de avaliação estatística em pesquisas com aplicabilidade do SWAT. As técnicas e índices com melhores desempenhos encontradas foram o COE (Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe) e o PBIAS (Tendência Percentual), (MORIASI et al., 2007).

O primeiro índice a ser utilizado é o COE (Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe). O coeficiente é um número adimensional, varia de menos infinito até 1, sendo 1 indicativo de um ajuste perfeito. Representa a proporção da variância explicada em relação à variância dentre os eventos observados e calculados, eq. (1).

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

Onde:

E_m = Evento observado (m = medido no campo)

E_s = Evento simulado pelo modelo

\bar{E} = Média dos eventos observados no período de simulação

n = Número de eventos

O segundo índice utilizado é o PBIAS (Tendência Percentual), que indica se a tendência média dos valores simulados são maiores ou menores que os observados. Quando menor o PBIAS melhor é seu ajuste, em que 0% representa um perfeito ajuste, conforme eq. (2).

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n E - E^*}{\sum_{i=1}^n E} * 100 \quad (2)$$

Onde:

E = Evento observado

E^* = Evento simulado pelo modelo

Recomenda-se utilizar critérios qualitativos junto aos critérios quantitativos para uma melhor avaliação da performance do modelo. A Tabela 7 apresenta estes critérios segundo Moriasi et al. (2007) a partir uma extensa revisão sobre calibração e validação do modelo SWAT.

Tabela 7 - Classificação dos resultados para os índices de eficiência com o SWAT para estimativas mensais (MORIASI et al., 2007)

Classificação	COE	PBIAS
Muito bom	$0,75 < COE \leq 1,00$	$PBIAS \leq \pm 10$
Bom	$0,65 < COE \leq 0,75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < COE \leq 0,65$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$COE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

2.4 Dados

2.4.1 Sistema Computacional

O modelo hidrológico SWAT foi utilizado através da interface gráfica ArcGIS 9.3, integrando-se ao software de sistema de informação geográfica pela interface ArcSWAT 2005 (NEITSCH et al., 2005).

2.4.2 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para as simulações foram os dados de reanálise do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Dados de reanálises são dados reanalizados e espacializados em pontos de grade regular, com resolução de 0.31°, para o período de 1979 a 2012. Deste conjunto de dados foram utilizadas as variáveis na resolução diária: umidade relativa, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento e irradiância solar incidente.

Para o cenário de mudança do clima foram utilizados os dados das simulações numéricas realizadas com o modelo ETA (CHOU et al., 2011). Os dados utilizados são do período de 1970 a 1990 (clima do passado ou atual) e de 2078 a 2098 (clima do futuro). Para o clima do futuro utilizou-se o cenário mais pessimista determinado pelo cenário A1B do IPCC. Deste conjunto de dados foram utilizadas as variáveis: umidade relativa, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento, precipitação e radiação solar.

Para a simulação da Bacia do Rio Piracicaba foram utilizados os dados de precipitação das estações do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo. Para a microbacia do Ribeirão das Posses, foram utilizados dados de precipitação das estações listadas na Tabela 8, pertencentes ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a Agência Nacional de águas (ANA).

Para caracterização da climatologia e verificação dos dados de reanálise na área de estudo foram utilizados os seguintes dados meteorológico:

a) Dados de estações meteorológicas automáticas de superfície (EMAS) do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) com as variáveis meteorológicas: precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, em médias diárias.

b) Dados das estações meteorológicas, convencional e automática da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), localizada no município de Piracicaba – SP (latitude: 22°42'30"S, longitude: 47°38'00"W e altitude: 546 m). A estação convencional tem uma observação diária às 07 horas local, de segunda a sexta-feira e durante o sábado e o domingo os dados são obtidos da estação automática.

Tabela 8 - Localização das estações de pontos de monitoramento de precipitação, da microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema-MG

ID	NOME ESTAÇÃO	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE	INÍCIO	FIM
1	Sítio Bela Vista	2246170	-22°50'59"	-46°14'30"	2008	2012
2	Nascente Principal	2246167	-22°53'16"	-46°14'27"	2008	2012
3	Sítio São José	2246168	-22°52'10"	-46°14'50"	2008	2012
4	Recanto do Ratinho	2246171	-22°50'13"	-46°13'47"	2008	2012
5	Sítio Canto da Siriema	2246169	-22°51'36"	-46°14'28"	2008	2012

2.4.3 Dados Hidrológicos

Para a bacia do rio Piracicaba os dados de vazão foram obtidos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a Agência Nacional de águas (ANA), através do Hidroweb no site da ANA. Para a microbacia do Ribeirão das Posses, os dados de cota observada foram obtidos no posto do Ribeirão das Posses (62584600), latitude 22°49'58' Sul e longitude 46°13'53" Oeste, no rio Ribeirão das Posses, localizado em Extrema-MG, mantidos pela ANA/CPRM, com rede de drenagem é de 12km² e para os anos de 2009 a 2012.

Com a cota do rio, foi calculada a vazão pela curva chave dada em eq. (3), (SILVA, 2014).

$$Q = 11,4725(COTA - 0.287)^{2,03908} \quad (3)$$

Onde,

$q = \text{vazão (m}^3\text{s}^{-1}\text{)},$

$\text{cota} = \text{altura da régua liminimétrica (m)},$

Somente é válida para cotas superiores a 0,287m.

Os dados observados de sedimento para a bacia do rio Piracicaba foram retirados de Nascimento, 2001. Para a microbacia do Ribeirão das Posses foram obtidos dados de Saad (2013), que para estimar o fluxo de sedimentos calculou a turbidez, concentração de sedimentos e a vazão sólida.

2.4.4 Dados de entrada do modelo SWAT

O Modelo Numérico de Terreno utilizado na simulação do SWAT foi a segunda versão do ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM, 2013) com espaçamento horizontal de 30 metros (Figuras 5 e 12).

O mapa de solos para a bacia do rio Piracicaba utilizado foi da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011) na Figura 6 e para a microbacia do Ribeirão das Posses (CALHEIROS, 2009) na Figura 14.

O mapa de vegetação utilizado na bacia do Piracicaba (SILVA et al., 2008) foi com resolução de 1 km (Figura 7), e para a microbacia do Ribeirão das Posses (AZEVEDO, 2009) com resolução de 20 m (Figura 13).

2.5 Cenários

Com a modelagem matemática existe a hipótese de se alterarem as condições de contorno, as configurações dos parâmetros de entrada do modelo, as forçantes temporais, com o intuito de se testar a resposta do sistema. Assim pode-se gerar novos conjuntos de respostas para cenários, permitindo-se analisar o efeito estas perturbações, auxiliando na busca de possíveis soluções dos impactos negativos aos serviços ambientais na bacia.

2.5.1 Bacia do rio Piracicaba

Os cenários utilizados para a Bacia do rio Piracicaba foram de dois tipos, os específicos de uso da terra (1 a 5) e os associados ao clima (6 e 7). Nos cenários de 1 a 5 são utilizados dados meteorológicos da reanálise CFSR (2012) e nos cenários 6 e 7 são utilizados dados meteorológicos do modelo ETA (CHOU et al. 2011).

1. CTRL – Cenário atual de vegetação, com modificações dos parâmetros de entrada do modelo, com calibração manual e automática.
2. PAS – Cenário de desmatamento, substituição de vegetação atual por pastagem.
3. FLO – Cenário de reflorestamento natural, substituição da vegetação atual por floresta.
4. EUC – Cenário de reflorestamento com monocultura, substituição da vegetação atual por eucalipto.
5. CAN – Cenário de aumento de cana de açúcar, substituição de vegetação atual por de cana de açúcar.
6. SWAT_CTRL – Cenário que representa o clima atual, para os anos de 1970 a 1990.
7. SWAT_FUT – Cenário que representa o clima do futuro, para os anos de 2078 a 2098.

Em todos os cenários foram prescritas as áreas urbanas pertencentes à Bacia do Rio Piracicaba conforme representação no cenário CTRL.

2.5.2 microbacia do Ribeirão das Posses

Os cenários utilizados para a microbacia do Ribeirão das Posses foram muito semelhantes aos do rio Piracicaba, com algumas diferenças, mas ainda de dois tipos, os específicos de uso da terra (1 a 4) e os associados ao clima (5 e 6). Nos cenários de 1 a 4 são utilizados dados meteorológicos da reanálise CFSR (2012) e nos cenários 5 e 6 são utilizados dados meteorológicos do modelo ETA (CHOU et al.

2011). Na microbacia do Ribeirão das Posses não há cenário de cana de açúcar devido a região não possuir tal uso do solo.

1. CTRL – Cenário atual de vegetação, com modificações dos parâmetros de entrada do modelo, com calibração manual e automática.
2. PAS – Cenário de desmatamento da vegetação florestal e introdução de pastagem, com remoção de Mata Atlântica e Eucalipto.
3. FLO – Cenário de reflorestamento natural, substituição da Pastagem por Mata Atlântica e mantido a cobertura de Eucalipto.
4. EUC – Cenário de reflorestamento de monocultura, substituição Pastagem por Eucalipto e mantido a cobertura de Mata Atlântica.
5. SWAT_CTRL – Cenário que representa o clima atual, para os anos de 1970 a 1990.
6. SWAT_FUT – Cenário que representa o clima do futuro, para os anos de 2078 a 2098.

Para o cenário de mudanças climáticas foram utilizados os dados meteorológicos referentes à simulação do modelo regional ETA (CHOU et al., 2011) com resolução de 40km, provendo na bacia do Rio Piracicaba aproximadamente 10 pontos de grade, que foram extraídos e utilizados como forçantes para a simulação do modelo SWAT. Os dados de contorno utilizados para as rodadas com o modelo ETA foram extraídos do modelo global HadCM3 do Met Office Hadley Centre.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Bacia do Rio Piracicaba

Será feita inicialmente uma avaliação da vazão simulada, a partir dos parâmetros utilizados e descritos no item 2.3, seguindo-se a discussão da calibração dos parâmetros de controle dos fluxos de sedimentos.

O rio Piracicaba nasce no município de Americana, pela junção dos rios Jaguari e Atibaia, seguindo até a represa de Barra Bonita (SP), onde ocorre sua foz junto ao rio Tietê. Para analisar a bacia do Rio Piracicaba vamos simular as vazões nos postos (Recreio, Carioba e Artemis).

Na série temporal de vazões mensais calculada e observada do posto Recreio, que fica no Rio Corumbataí (afluente do Rio Piracicaba) para o período de calibração (2000-2004) e validação (2005-2010) na Figura 17, notamos que a vazão calculada representou bem a observação (Figura 18). A vazão média foi de $17.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com vazões de permanência extrema máxima Q_2 de $25,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e vazão mínima de estiagem Q_{95} de $3.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Há alguns desvios mais expressivos da vazão calculada em relação a observada no período seco e na inundação. Conforme sugere o hidrograma médio mensal (Figura 19), no final da estiagem (Julho-Agosto) há uma pequena subestimativa do modelo, e no início da inundação e em especial de Setembro a Novembro, a subestimativa média chega na ordem de $\sim 5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esta comparação sistemática é ilustrada pela regressão linear do cálculo pela observação (Figura 18), em que a dispersão é pequena ($R^2 \approx 0,86$) mas o coeficiente angular de $\approx 0,76$ indica de alguma forma este desempenho de subestimativa do modelo, em torno de 24%. O coeficiente de eficiência (COE) e a tendência percentual (PBIAS) para o período de calibração foram de 0,98 e 14,9 %, e para o período de validação foram 0,97 e 6,9 %, respectivamente.

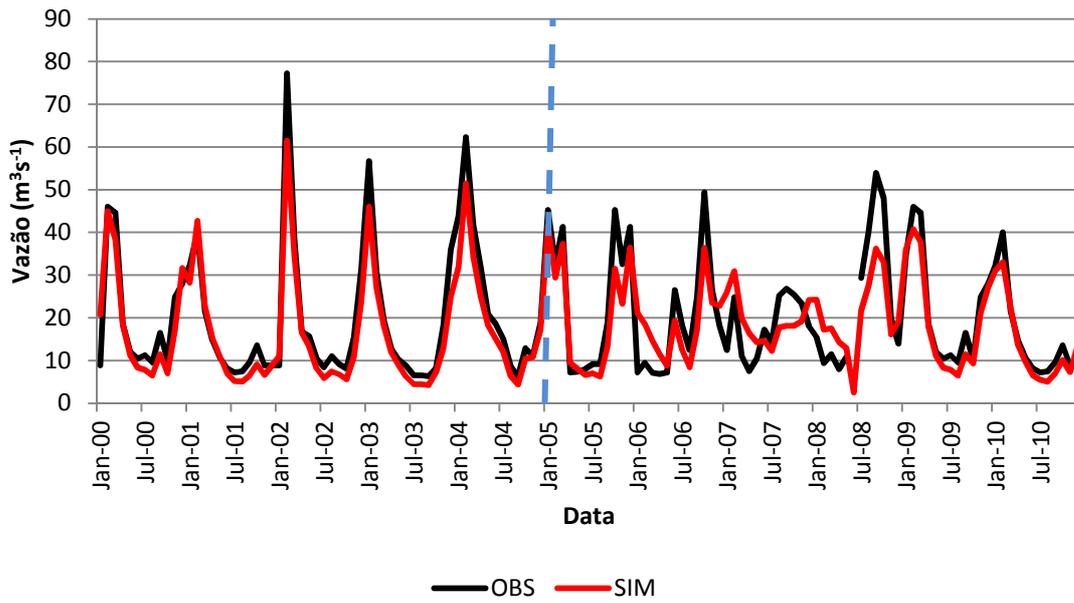


Figura 17 - Vazão média mensal (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Recreio, linha azul separa os períodos de calibração e validação

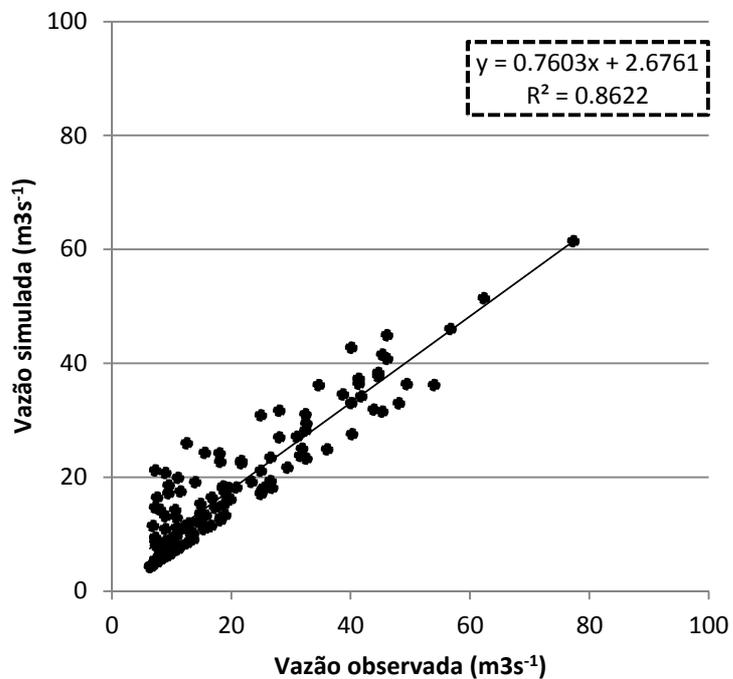


Figura 18 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada e simulada para o posto Recreio

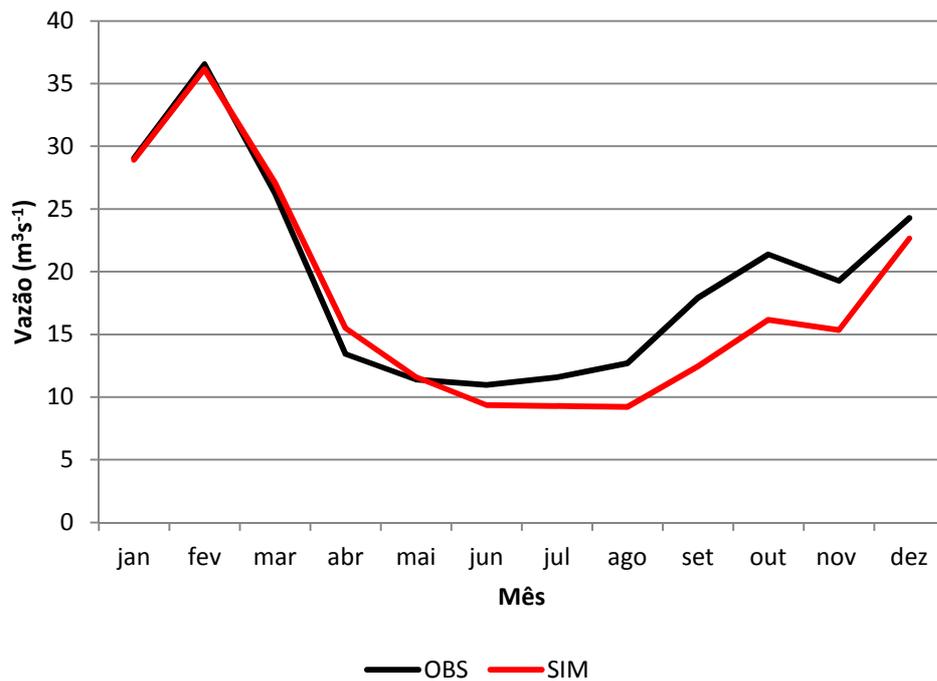


Figura 19 - Hidrograma médio de Vazão (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Recreio, para o período de 2000 a 2010

A montante na bacia, no posto Carioba, a simulação mostrou vazão média de $63,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com vazões de permanência extrema máxima Q_2 de $83,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e vazão mínima de estiagem Q_{95} de $16,18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 20). Para este posto o coeficiente de eficiência (COE) e a tendência percentual (PBIAS) na calibração foram de 0,99 e 12,4 % e na validação de 0,99 e 10,3 %, respectivamente. As diferenças mais expressivas da vazão calculada em comparação com a observada deram-se na subestimativa do modelo em parte dos eventos de vazão máxima mensal (conforme sugerem alguns picos na Figura 20), e no período seco conforme sugere o hidrograma médio mensal (Figura 22). Neste último caso no final da estiagem (Julho-Setembro) há uma certa subestimativa do modelo de $\approx 15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esta comparação sistemática é ilustrada pela regressão linear do cálculo pela observação (Figura 21), em que a dispersão é pequena ($R^2 \approx 0,97$), e o coeficiente angular de $\approx 0,88$ indica uma subestimativa do modelo em torno de 12%.

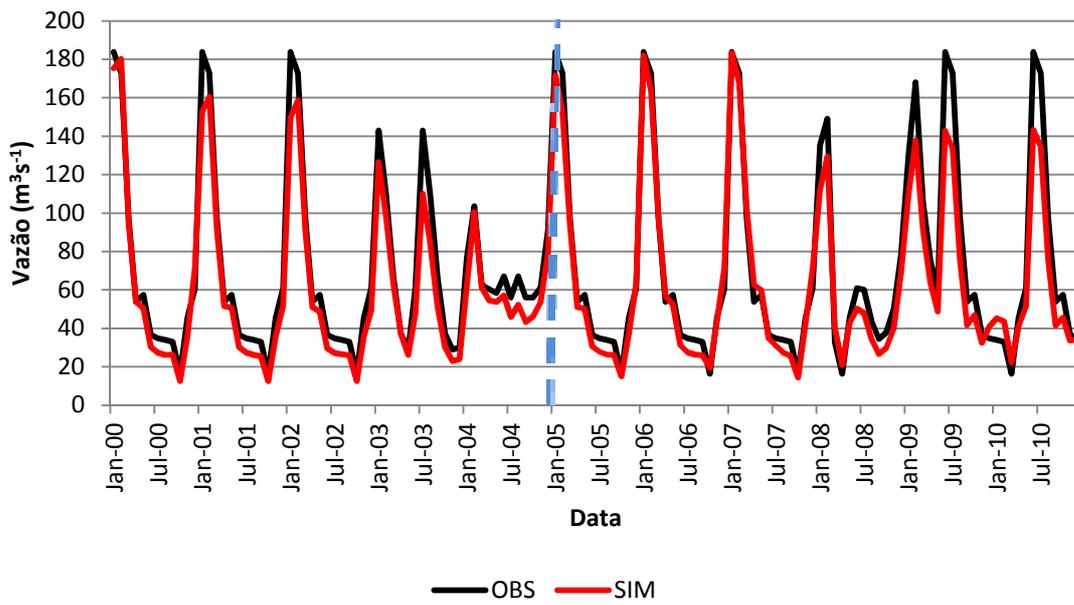


Figura 20 - Vazão média mensal (m^3s^{-1}) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Carioba, linha azul separa os períodos de calibração e validação

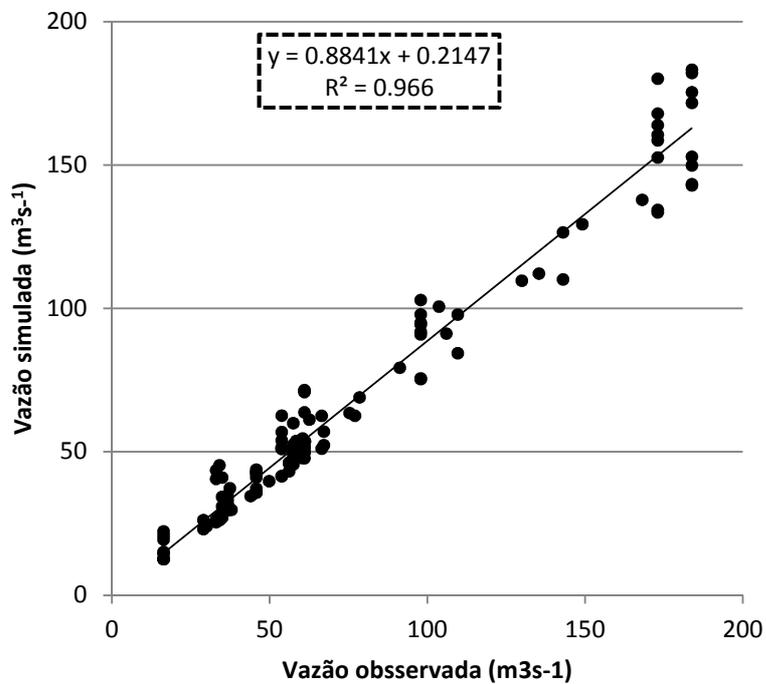


Figura 21 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada e simulada para o posto Carioba

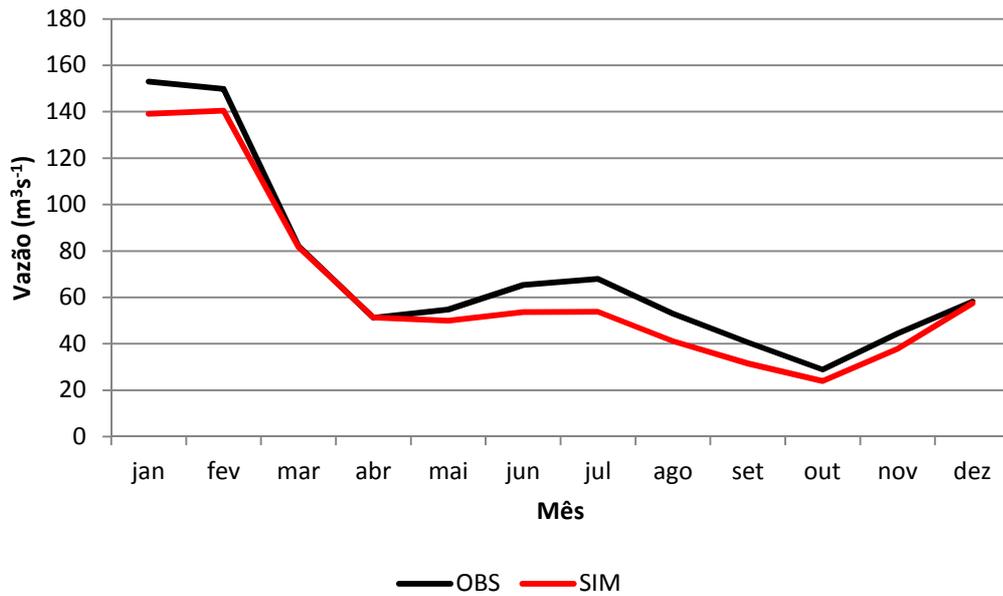


Figura 22 - Hidrograma médio de Vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) observada (OBS - linha preta) e simulada com calibração (SIM - linha vermelha), para o posto Carioba, para o período de 2000 a 2010

Viola (2011) recomenda a utilização de análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, pois a mesma proporciona o conhecimento da influência do parâmetro sobre a resposta do modelo, possibilitando a racionalização etapas de calibração, bem como a fixação de parâmetros aos quais o modelo é pouco sensível. Como resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros de controle do fluxo de sedimentos, notamos que o Coeficiente linear (Spcon), é o elemento mais sensível da simulação com valor 1 (Figura 23).

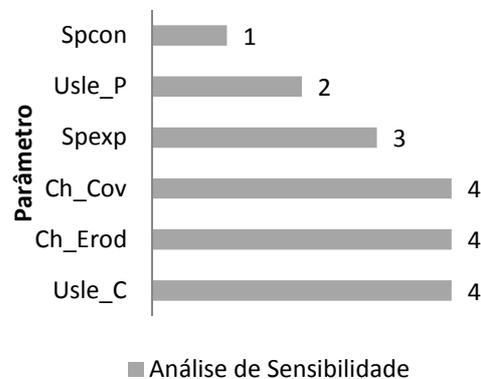


Figura 23 - Ranque de sensibilidade dos parametros de controle da produção e fluxo de sedimentos para a bacia do rio Piracicaba, para os parâmetros Fator de cobertura do canal

(Ch_Cov), Fator de erodibilidade do canal (Ch_Erod), Coeficiente linear de fluxo de sedimento (Spcon), Coeficiente exponencial de fluxo de sedimento (Spexp), Fator de cobertura vegetal (Usle_C) e Fator relativo às práticas de conservação e manejo do solo (Usle_P)

Após a análise de sensibilidade foi realizada a calibração automática do modelo para o fluxo de sedimentos, com os parâmetros otimizados descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros otimizados utilizados para calibração do fluxo de sedimentos

Uso da terra	ch_cov	ch_erod	spcon	spexp	usle_c	usle_p
Cana de açúcar	0,01	0,5	0,01	2,0	0,2	3,50
Cerrado	0,00	0,0	0,00	1,0	0,001	0,03
Eucalipto	0,00	0,0	0,00	1,0	0,001	0,06
Floresta	0,00	0,0	0,00	1,0	0,001	0,02
Pastagem	0,01	0,5	0,01	1,5	0,003	2,90

Nas Figuras 24 a 27 estão os valores de fluxo de sedimento diário (ton ha^{-1}) (são mostrados somente os cálculos nos dias de observação) em conjunto com a precipitação diária. Podemos observar que o fluxo de sedimentos na bacia do Piracicaba na maior parte do ano é relativamente baixo, aumentando no período chuvoso, onde a propósito ficam evidentes os máximos fluxos próximos de alguns eventos de maior precipitação.

Os fluxos de sedimentos calculados foram em torno de $\approx 25\%$ menores que os observados, conforme indica o coeficiente angular da regressão linear (Figura 28) de $\approx 0,75$. O coeficiente de eficiência (COE) e a tendência percentual (PBIAS) para a simulação de fluxo de sedimentos foi de 0,90 e 11,2 %, com o modelo calibrado, sendo considerado muito satisfatório. Resultado semelhante foi obtido por Lelis (2011) onde os valores de COE para as simulações antes e depois da calibração para fluxo de sedimentos foram respectivamente -4,7 e 0,953.

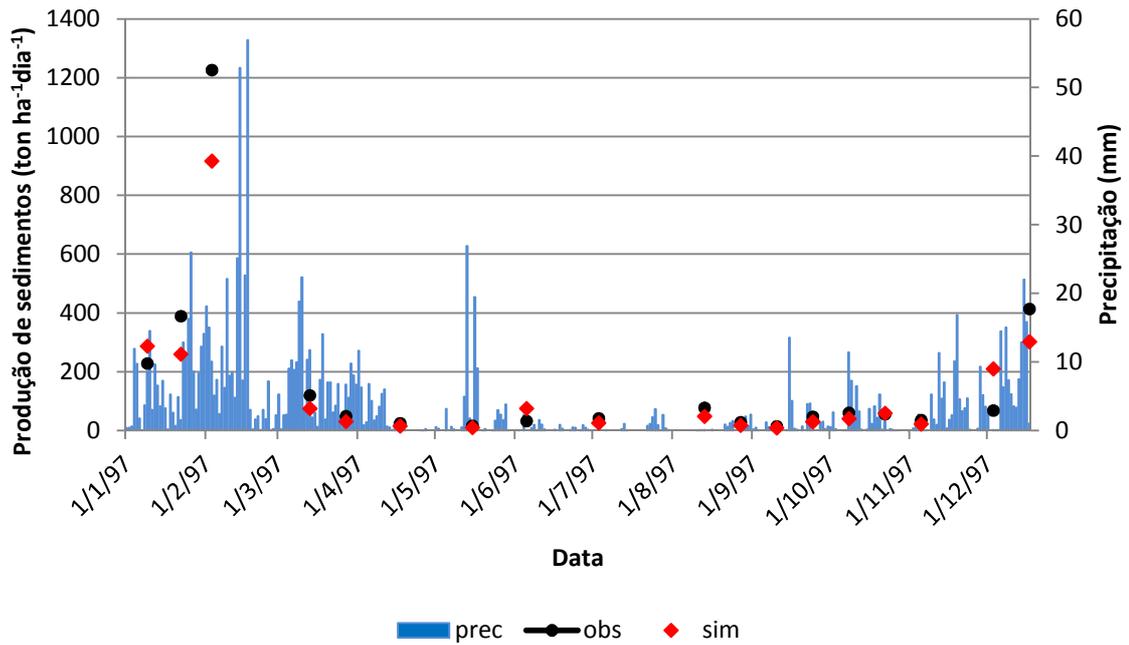


Figura 24 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha⁻¹) observada (OBS - pontos em pretos) e simulada com calibração (SIM - pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 1997

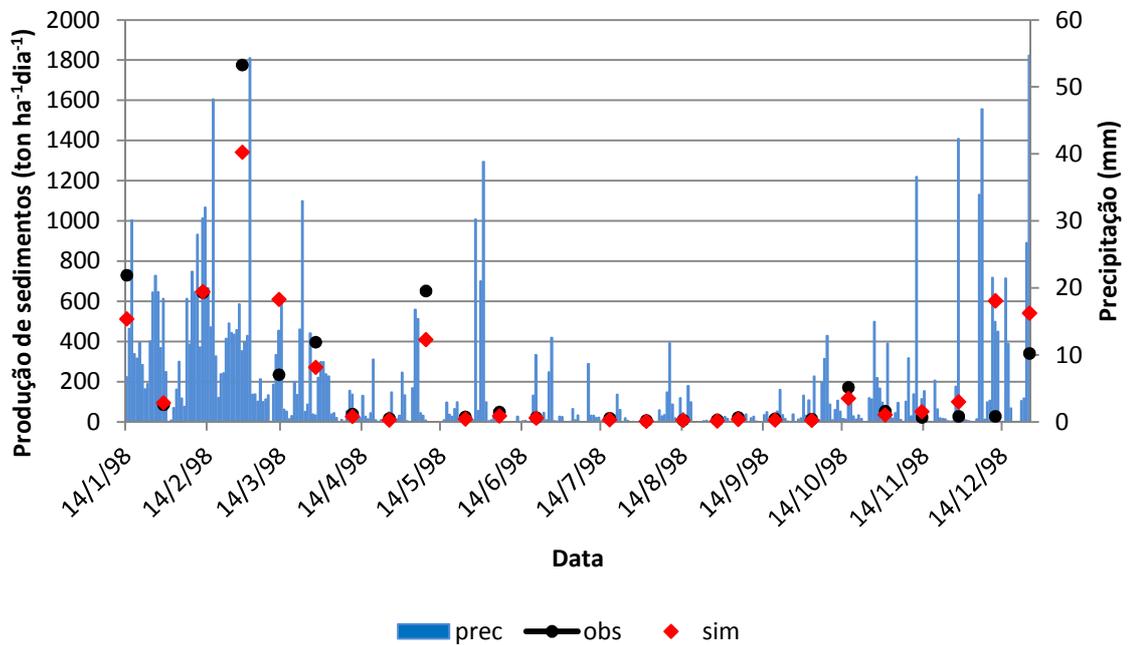


Figura 25 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha⁻¹) observada (OBS - pontos em pretos) e simulada com calibração (SIM - pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 1998

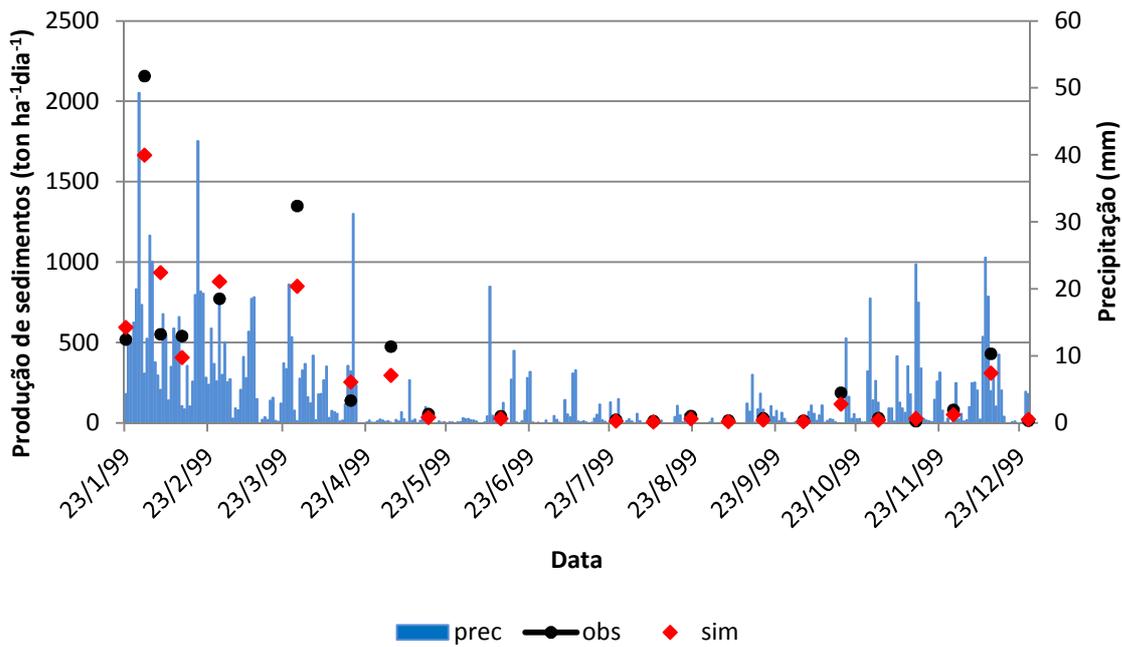


Figura 26 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha⁻¹) observada (OBS - pontos em pretos) e simulada com calibração (SIM – pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 1999

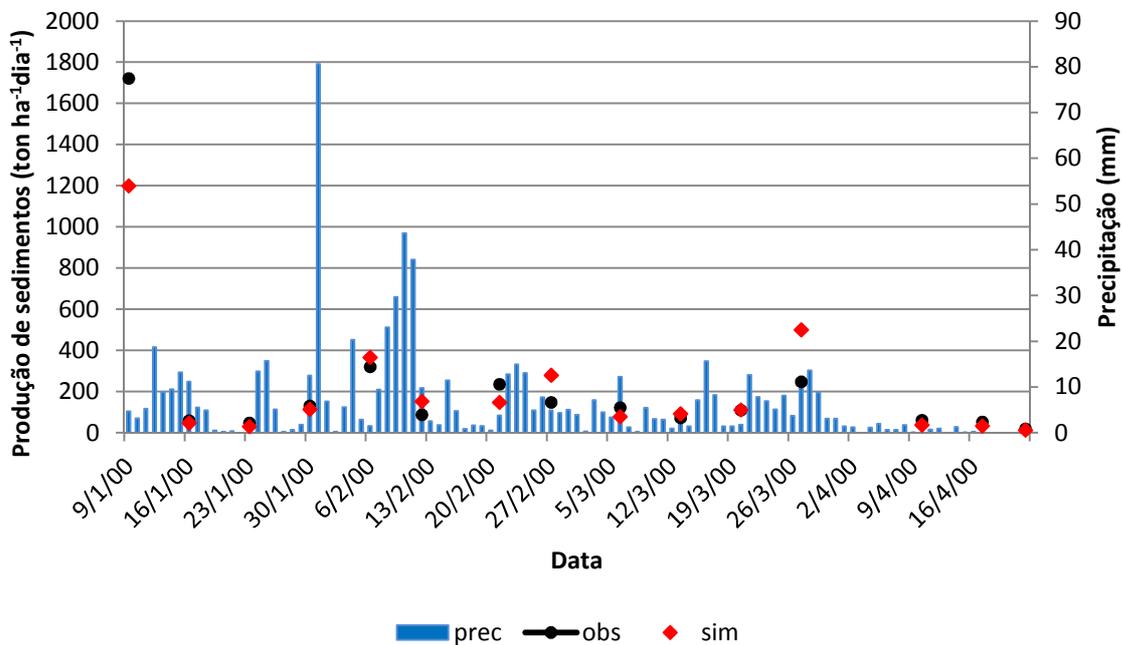


Figura 27 - Fluxo de sedimentos diária (ton ha⁻¹) observada (OBS - pontos em pretos) e simulada com calibração (SIM – pontos em vermelho), precipitação (barra azul), para o ponto de coleta do rio Atibaia, no período de coletas do ano de 2000

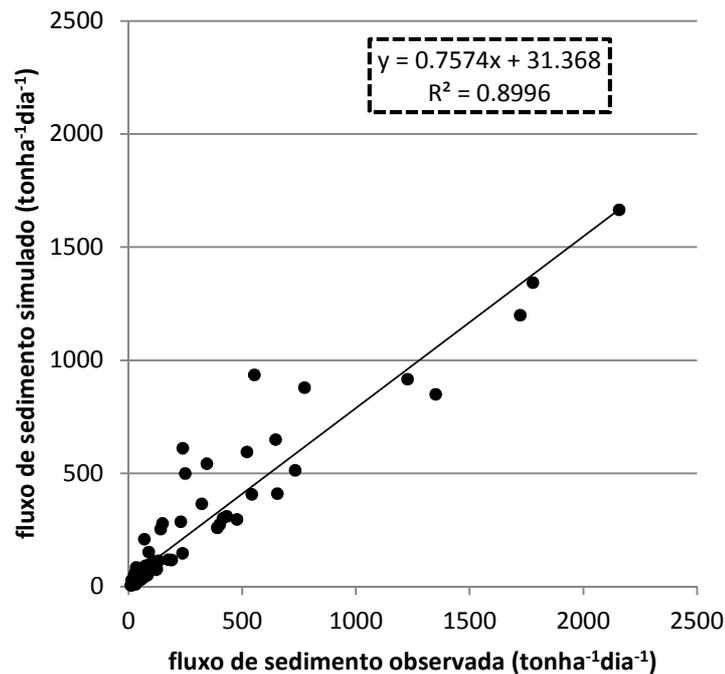


Figura 28 - Dispersão dos dados de fluxo de sedimentos media diária (ton ha⁻¹) observada e simulada para o ponto de coleta do rio Atibaia

Com o modelo calibrado para o fluxo de sedimentos (1997-2000), e utilizando a calibração de evapotranspiração e vazão de Silva (2014), foram realizadas a seguir as simulações de perturbações das mudanças do uso da terra e das forçantes climáticas.

3.1.1 Experimentos numéricos com cenários

a) Mudanças de uso da terra

Analisaremos as vazões nos pontos dos postos Recreio e Carioba e no mesmo período de tempo da avaliação da simulação.

No posto Recreio, o regime de vazão média entre os diferentes cenários mostrou de forma geral diferenças notáveis, menores na fase de estiagem e com grandes diferenças nas fases de inundação, cheia e recessão (Figura 29). A vazão média do cenário CTRL no posto Recreio (Figura 29) mostrou-se mais reduzida quanto mais florestado o cenário (11,7 m³s⁻¹ no cenário FLO e 14,1 m³s⁻¹ no cenário EUC), e

tendendo a aumentar quanto maior a área desflorestada ($25,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário PAS e $26,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário CAN), conforme resume a Tabela 11. Quanto às vazões de permanência extremas máxima Q_2 e de estiagem mínima Q_{95} (Tabela 10), observamos que: com o reflorestamento a vazão Q_2 diminui 28% no cenário FLO e 15% no cenário EUC, e nos cenários de conversão para gramíneas um aumento de 200% para o cenário de CAN e de 230% para o cenário de PAS; para a vazão Q_{95} , com o reflorestamento houve redução nos cenários de FLO de 31 % e 15% no cenário EUC, e nos cenários de conversão para gramíneas um aumento de 88 % para o cenário de CAN e 74% no PAS. A Tabela 10 mostra também os valores de Evapotranspiração (ET) média anual na bacia do rio Piracicaba para os cenários de FLO e EUC onde há um aumento de ET de 9 % e 6%, respectivamente, ou seja, observa-se que a evapotranspiração aumenta com o reflorestamento, e os cenários de PAS e CAN mostram uma diminuição da ET em torno de 25% e 31%, respectivamente, justificando em parte os aumentos e decréscimos da vazão calculada. Fioreze et al., (2008) afirmam que para a determinação da disponibilidade hídrica de uma bacia é necessário o monitoramento contínuo e a realização de estudos complementares das variáveis hidrológicas.

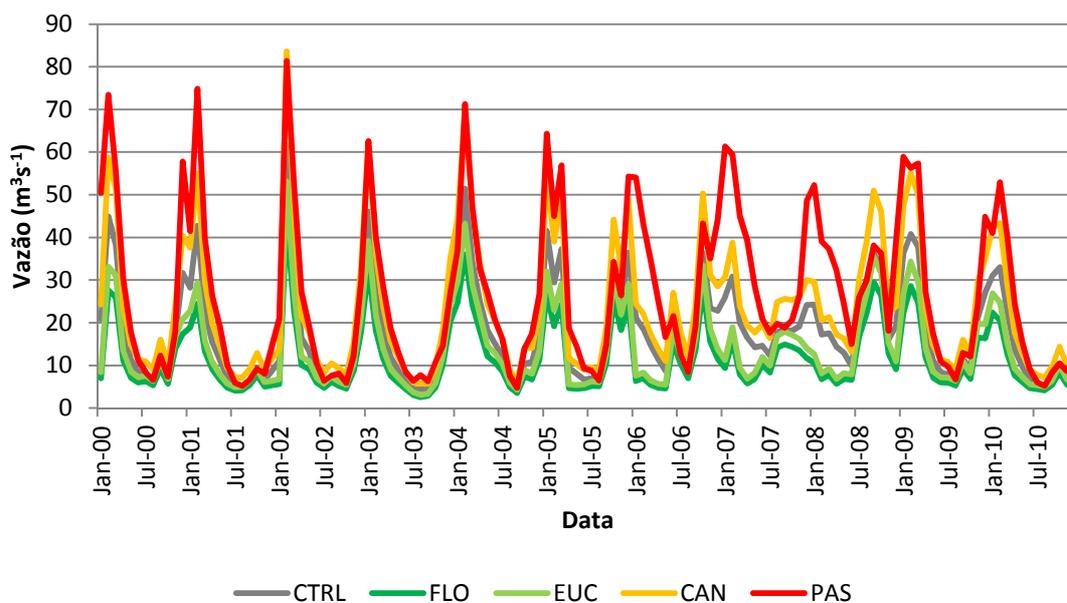


Figura 29 – Vazão (m^3s^{-1}) média mensal simulada nos cenários de CTRL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara), CAN (linha laranja) e PAS (linha vermelha) no posto Recreio, nos anos de 2000 a 2010

Tabela 10 – Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema máxima Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem e Q_{95} (m^3s^{-1}), e evapotranspiração media anual (ET) em (mm) calculada nos cenários de CTRL, FLO, EUC, CAN e PAS no posto Recreio, nos anos de 2000 a 2010

Variável	CTRL	FLO	EUC	CAN	PAS
$Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1})	17,8	11,7	14,1	23,7	26,8
Q_2 (m^3s^{-1})	19,1	13,7	16,2	57,1	62,5
Q_{95} (m^3s^{-1})	4,4	3,0	3,7	8,3	7,67
ET (mm)	880	960	932	660	600

No posto Carioba (Figura 30) houve um padrão de resposta semelhante ao do posto Recreio, onde a vazão média entre os diferentes cenários mostrou de forma geral diferenças em que a vazão média do cenário CTRL ($63,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) (Tabela 11) mostrou-se mais reduzida quanto mais florestado o cenário sugerir ($49,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário FLO e $59,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário EUC), e tendendo a aumentar quanto maior for à área desflorestada ($87,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário PAS e $72,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no cenário CAN), conforme resume a Tabela 11. Em relação às vazões de permanência extremas Q_2 (Tabela 9), a vazão neste posto para o cenário de FLO diminuiu em 16%, assim como no cenário de EUC com um decréscimo de 2%. Para as simulações de desflorestamento o cenário PAS apresentou um aumento médio de 52% na vazão, e de 20% no cenário CAN. A vazão de estiagem Q_{95} diminuiu 18% no cenário FLO e 2% no cenário EUC com aumento nos cenários de CAN e PAS de 4% e 16%, respectivamente.

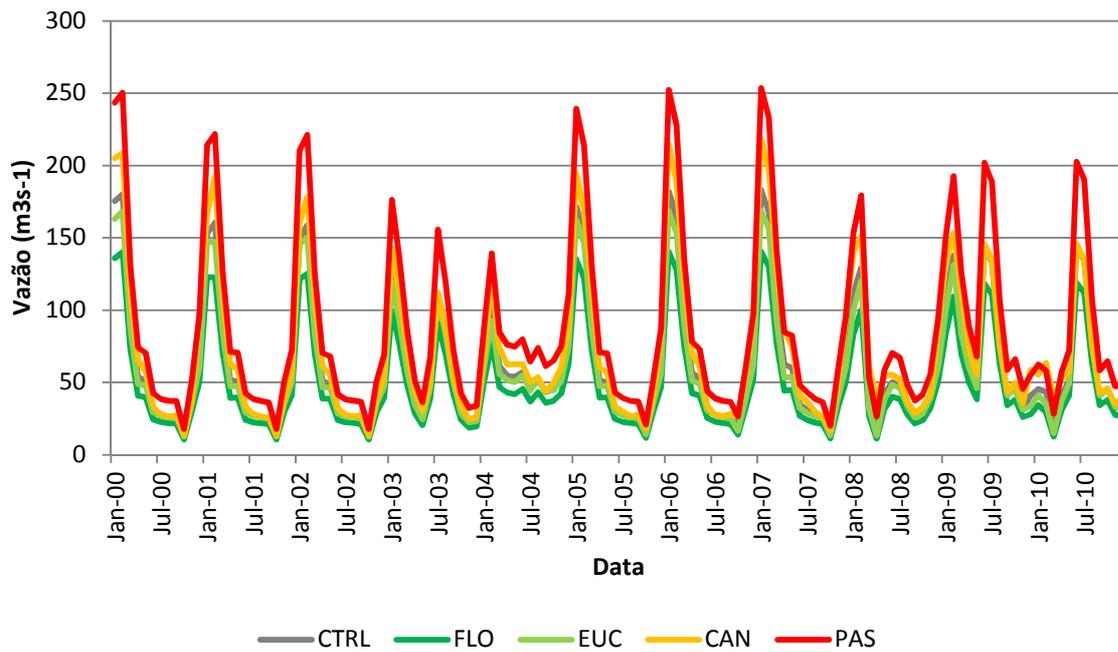


Figura 30 – Vazão (m^3s^{-1}) média mensal simulada nos cenários de CTRL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara), CAN (linha laranja) e PAS (linha vermelha) no posto Carioba, nos anos de 2000 a 2010

Tabela 11 – Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema máxima Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem Q_{95} (m^3s^{-1}), calculada nos cenários de CTRL, FLO, EUC, CAN e PAS no posto Carioba, nos anos de 2000 a 2010

Variável	CTRL	FLO	EUC	CANA	PAS
$Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1})	63,1	49,5	59,4	72,1	87,8
Q_2 (m^3s^{-1})	77,2	64,7	75,5	93,7	118,1
Q_{95} (m^3s^{-1})	16,1	13,1	15,7	16,8	22,8

A perda de solo para pastagens brasileiras varia de 1 a 50 $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (BERTOL, 2007). No experimento CTRL, a produção de sedimentos mostrou a média de 8 $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, (Tabela 12), e uma vez que a pastagem representa 70% do uso da terra na bacia do rio Piracicaba, o valor calculado mostra uma produção de pequena a média. No experimento PAS, a produção de sedimentos mostrou a média de 34 $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (Tabela 12), o que sugere que os parâmetros prescritos para essa cobertura vegetal refletem uma produção relativamente grande.

Tabela 12 - Fluxo de sedimentos média anual (ton ha^{-1}), vazão sólida extrema máxima Q_{s_2} , vazão sólida de estiagem Q_{s_95} , produção de sedimentos (ton ha^{-1}) calculado nos cenários de CTRL, FLO, EUC, PAS e CAN para o ponto de coleta no rio Atibaia, observações nos anos de 1997 a 2000

Variável	CTRL	FLO	EUC	PAS	CAN
Fluxo sedimento (ton ha^{-1} ano)	2,1	1,7	1,9	2,3	2,3
Q_{s_2} (ton ha^{-1} ano)	10,5	8,1	9,5	12	11
Q_{s_95} (ton ha^{-1} ano)	0,1	0,05	0,09	0,18	0,16
Produção de sedimento (ton ha^{-1} ano)	8,0	0,4	1,2	34,0	12,0

Para o posto de coleta de sedimentos em Souza's no rio Atibaia (Figura 31), o fluxo de sedimentos no experimento CTRL foi de $1,7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, que se mostrou alto em relação aos valores na literatura para os grandes rios brasileiros, estes no intervalo de $0,03$ a $1,70 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (LIMA et al., 2008), mas todavia ainda razoável pois que dentro da faixa de variabilidade.

Para a comparação entre os distintos cenários de uso da terra, nota-se que, em relação ao cenário CTRL, o fluxo de sedimentos aumenta nos cenários de desflorestamento e diminui com a reposição da área de floresta. Em média temos uma diminuição de 16% no fluxo de sedimentos para o cenário FLO e de 10% para o cenário EUC. Para o cenário de PAS há um aumento no fluxo de sedimentos em torno de 7%, e de 9% para o cenário de CAN (Tabela 12). O uso da terra que provê o maior fluxo de sedimentos foi o cenário CAN seguido do cenário PAS. A Tabela 12 mostra uma redução da vazão sólida extrema máxima Q_{s_2} nos cenários de FLO e EUC, de 22 % e 10%, respectivamente, e um aumento no cenário de PAS de 33%, e de CAN 5%. O mesmo padrão ocorreu com a vazão sólida mínima de estiagem Q_{s_95} , onde o cenário de FLO tem redução de 50%, no cenário de EUC tem redução de 10%, e nos cenários de PAS e CAN há um aumento de 80% e 60%, respectivamente.

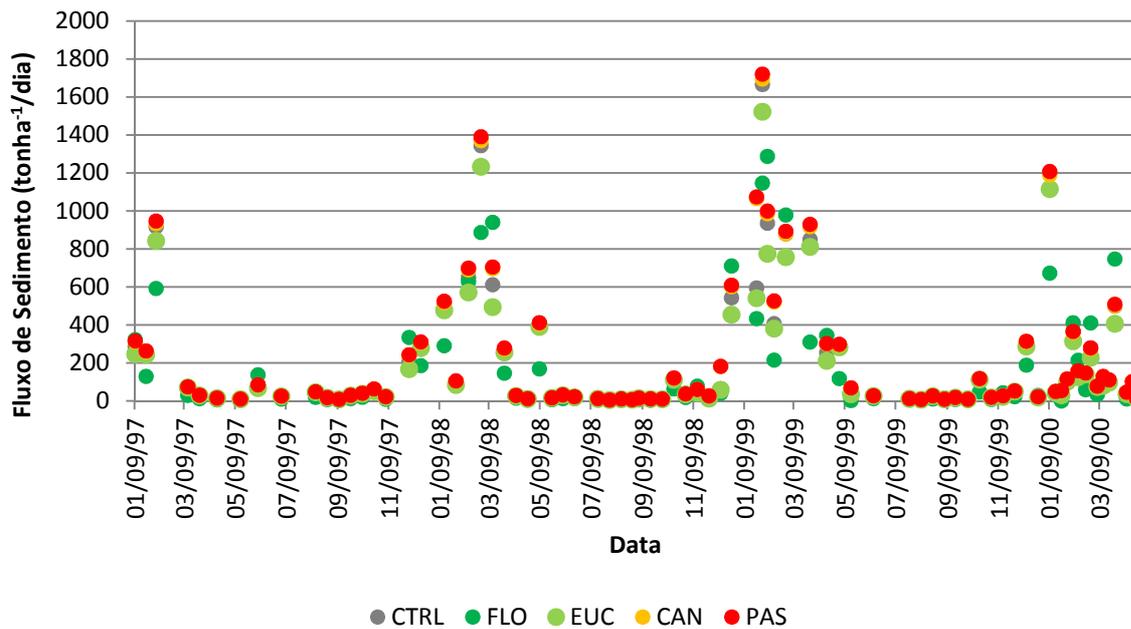


Figura 31 - Fluxo de sedimentos média diária (ton ha^{-1}) simulada nos cenários de CTRL (ponto cinza), FLO (ponto verde escuro), EUC (ponto verde clara), CAN (ponto laranja) e PAS (ponto vermelha) para o ponto de coleta no rio Atibaia, observações nos anos de 1997 a 2000

b) Impacto das mudanças climáticas

Para a utilização dos dados de mudança climática da simulação do modelo regional ETA (CHOU et al., 2011), foram realizados testes iniciais conforme o cenário SWAT_CTRL (1970-1990) com o intuito de verificar se a base de dados reflete adequadamente a hidroclimatologia da bacia. Após esta verificação, foi realizada a simulação do futuro, ou seja o cenário SWAT_FUT (2078-2098).

As variações que ocorreram entre o cenário do passado e do futuro na bacia do Rio Piracicaba mostram um aumento de temperatura mínima de $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e máxima de $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, aumento de radiação solar de $2,0\text{ Wm}^{-2}$, diminuição da umidade relativa em $5,8\%$ e aumento de precipitação média anual (3%), sendo um aumento médio em torno 21 mm para o período chuvoso e um decréscimo de 6 mm para o período seco. Podemos verificar as anomalias mensais de temperaturas e precipitação na região da bacia no ANEXO B entre os cenários SWAT_CTRL e SWAT_FUT. As variações que ocorreram na microbacia do Ribeirão das Posses simulados pelo modelo ETA para o futuro (2078-2098), mostra um aumento médio de $24,6\%$ nos valores de

precipitação, em conjunto com um aumento de temperatura mínima de 4,8 °C e temperatura máxima de 5.2 °C, fazendo com que a umidade relativa diminua em média 6 %.

O hidrograma médio mensal (Figura 32) representa os valores médios mensais para a bacia do rio Piracicaba, no posto Artemis. Notamos que a vazão simulada no cenário SWAT_CTRL (média de $145,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) é próxima do valor hidroclimatológico (média de $143 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). O cenário futuro SWAT_FUT mostrou uma média de $163,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, portanto com um aumento de 12 % na vazão anual em relação ao presente.

No sedimentograma médio mensal (Figura 33) para a bacia do rio Piracicaba, no posto Artemis, observamos que os maiores valores de fluxo de sedimentos estão associados aos maiores valores de precipitação e por consequência aos maiores valores de vazão (Figura 32). As simulações realizadas com os cenários SWAT_CTRL e SWAT_FUT produzem anualmente $4,2 \text{ ton ha}^{-1}$ e $5,0 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente, caracterizando um aumento de fluxo de sedimento médio de 19 % ao ano no clima futuro. As alterações climáticas se refletem nas modificações das variáveis representativas do clima, como a precipitação e temperatura, podendo produzir alterações nas séries estatísticas destas variáveis, alterando a resposta da bacia (TUCCI, 2005).

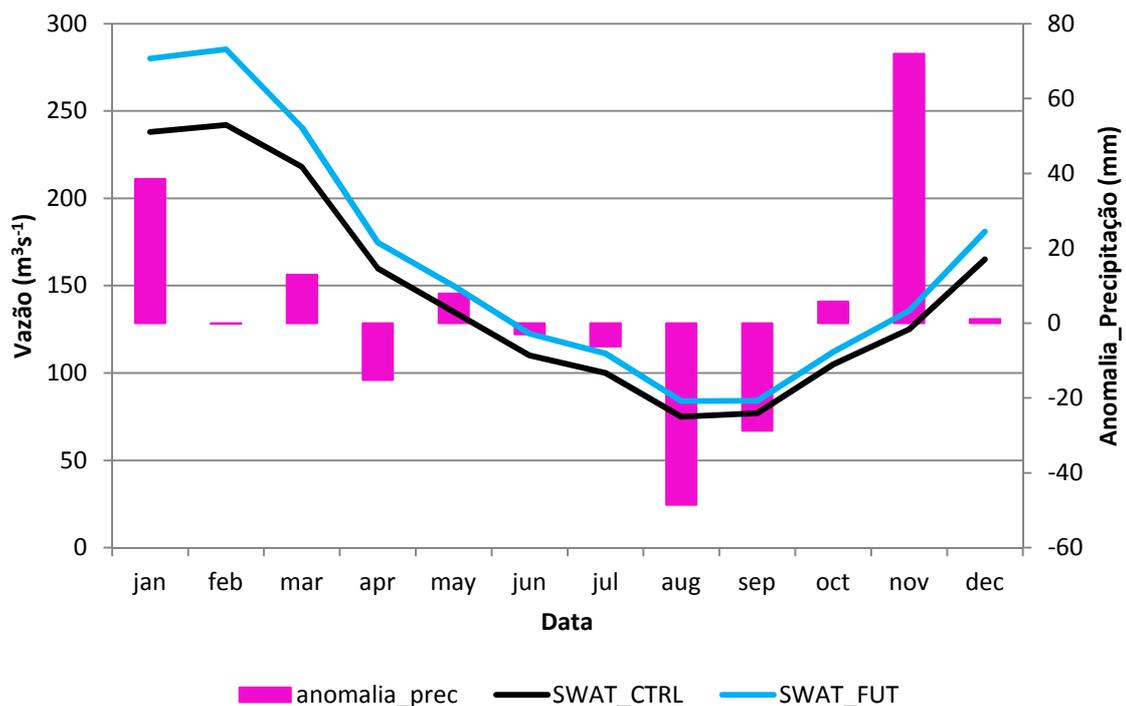


Figura 32 - Hidrograma médio mensal para o ponto posto Artemis, nos cenários de mudança de clima SWAT_CTRL (linha preta) e SWAT_FUT (linha azul) e anomalia da precipitação entre os cenários (barra)

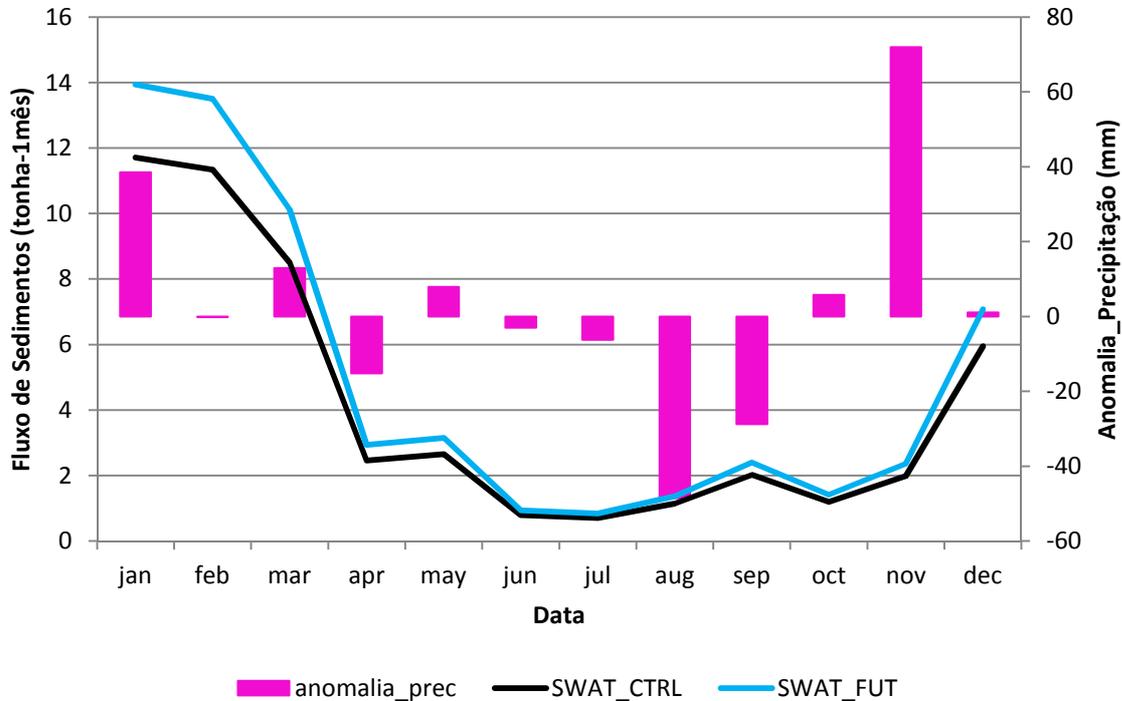


Figura 33 - Sedimentograma médio mensal para o ponto no posto Artemis, nos cenários de mudança de clima SWAT_CTRL (linha preta) e SWAT_FUT (linha azul) e anomalia da precipitação entre os cenários (barra)

Na Figura 34 estão apresentados os mapas de produção de sedimentos por subbacias para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a bacia do rio Piracicaba. Analisando os mapas observamos espacialmente a diminuição de produção de sedimentos média anual na bacia do rio Piracicaba no cenário FLO e EUC, assim como o aumento nos cenário de PAS, CAN e SWAT_FUT. Regiões mais elevadas possuem maiores valores de produção de sedimentos, que vão diminuindo conforme ocorre o escoamento na bacia em direção ao exutório, onde o declive é menor. O fluxo de sedimentos diminui da parte mais alta para a parte média na bacia à medida que as declividades diminuem e as chuvas não são tão intensas. Na parte baixa da bacia é aonde a maior parte dos sedimentos irá se distribuir nos terrenos.

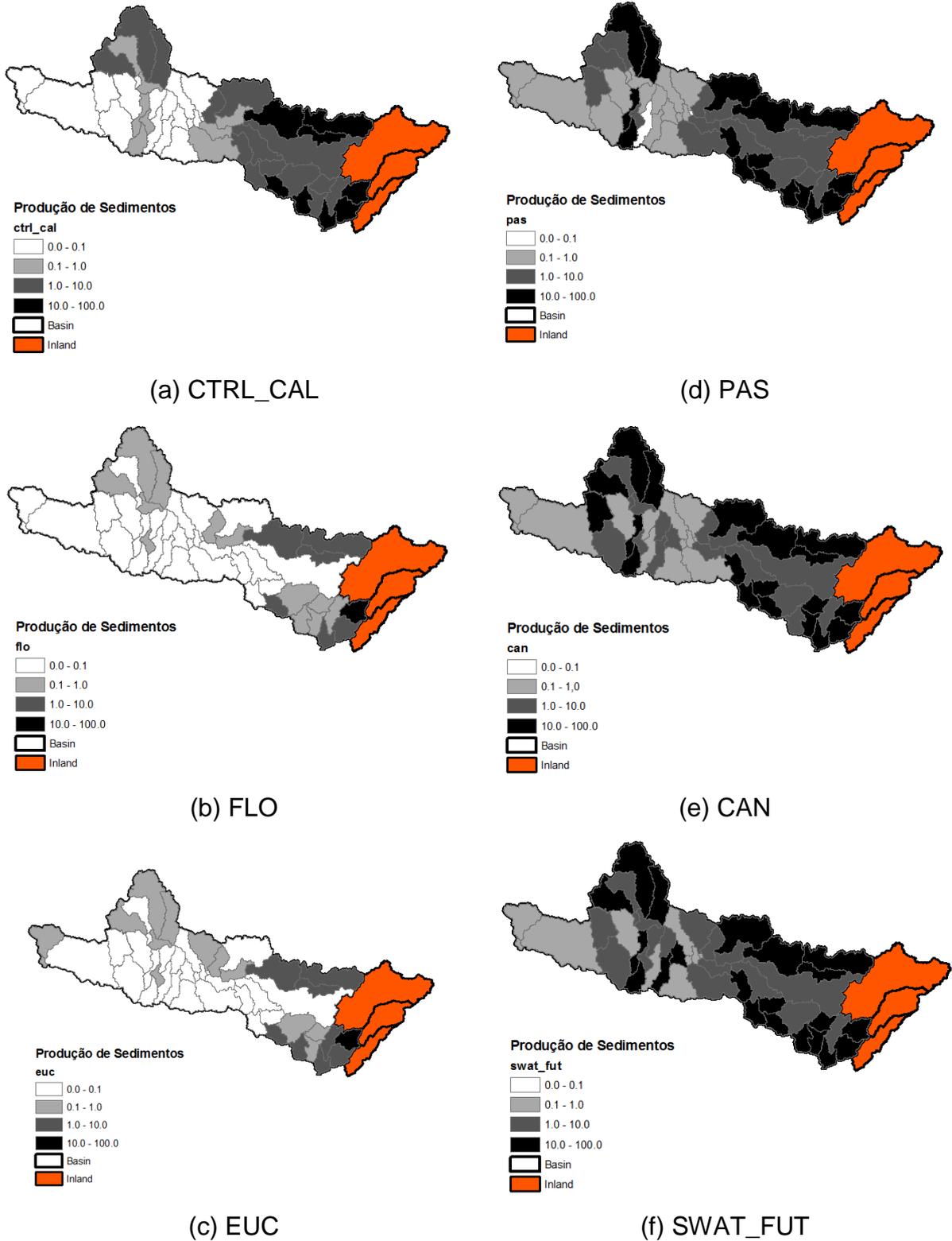


Figura 34 - Mapas de produção de sedimentos (ton ha^{-1}) médio anual por subbacias para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a bacia do rio Piracicaba

3.2 Microbacia do Ribeirão das Posses

Para a prescrição dos parâmetros de controle da evapotranspiração e da vazão na microbacia do Ribeirão das Posses foram utilizados os mesmos parâmetros que os da bacia do rio Piracicaba. Para a calibração do fluxo de sedimentos foi realizado primeiramente a análise de sensibilidade dos parâmetros de controle e, depois do teste, realizada a calibração automática daqueles.

Com a aplicação da análise de sensibilidade podemos notar que o Coeficiente linear de fluxo de sedimento (valor 1) e o Fator relativo às práticas de conservação e manejo do solo (valor 1) são os elementos mais sensíveis da simulação (Figura 35). Após a análise foi realizada a calibração automática da fluxo de sedimentos.

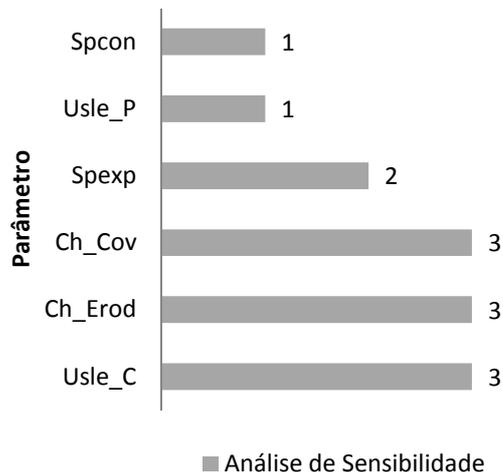


Figura 35 - Ranque de sensibilidade dos parâmetros de controle da produção e fluxo de sedimentos para a bacia do Ribeirão das Posses, para os parâmetros Fator de cobertura do canal (Ch_Cov), Fator de erodibilidade do canal (Ch_Erod), Coeficiente linear de fluxo de sedimento (Spcon), Coeficiente exponencial de fluxo de sedimento (Spexp), Fator de cobertura vegetal (Usle_C) e Fator relativo às práticas de conservação e manejo do solo (Usle_P)

A comparação da vazão calculada com a observada mostrou índices estatísticos de desempenho de $COE_{vazão} = 0,53$ e $PBIAS_{vazão} = 16\%$. Para os d o fluxo de sedimentos com o modelo calibrado foram obtidos os valores de $COE_{sedimentos} = 0,7$ e $PBIAS_{sedimentos} = 11\%$, sendo considerada uma simulação boa (MORIASI et al., 2007). Os índices estatísticos para a microbacia do Posses foram inferiores aos

calculados para a bacia do rio Piracicaba, provavelmente devido à série de dados ser pequena e apresentar algumas falhas.

A figura 36 apresenta os valores observados e calculados de vazão média mensal (m^3s^{-1}) para os anos de 2011 e 2012. Notamos que os valores calculados se aproximam razoavelmente dos valores observados, porém a simulação apresenta uma superestimativa de aproximadamente 8% da vazão observada, conforme sugerida no coeficiente angular da regressão entre ambas (Figura 37). Séries de dados com poucos anos não representam integralmente a realidade hídrica da bacia, sendo necessários para uma análise mais profunda séries hidrológicas de dados de 15 anos ou mais (TUCCI, 2005).

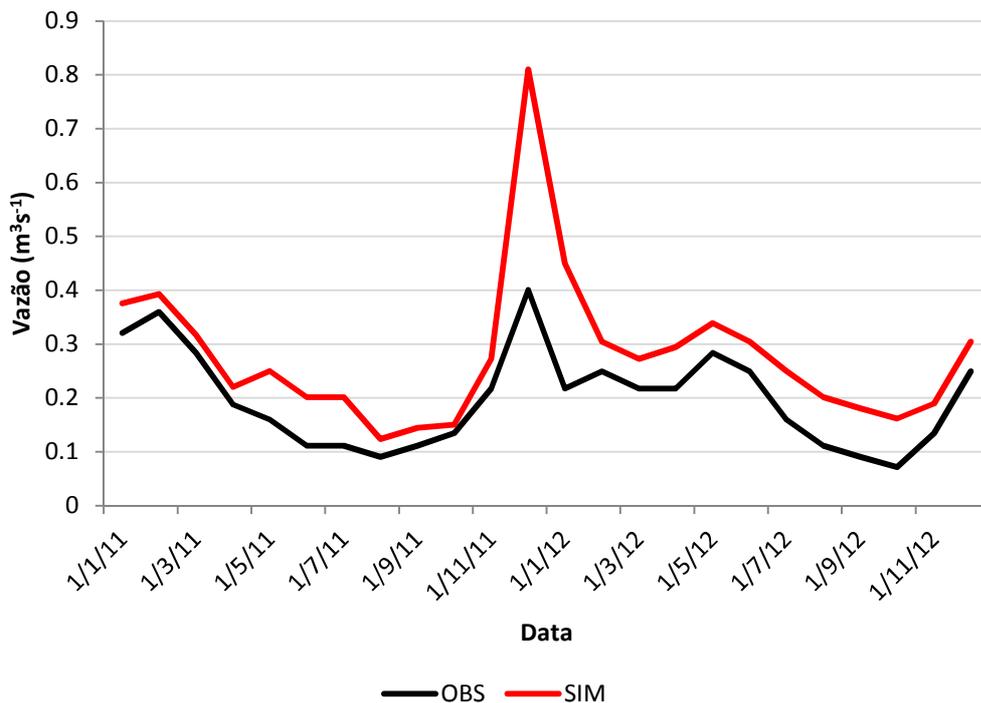


Figura 36 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada (linha preta) e modelada com o cenário CRTL_CAL (linha vermelha) para os anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses

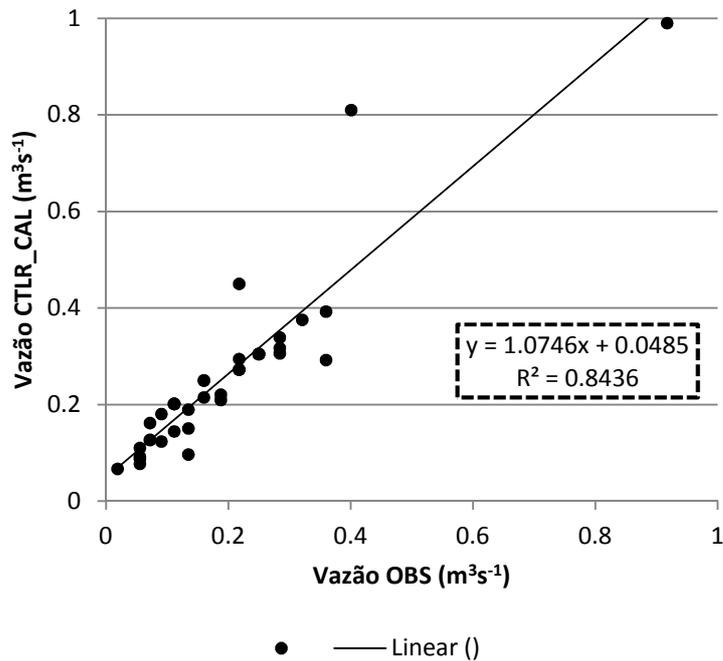


Figura 37 - Dispersão dos dados de Vazão (m^3s^{-1}) média mensal observada modelada com o cenário controle para os anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses

Na Figura 38 estão mostrados os dados de fluxos de sedimento calculado e simulado para a microbacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2009 a 2012, onde vemos que há uma grande discrepância em dois eventos de fluxos muito altos em 2009, resultado de várias incertezas nos dados de campo, que foram suprimidos da análise por se considerar o período de *warm-up* do modelo. Para os anos de 2011 e 2012 (Figura 39) o fluxo de sedimentos calculado subestimou o observado em 45%, conforme sugerido pelo coeficiente angular da regressão entre ambos, de $\approx 0,55$.

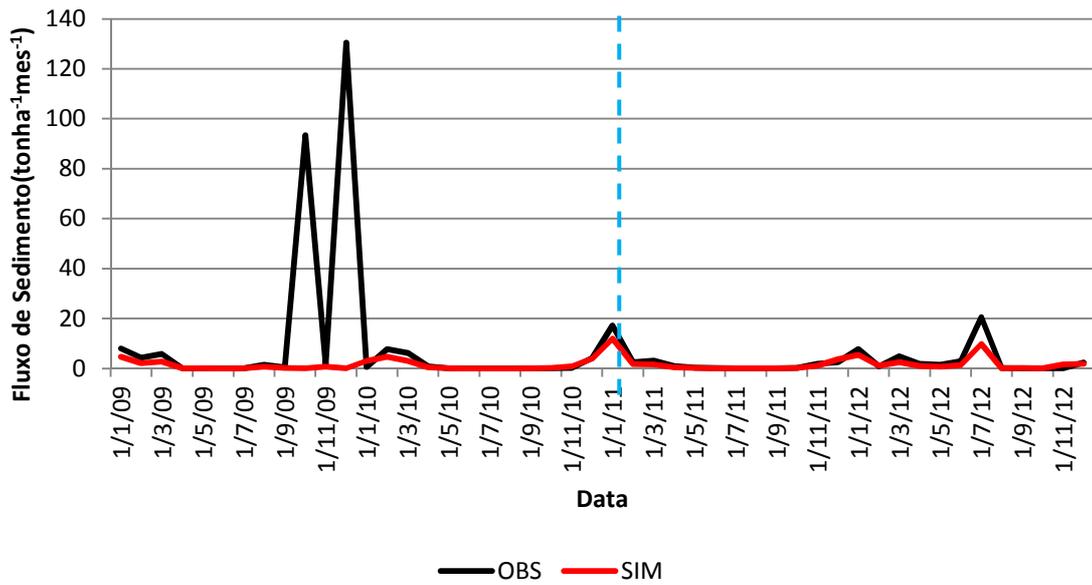


Figura 38 - Fluxo de sedimento (ton ha^{-1}) média mensal observada (linha preta) e modelada com o cenário controle (linha vermelha) para os anos de 2009 a 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses, a linha azul separada o período de warm-up do modelo

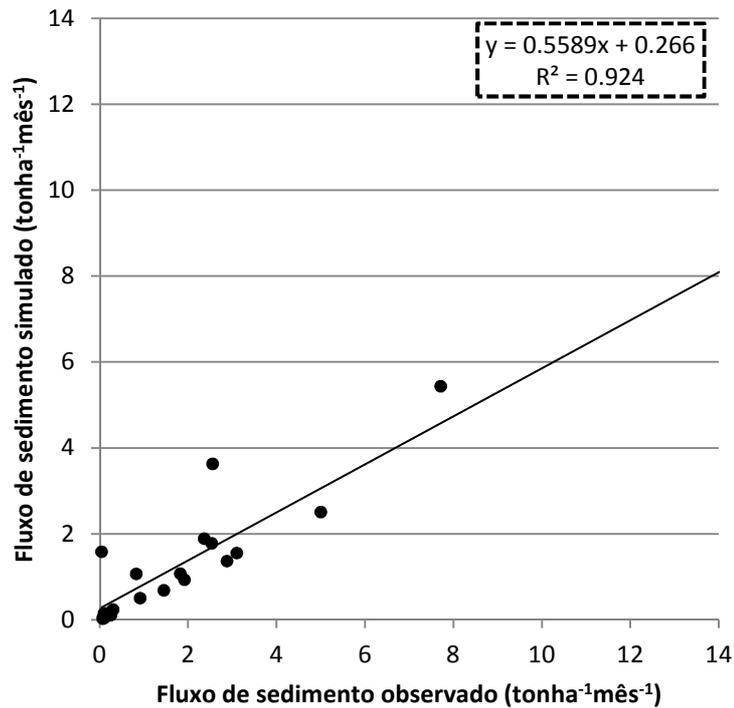


Figura 39 - Dispersão dos dados de fluxo de sedimentos (ton ha^{-1}) média mensal observada e modelada com o cenário controle para os anos de 2011 e 2012 na microbacia do Ribeirão das Posses

Após a calibração do modelo procedeu-se em simular os cenários de perturbações de uso da terra e de mudanças climáticas na microbacia do Posses. A vazão média observada para os anos de 2011 e 2012 foi de $0.20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, inferior à vazão média calculada no cenário CTRL de $0,28 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ conforme indicado na Tabela 11. Pela Figura 40 analisamos as vazões médias mensais das simulações com os cenários de mudanças de uso da terra, que demonstram o mesmo padrão de comparação encontrado na comparação de cenários da bacia do rio Piracicaba, em que a vazão reduziu nos cenários de FLO e EUC, e aumentou nos cenários de PAS.

Em relação ao cenário CTRL notamos uma diminuição de 20,6 % e 18,5 % na vazão média no cenário FLO (para os anos de 2011 e 2012 respectivamente), e para o cenário EUC também uma diminuição de 17,2 % e 14,8 % na vazão (para 2011 e 2012 respectivamente). No cenário PAS há um aumento na vazão média de 37,9 % para o ano de 2011 e de 40,7 % para 2012. Os valores de vazões médias anuais, e vazões de permanência Q_2 e Q_{95} estão na Tabela 13. Com o reflorestamento a vazão Q_2 diminuiu 26 % no cenário FLO e 23 % no cenário EUC, e nos cenários de PAS um aumento de 60 %; para a vazão Q_{95} com o reflorestamento houve igualmente uma redução nos cenários de FLO e EUC de 26 % e 13%, respectivamente, e no cenário de PAS um aumento de 20%. As vazões de permanência são calculadas apenas no período de 2 anos, por isso comentamos estes valores com certa cautela, uma vez que geralmente são avaliados a partir de uma longa série de dados na escala de 30 anos onde uma grande e suficiente amostra possa estar representada. Na tabela 13 nota-se um aumento da ET com o reflorestamento nos cenários de FLO (19 %) e EUC (7 %) e decréscimo de 6% no cenário de PAS.

Na Figura 41 é mostrado o fluxo de sedimento médio mensal para os anos de 2011 e 2012 nos diferentes cenários de simulação. Pela Tabela 14 atingiu-se em relação ao cenário CTRL um aumento de aproximadamente 40% na fluxo de sedimentos no cenário PAS, uma diminuição de 15% no cenário FLO e de 5% para o cenário EUC. Valores proporcionais foram encontrados por Sadd (2013) onde a vazão média do Ribeirão das Posses foi de $0,20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com produção de sedimento média de 2.7 tonha^{-1} ao ano, com o modelo INVEST utilizando aumento de áreas de preservação permanente ao longo do curso do Ribeirão. Saad (2013) observou também que conforme há um aumento da área reflorestada há uma diminuição da

vazão e também da produção de sedimentos. A cobertura vegetal é um fator importante na redução das taxas de erosão do solo devido à proteção do solo contra o impacto da chuva, diminuição da velocidade do escoamento superficial e o aumento da capacidade de infiltração de água no solo.

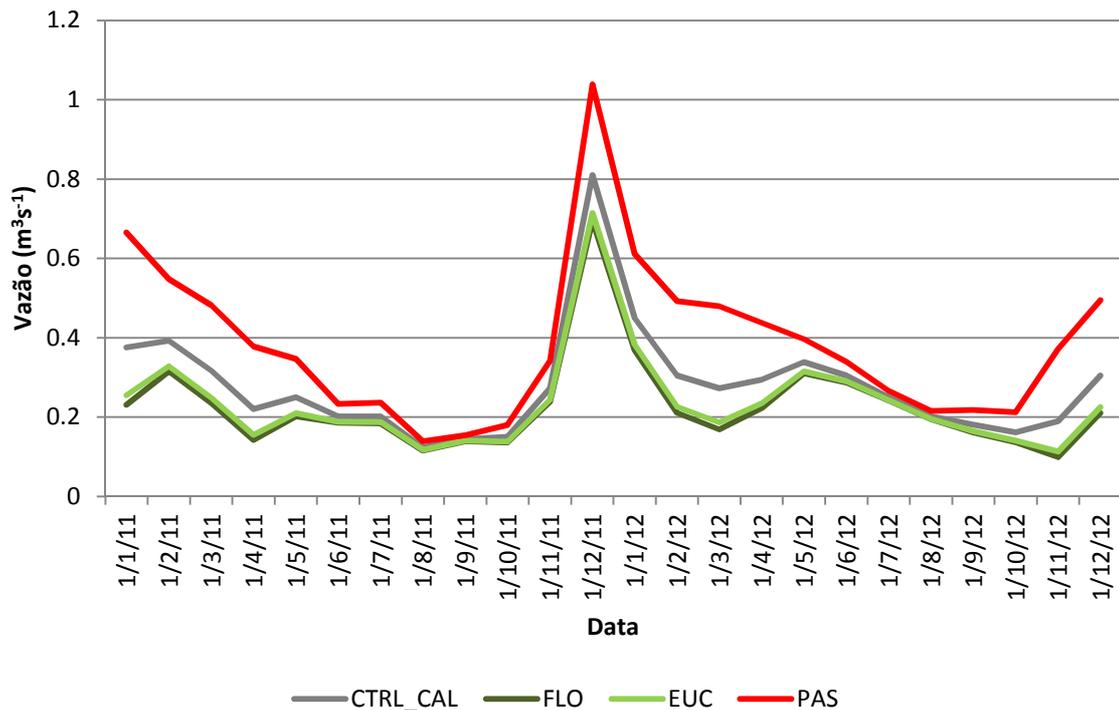


Figura 40 - Vazão (m^3s^{-1}) média mensal dos cenários de CTRL_CAL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara) e PAS (linha vermelha) para a microbacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2011 e 2012

Tabela 13 - Vazão média $Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1}), vazão de permanência extrema Q_2 (m^3s^{-1}) e mínima de estiagem Q_{95} (m^3s^{-1}), calculada utilizando os cenários de mudanças de uso da terra FLO, PAS e EUC, para os anos de 2011 e 2012

Vazão	CTRL	FLO	EUC	PAS
$Q_{\text{média}}$ (m^3s^{-1})	0,28	0,23	0,24	0,39
Q_2 (m^3s^{-1})	0,67	0,49	0,51	1,07
Q_{95} (m^3s^{-1})	0,15	0,11	0,13	0,18
ET (mm)	640	706	688	600

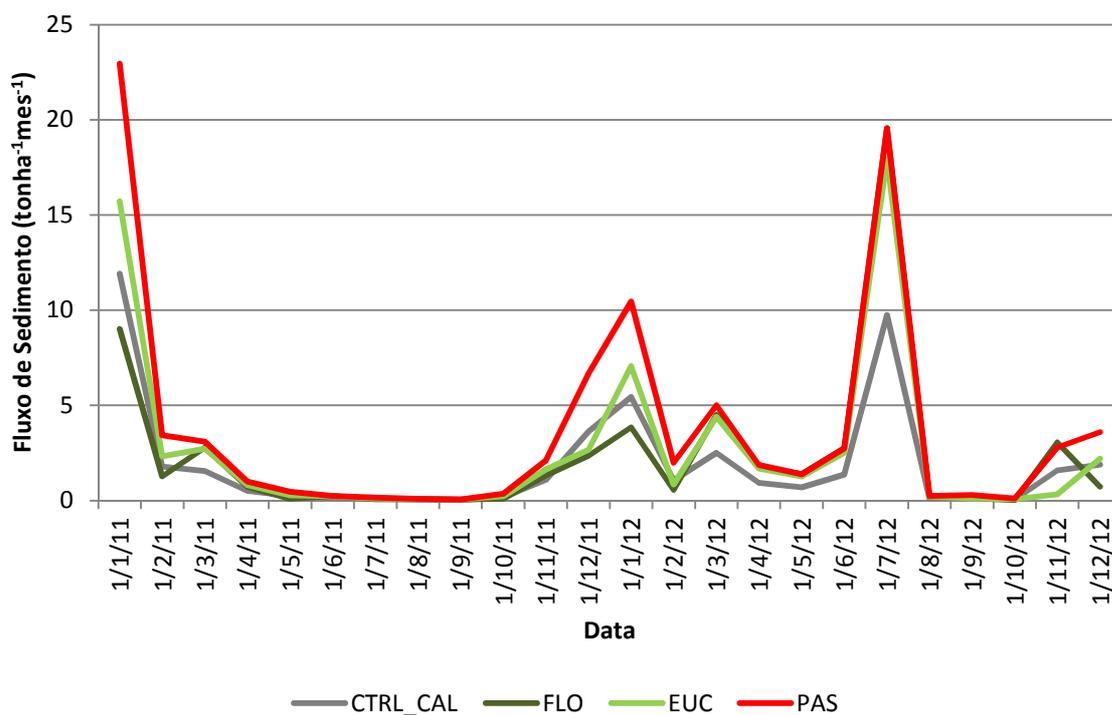


Figura 41 - Fluxo de sedimento (ton ha^{-1}) média mensal dos cenários de CTRL_CAL (linha cinza), FLO (linha verde escuro), EUC (linha verde clara) e PAS (linha vermelha) para a microbacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2011 e 2012

Tabela 14 - Fluxo de sedimento (ton ha^{-1}) calculado utilizando os cenários de mudanças de uso da terra FLO, PAS e EUC, para os anos de 2011 e 2012

ANO	CTRL	FLO	EUC	PAS
2011	2,34	1,51	2,24	3,39
2012	3,44	3,21	3,22	4,17
MÉDIA	2,89	2,36	2,73	3,78

Os resultados das simulações com cenários de mudanças de clima mostram uma vazão média calculada com SWAT_CTRL de $0,20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e projeção para o futuro SWAT_FUT de vazão estimada em $0,29 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sofrendo um aumento médio de 44,5 % (Figura 42). Este aumento mostra-se diretamente proporcional com o aumento da chuva de 24,6% dos dados de Chou et al., (2011). Na Figura 43 mostra-se o fluxo de sedimentos com um aumento de 46 % no cenário SWAT_FUT, sendo a média anual

de 2,08 ton ha⁻¹ e 3,06 ton ha⁻¹ nos cenários SWAT_CTRL e SWAT_FUT respectivamente.

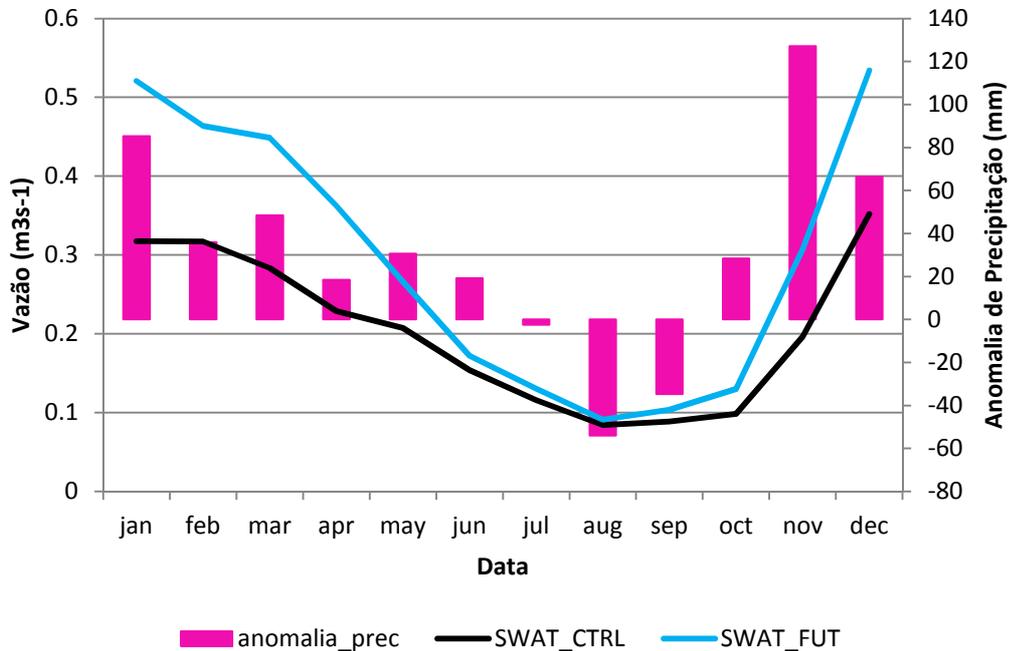


Figura 42 - Hidrograma (m³s⁻¹) médio anual dos cenários SWAT_CTRL (linha preta), SWAT_FUT (linha azul) e anomalia de precipitação (barra) para a microbacia do Ribeirão das Posses

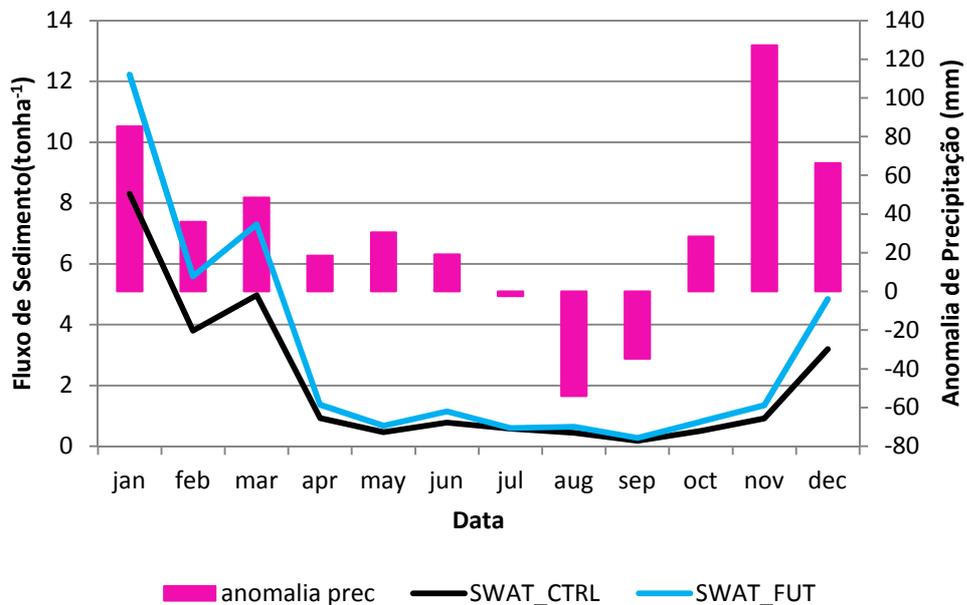


Figura 43 - Fluxo de sedimento (ton ha⁻¹) médio anual dos cenários SWAT_CTRL (linha preta), SWAT_FUT (linha azul) e anomalia de precipitação (barra) para a microbacia do Ribeirão das Posses

Na Figura 44, observamos os mapas médios anuais de produção de sedimentos em cada subbacia para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a bacia do Ribeirão das Posses. Observamos especialmente a diminuição da produção de sedimentos média anual na microbacia nos cenários de FLO e EUC, assim como o aumento de fluxo de sedimentos nos cenários de PAS, CAN e SWAT_FUT.

Estes mapas espaciais de fluxo de sedimentos por sub-bacias permitem uma visualização global da distribuição do fluxo de sedimentos, tornando-se um subsídio para a identificação das áreas com probabilidade de maiores perdas de solo.

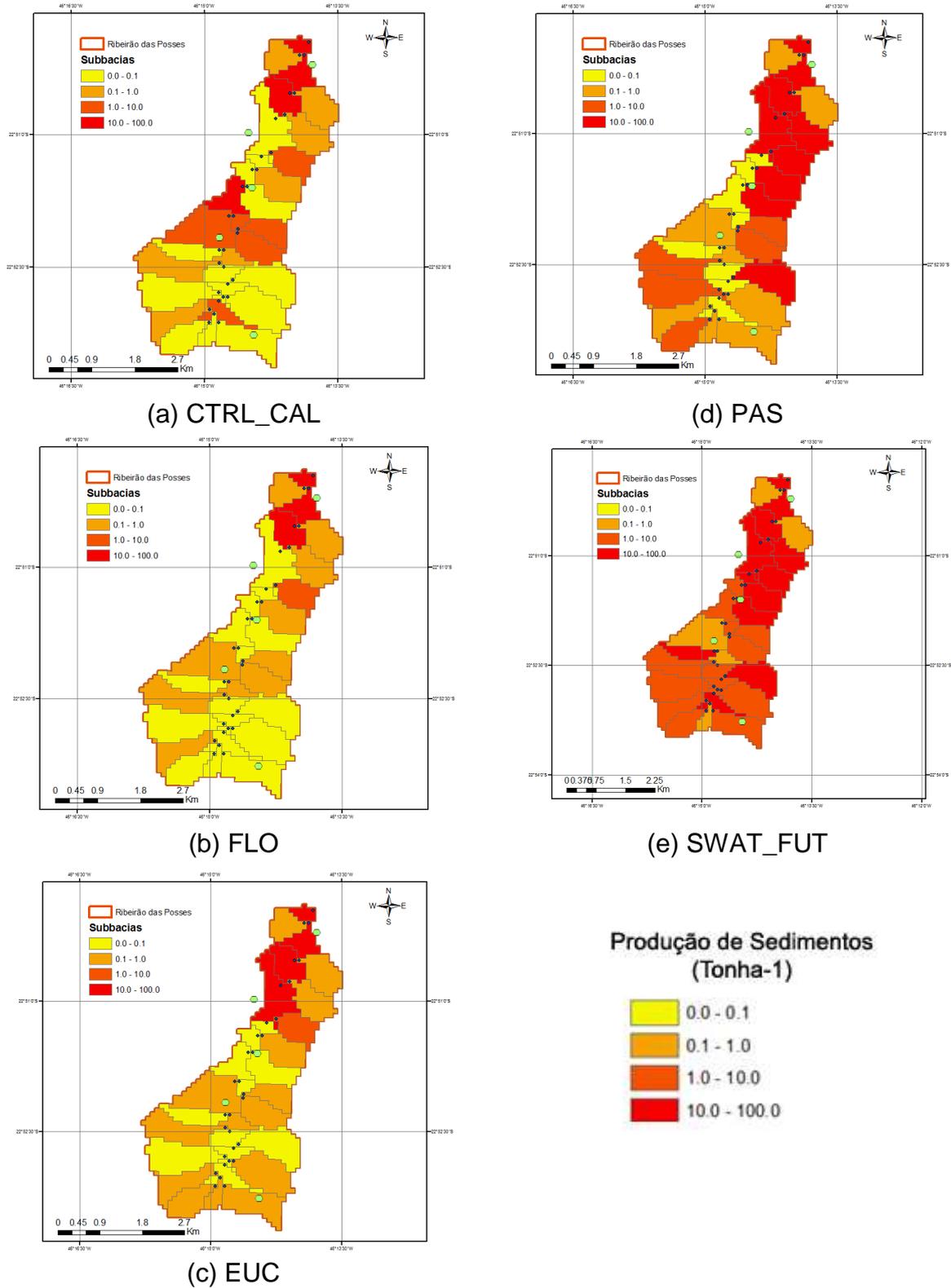


Figura 44 - Mapas de produção de sedimentos (ton ha⁻¹) médio anual por subbacias para os cenários de mudanças de uso da terra e de mudanças do clima para a microbacia do Ribeirão das Posses

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a metodologia proposta para o estudo da Bacia do Rio Piracicaba e da microbacia do Ribeirão das Posses, permitiram as seguintes conclusões:

O modelo SWAT representou adequadamente os principais fenômenos do ciclo hidrológico frente às pressões sobre os usos da terra e mudanças de clima, constatou-se que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade anual dos componentes do escoamento nas bacias hidrográficas do Rio Piracicaba e do Ribeirão das Posses. O modelo calibrado apresentou resultados adequados de desempenho em comparação com dados observados, verificado através dos índices estatísticos para as bacias em estudo.

Nas simulações dos cenários com mudanças de uso da terra em ambas as bacias constatou-se que o aumento nas vazões (mínimas, média e máximas) ocorrem nos cenários de desflorestamento, sendo o cenário de pastagem onde ocorrem os valores mais expressivos do aumento de vazão. Ao aumento/redução da vazão correspondem a redução/aumento da evapotranspiração.

Nas simulações dos fluxos de sedimentos, o cenário de reflorestamento por eucalipto mostrou uma redução da perda do solo, porém abaixo do cenário de reflorestamento por vegetação nativa, que teve os menores valores de fluxo de sedimentos, em ambas as bacias. Por outro lado, os cenários de desflorestamento proveem um aumento no fluxo de sedimento, na bacia do rio Piracicaba o cenário de cana de açúcar mostrou o maior valor, e no Ribeirão das Posses foi o cenário de pastagem.

Os resultados demonstram uma interdependência entre a gestão do uso dos solos e o gerenciamento dos recursos hídricos, os usos de solo tem reflexos diretos na produção de água das bacias hidrográficas.

A vazão e o fluxo de sedimentos mostraram-se sensíveis às mudanças de clima, obsevou-se um aumento de vazão e fluxo de sedimentos para o cenário futuro em ambas as bacias.

A estimativa de aumento de vazão indica que poderão ocorrer problemas quantitativos e qualitativos no escoamento das bacias, com consequências para a biota aquática, energia elétrica, transporte e a sociedade que depende dos recursos superficiais na região em estudo. O aumento vazão nas bacias por consequência tende a aumentar o fluxo de sedimentos, podendo modificar os canais dos rios por assoreamento e/ou erosão elevada, causar inundações nas zonas ribeirinhas, aumento de custos para tratamento de água, etc.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisando a hidroclimatologia da região em estudo, observamos que quanto melhor as informações da variável precipitação, melhor o resultado obtido com a simulação de vazão e conseqüentemente com o fluxo de sedimentos. Sendo a precipitação o fator meteorológico que exerce a maior influência no fluxo de sedimentos, quanto melhor forem os dados hidroclimáticos da bacia em estudo, melhor será a sua simulação.

Assim como para definir o clima de uma região são necessários um mínimo período de tempo de 30 anos, os dados hidrológicos também devem possuir um longo período de dados monitorados. Quanto maior a série de dados meteorológicos e hidrológicos utilizados para a simulação, melhor é o seu resultado. Séries pequenas (menores que 5 anos) não permitem a validação dos dados de contorno do modelo (bacia do Ribeirão das Posses), já que o SWAT necessita de no mínimo 2 anos para *warm-up*.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de atividades da ANA**. 2008. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Banco de dados Hidroweb**. 2014. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 22 mar. 2012.

ARABI, M.; FRANKENBERGER, J.R.; ENGEL, B.A.; ARNOLD, J.G. Representation of agricultural conservation practices with SWAT, **Hydrological Processes**, vol. 22, issue 16, 2007, pp. 3042-3055

AZEVEDO, T.S. de. O uso de geotecnologias na definição das Reservas Legais da bacia do córrego das Posses, Extrema - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: Editora Oficina de Textos, 2009. p. 3503-3510.

BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BALLESTER, M.; MARTINELLI, L.; KRUSCHE, A.; VICTORIA, R.; BERNARDES, M.; CAMARGO, P. Effects of increasing organic matter loading on the dissolved O₂, free dissolved CO₂, and respiration rates in the Piracicaba river basin. **Water Research** Completar o título, Amsterdam, v. 33, n. 9, p. 2119-2129, 1999.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E.; OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, p. 253-261, 2010.

BERTOL, I., Predição da Erosão no Brasil: Necessidade de Estuda-lá e Perpectiva de Implementação de um Modelo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: Editora da UFRGS, 2007, p 360-366

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L.H.P.; MALUTTA, S. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza - CE: Editora Expressão Gráfica, 2010. p. 1-11.

BORTOLOTTO, N.L. **Avaliação hidrossedimentológica da bacia do Rio Cunha, município de Rio dos Cedros, Santa Catarina com o Modelo SWAT**. 2011. 101 p. Trabalho (Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

CALHEIROS, R. O. Projeto de monitoramento da evolução das características hidrológicas em relação à recarga de água, características do solo quanto às perdas por erosão hídrica e da quantidade e qualidade da água produzida na microbacia do Ribeirão das Posses, Extrema, Minas Gerais, **IAC**, v. 1, n 1, 2009, 126pp.

CARAM, R.O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2010. 141 p. Tese (Doutorado em área de concentração Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2010.

CFSR, **Dados climáticos**. Disponível em: < <http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>> Acesso em: 10 jun. 2012.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Verlag, v. 38, n. 3/4: p. 635-653, 2011. doi: 10.1007/s00382-011-1002-8

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8. n. 3, p. 27-39, 2003.

COMITÊS PCJ. **Relatórios de situação dos recursos hídricos nas bacias do PCJ (2002-2003)**. 2004. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/comitespcj.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L.B. **Water in environmental planning**. San Francisco: W.H. Freeman, 1978. 818 p.

EMBRAPA. **Mapa de solos**. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br>> Acesso em: 13 jun. 2011

FICKLIN, D. L.; LUO, Y.; LUEDELING, E.; ZHANG, M. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, Middleburg, v.374, n.1, p. 16–29, 2009.

FIOREZE, A. P.; OLIVEIRA, L.F.C.; FRANCO, A.P.B. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Ambiente e Água**. Taubaté, v. 3, n. 2, p. 1-16, 2008.

FOLEGATTI, M.V.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; ZOLIN, C.A.; GONZÁLEZ, A.M.G.O. Transposição de água e disponibilidade hídrica das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivarí e Jundiá (BH-PCJ). In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 9.; CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2010. p. 1-10.

GDEM 2013. **Mapa MNT**. Disponível em: < <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

IBGE **Mapas geopolíticos**. Disponível em: < <http://mapas.ibge.gov.br/>> Acesso em: 03 fev. 2010

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Synthesis report**. Geneva, 2001. 184 p.

KFOURI, A.; FAVERO, F. **Projeto Conservador das Águas Passo a Passo**: uma descrição didática sobre o desenvolvimento da primeira experiência de pagamento por uma Prefeitura Municipal no Brasil. Brasília: The Nature Conservancy do Brasil, 2011. v. 4, 60 p.

KRUSCHE, A.; CARVALHO, F.; MORAES, J.; CAMARGO, P.; BALLESTER, M.; MARTINELLI, L.; VICTORIA, R. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 33, n. 5, p. 1117-1123, 1997.

LELIS, T. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do rio São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. 2011. 164 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

LIMA J. E. F. W., LOPES W. T. A., CARVALHO N. D. O., SILVA E. M., VIEIRA M. R., Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos , Campo Grande MS, 2008, p. 1

LINO, J.F.L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. 2009. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e produção de sedimento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152 p. Tese de doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2002.

MALUTTA, S.; KOBAYAMA, M. SWAT application to analyze the floods in Negrinho River basin – SC, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12., 2012, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: Editora da PUC/SP, 2012. p. 651-658.

MARTINELLI, L.; VICTORIA, R.; FERRAZ, E.; CAMARGO, P.; MOREIRA, M.; KRUSCHE, A.; MORAES, J.; BALLESTER, M.; LARA, L.; BERNARDES, M.; OMETTO, J.; CERRI, C. **Hydrology and water quality in the Piracicaba river basin**: the ecohydrology of South America rivers and wetlands. Wallingford: IAHS, 2002. p. 115-203 (IAHS. Special Publication, 6).

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; WEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 30, p. 885-900, 2007.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimento e do volume do escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MULUNGU, M.M.; MUNISHI, S.E. Simiyu River catchment parameterization using SWAT model. **Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C**, Cambridge, v. 32, issues 15/18, p. 1032-1039, 2007.

NASCIMENTO, A.P. do. **Estimativa da carga de lavagem transportada pelo Rio Atibaia, SP**. 2001. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation: version 2005**. Temple: Texas Agricultural Experiment Station, Agricultural Research Service, 2005. 494 p.

NUNES, A. Recursos hídricos superficiais na bacia do rio Coa num contexto de importantes alterações ambientais e socioeconômicas. In: CONGRESSO IBÉRICO SOBRE GESTÃO E PLANEJAMENTO DA ÁGUA, n. 5, 2006, Faro. **Anais... Faro: FNCA**, 2006. 1 CD-ROM.

OPPERMAN, J.J.; GALLOWAY, G.E.; FARGIONE, J.; MOUNT, J.F.; RICHTER, B.D.; SECCHI, S. Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers. **Science**, Washington, v. 326, p. 1487-1488, 2009.

ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C.A. PCJ River Basins water availability caused by water diversion scenarios to supply metropolitan areas of São Paulo. **Water Resources Management**, Berlin, v. 25, p. 1-16, 2011.

PIRACENA. **Projeto Piracena**. 2014. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena/html/localp.htm>>. Acesso em: 08 jan. 2014.

POSTEL, S. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. **Ecological Applications**, Amherst, v. 20, p. 941-948, 2000.

QIU, L.; ZHENG, F.; YIN, R. SWAT Based runoff and sediment simulation in a small watershed, the loessial hilly region of China: capabilities and challenges. **International Journal of Sediment Research**, Middleburg v. 27, n. 2, p. 226-234, 2012.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental:** Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. São José dos Campos: INPE, 2000. 60 p.

SAAD, S.I. **Otimização dos serviços ambientais e tomada de decisão para o uso da terra na bacia dos rios Piracicaba-Capivari-Jundiá.** 2013. 75 p. Monografia (Qualificação de Doutorado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, J.M. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente:** um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba. 2014. 89 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Faculdade de Ciências Atmosféricas Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, M.A.; LIMA, G.C.; SILVA, M.L.N.; FREITAS, D.A.F.; OLIVEIRA, A.H.; SANTOS, W.J.R.; PEREIRA, P.H.; SANTOS, D.G.; VEIGA, F. **Levantamento de solos e diagnóstico da degradação do solo e da água em função do uso.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2008. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/produagua/>>. Acesso em: 08 jan. 2012.

SOUZA, R. M. de; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Porto Alegre: Editora Universitária da UFRGS, 2009. p. 164-170.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH, 2005. 669 p.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

_____. Environmental Issues in the La Plata Basin. **Water Resources Development**, Dublin, v. 14, n. 2, p. 157-173, 1998.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; RODRÍGUEZ, S.L. **Gerenciamento e Recuperação das Bacias Hidrográficas dos Rios Itaquerí e do Lobo e da Represa Carlos Botelho (Lobo-Broa).** São Carlos: IIE; IIEGA; PROAQUA; ELEKTRO, 2003. 12 p.

VIOLA, M.R. **Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande com cenários de uso do solo e mudanças climáticas A1B.** 2011. 287p. (Doutorado em área de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

WILLIAMS, J.R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Present and**

prospective technology for predicting sediment yield and sources:
proceedings... Oxford: USDA Sedimentation Lab., 1975. p. 244-252. (ARS-S, 40).

WISCHMEIR, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses:** a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, 537).

ZOLIN, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MINGOTI, R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.;
PAULINO, J.; ORELLANA GONZÁLES, A.M.G. Minimização da erosão em função
do tamanho e localização das áreas de floresta no contexto do programa
“Conservador das Águas”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.
35, p. 2157-2166, 2011.

ANEXOS

ANEXO A

Equações componentes do SWAT – hidrologia e sedimentos

1A Hidrologia

A fase terrestre do balanço hidrológico é definida pela eq. (A1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (A1)$$

Onde:

SW_t = quantidade final de água no solo (mm)

SW_0 = quantidade inicial de água no solo (mm)

t = tempo (dias)

R_{day} = precipitação diária total (mm)

Q_{surf} = escoamento superficial diário total (mm)

E_a = evapotranspiração diária total (mm)

w_{seep} = percolação diária total (mm)

Q_{gw} = fluxo de retorno diário total (mm)

O Escoamento superficial é calculado a partir da eq. (A2). O escoamento superficial ocorre sempre que $R_{day} > I_a$.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (A2)$$

Onde:

Q_{surf} = escoamento superficial total (mm)

R_{day} = precipitação diária total (mm)

I_a = retirada inicial que abrange o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm)

S = parâmetro de retenção de água no solo (mm).

O parâmetro de retenção varia com o tipo de solo, uso da terra, manejo e declividade, conforme a eq. (A3):

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (A3)$$

Onde:

S = parâmetro de retenção (mm).

CN = curva número

A retirada inicial que abrange o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial, é comumente aproximada a $0.2S$, modificando assim a eq. (A3) pela eq. (A4).

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

$$Q_{surf} = 0, \quad P < 0,2S \quad (A4)$$

Curva Número é uma função da permeabilidade do solo, do uso da terra e das condições antecedentes de umidade do solo. Definiram-se três condições de umidade antecedente:

- CN1 – condição seca (ponto de murcha);
- CN2 – condição de umidade média;
- CN3 – condição úmida (capacidade de campo).
-

Os valores tabelados de CN encontram-se na condição CN2, para transformá-lo para as condições CN1 e CN3, utilizam-se as eq. (A5) e eq. (A6), respectivamente.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20.(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0,0636.(100 - CN_2)])} \quad (A5)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0.00673.(100 - CN_2)] \quad (A6)$$

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação, eq.(A7). Ela é um indicador do potencial erosivo de uma precipitação e é usado para estimar a perda de sedimentos na bacia hidrográfica.

$$q_{peak} = \frac{C.i.Area}{3.6t_{conc}} \quad (A7)$$

Onde:

q_{peak} = vazão de pico (m^3s^{-1})

C = coeficiente de runoff

i = intensidade da precipitação ($mmhr^{-1}$)

Área = área da subbacia (km^2)

3.6 = fator de conversão unidades

t_{conc} = tempo de concentração (horas)

O tempo de concentração, eq.(A8), é o tempo necessário para que a água que precipita no ponto mais distante da bacia escoe até o exutório.

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (A8)$$

Onde:

t_{conc} = tempo de concentração (horas)

t_{ov} = tempo de concentração do escoamento terrestre (horas)

t_{ch} = tempo de concentração do escoamento no canal (horas)

$$t_{ov} = \frac{L_{slp} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad (A9)$$

Onde:

L_{slp} = comprimento da encosta (m)

n = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional)

slp = média declividade ($m \cdot m^{-1}$)

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad (A10)$$

Onde:

L = comprimento do canal do ponto mais distante ao exutório (km)

n = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional)

Área = área da subbacia (km^2)

Slp_{ch} = declive canal ($m \cdot m^{-1}$)

O volume de água disponível para percolação na camada do solo é calculado pela eq.(A11):

$$\begin{aligned} SW_{ly,excess} &= SW_{ly} - FC_{ly} & se & SW_{ly} > FC_{ly} \\ SW_{ly,excess} &= 0 & se & SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{aligned} \quad (A11)$$

Onde:

$SW_{ly,excess}$ = volume de água drenada na camada de solo (mm)

SW_{ly} = conteúdo de água no solo (mm)

FC_{ly} = quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm)

A eq.(A12) mostra o cálculo de quantidade de água que percola:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (A12)$$

Onde:

$W_{perc,ly}$ = quantidade de água que percola para a camada abaixo (mm)

$SW_{ly,excess}$ = volume de água drenada na camada de solo (mm)

ΔT = intervalo de tempo (h)

TT_{perc} = tempo de propagação na camada do solo (h)

O tempo de propagação na camada do solo é único para cada camada de solo, conforme a eq.(A13).

$$TT = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (A13)$$

Onde:

SAT_{ly} = quantidade de água na camada do solo quando saturado (mm)

FC_{ly} = quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm)

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada (mmh^{-1})

O escoamento lateral, eq.(A14), é significativo em áreas com solos com camadas superficiais com alta condutividade hidráulica seguidos de camada impermeáveis ou semi-impermeáveis.

$$Q_{lat.} = 0.024 \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (A14)$$

Onde:

Q_{lat} = quantidade de água que escoo (mm)

$SW_{ly,excess}$ = volume de água drenada na camada de solo (mm)

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada (mmh^{-1})

slp = média declividade ($m.m^{-1}$)

Φ_d = porosidade drenável da camada de solo ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

L_{hill} = comprimento do declive (m)

A2 Sedimentos

A erosão causada pela chuva e pelo escoamento superficial é predita pela Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), (WILLIAMS, 1975). MUSLE é a versão modificada da Equação de Perda de Solo (USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978).

O cálculo da MUSLE pode ser obtido através da eq. (A15):

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot Area_{hru})^{0.56} \cdot K_{usle} \cdot C_{usle} \cdot P_{usle} \cdot LS_{usle} \cdot CFRG \quad (A15)$$

Onde:

sed = produção de sedimentos (ton)

Q_{surf} = escoamento superficial total (mm)

q_{peak} = vazão de pico ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

$Area_{hru}$ = Area HRU (ha)

K_{usle} = Fator de erodibilidade do solo ($0,013 \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} / \text{m}^{-3} \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

C_{usle} = Fator que expressa uso e manejo do solo e cultura

P_{usle} = Fator que expressa a prática conservacionista do solo.

LS_{usle} = Fator topográfico que expressa à declividade do terreno ou grau do declive

CFRG = Fator fragmento grosseiro

O fator de erodibilidade do solo é calculado pela eq. (A16):

$$K_{usle} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5(c_{perm} - 3)}{100} \quad (A16)$$

Onde:

K_{usle} = Fator de erodibilidade do solo ($0,013 \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} / \text{m}^{-3} \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

M = parâmetro tamanho das partículas

OM = quantidade de matéria orgânica (%)

C_{soilstr} = código da estrutura solo usado na classificação dos solos

C_{perm} = classe de permeabilidade do solo

O parâmetro tamanho de partículas é calculado através da eq. (A17)

$$M = (m_{\text{silt}} + m_{\text{vfs}}) \cdot (100 - m_c) \quad (\text{A17})$$

Onde:

M = parâmetro tamanho das partículas

m_{silt} = quantidade de silte (%)

m_{vfs} = quantidade de areia fina (%)

m_c = quantidade de argila (%)

A quantidade de matéria orgânica é calculada pela eq. (A18)

$$OM = 1.72 \cdot \text{orgC} \quad (\text{A18})$$

Onde:

OM = quantidade de matéria orgânica (%)

orgC = quantidade de carbono orgânico (%)

Os valores de C_{soilstr} e C_{perm} , são utilizados conforme tabelas A1 e A2, abaixo:

Tabela A1 – Código da estrutura solo usado na classificação dos solo

C_{soilstr}	Definição
1	Grânulos muito finos
2	Grânulos finos
3	Grânulos médios ou grossos
4	Grânulos em bloco ou placas

Tabela A2 – Classe de permeabilidade do solo

C_{perm}	Condutividade Hidráulica Saturada (mmh^{-1})
1	Rápido (>150)
2	Moderado a rápido (50 – 150)
3	Moderado (15 – 50)
4	Lento a moderado (5 – 15)
5	Lento (1 – 5)
6	Muito lento (< 1)

O Fator uso e manejo do solo, é calculado pela eq. (A19):

$$C_{usle} = \exp\left(\left[\ln(0.8) - \ln(C_{usle,mn})\right] \cdot \exp\left[-0.00115 \cdot rsd_{surf}\right] + \ln[C_{usle,mn}]\right) \quad (A19)$$

Onde:

C_{usle} = Fator que expressa uso e manejo do solo e cultura

$C_{usle,Mn}$ = Valor mínimo para o fator de cobertura e manejo do solo, calculado pela eq. (A20).

rsd_{surf} = quantidade de resíduo no solo ($kg \cdot ha^{-1}$)

$$C_{usle,mn} = 1.463 \ln[C_{usle,aa}] + 0,1034 \quad (A20)$$

$C_{usle,aa}$ = média anual do fator cobertura solo

O Fator práticas conservacionistas, é retirado da Tabela A3:

Tabela A3 - Fator prática conservacionista do solo

Declividade do solo (%)	P _{usle}	Máximo comprimento (m)
1 – 2	0.60	122
3 – 5	0.50	91
6 – 8	0.50	61
9 – 12	0.60	37
13 – 16	0.70	24
17 – 20	0.80	18
21 – 25	0.90	15

O Fator topográfico é calculado pela eq. (A21):

$$LS_{usle} = \left(\frac{L_{hill}}{22.1} \right)^m \cdot (65.41 \cdot \text{sen}^2(\alpha_{hill}) + 4.56 \cdot \text{sen} \alpha_{hill} + 0.065) \quad (A21)$$

Onde:

LS_{usle} = Fator topográfico que expressa à declividade do terreno ou grau do declive

L_{hill} = comprimento do declive (m)

α_{hill} = ângulo do declive

O fator exponencial m é calculado pela eq. (A22)

$$m = 0.6 \cdot (1 - \exp[-35,835 \cdot slp]) \quad (A22)$$

Onde:

slp = média declividade ($m \cdot m^{-1}$)

O Fator fragmento grosseiro é calculado pela eq.(A23):

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \quad (A23)$$

$rock$ = quantidade de pedra/rocha na primeira camada do solo (%)

ANEXO B

Anomalias de temperaturas e precipitação entre os cenários SWAT_CTRL e SWAT_FUT

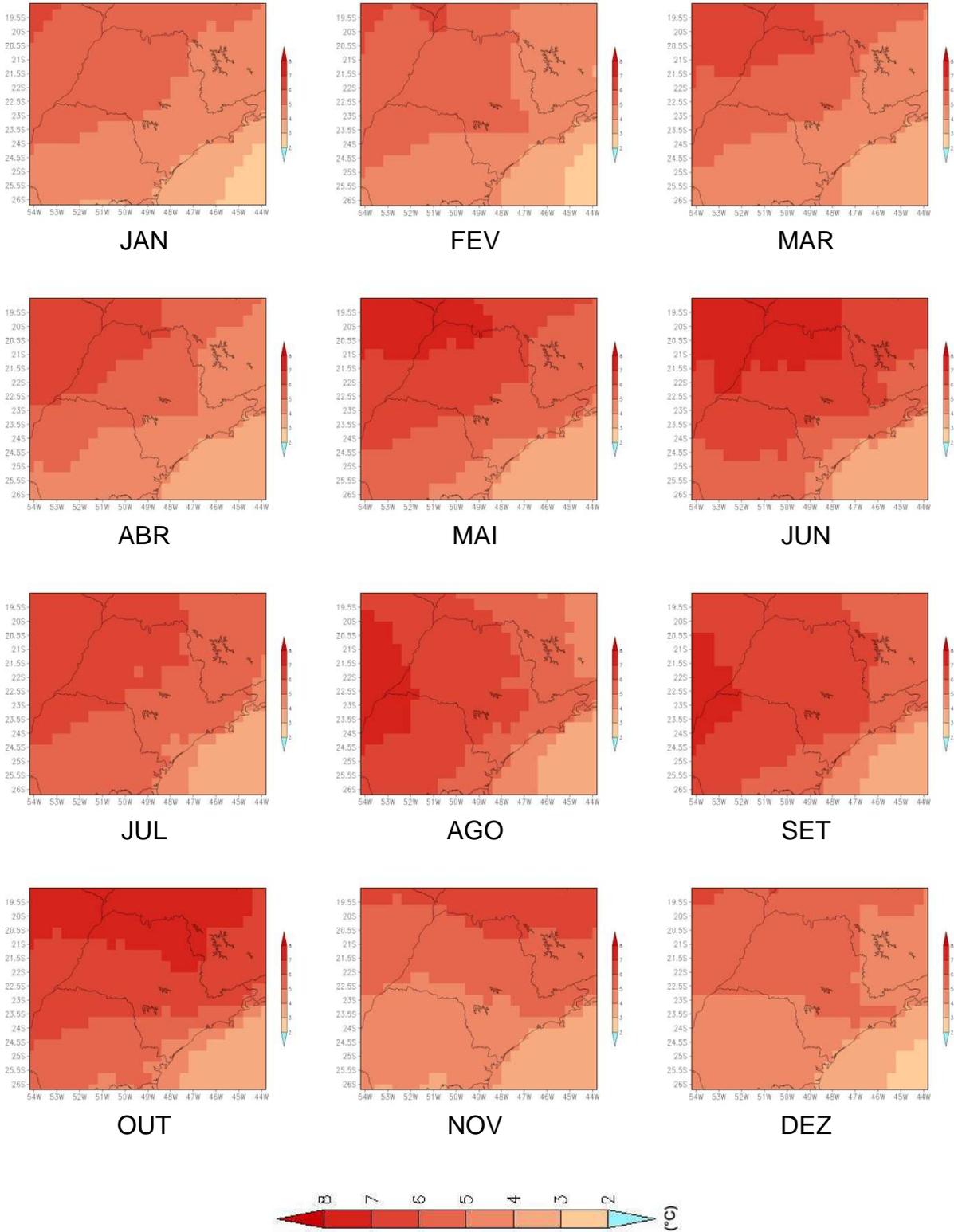


Figura B1 - Anomalia mensal da temperatura máxima (°C)

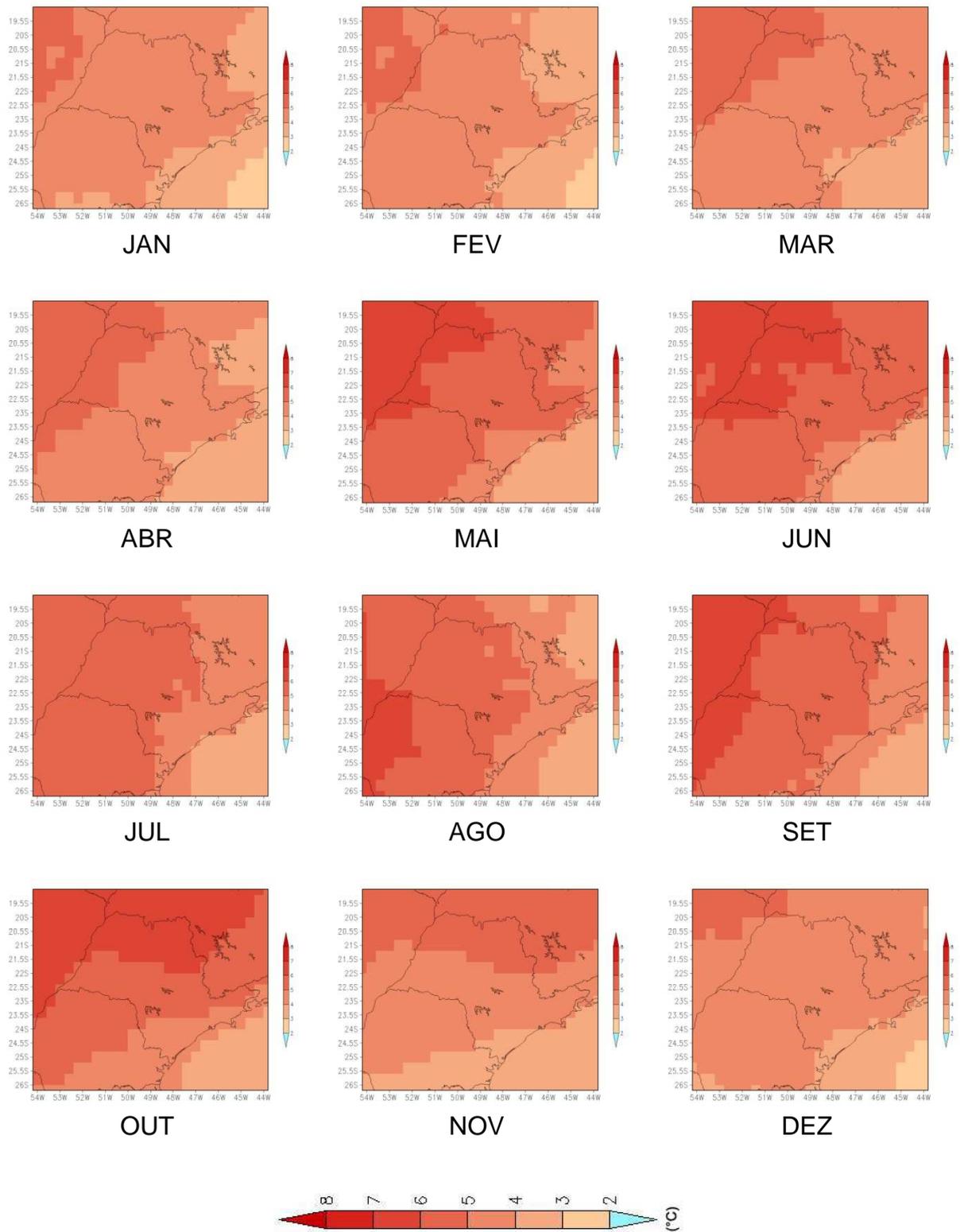


Figura B2 - Anomalia mensal da temperatura mínima (°C)

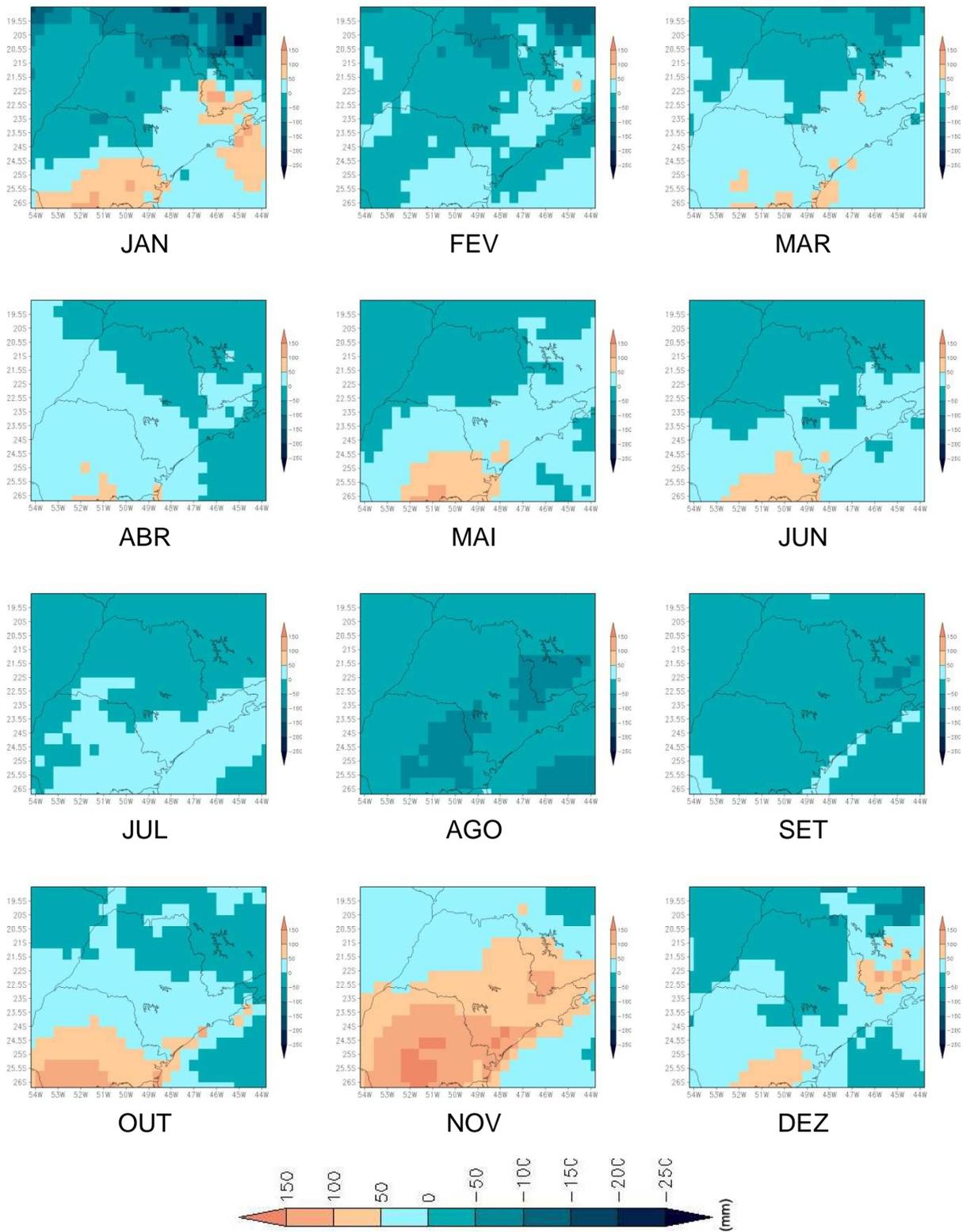


Figura B3 - Anomalia mensal da precipitação (mm)