



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
- MESTRADO -

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DOS
PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO
ALTO RIO SÃO FRANCISCO**

por

Joyce de Araujo Beltrão

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa - Paraíba

Setembro - 2015

JOYCE DE ARAUJO BELTRÃO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DOS
PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO
ALTO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marque da Silva

JOYCE DE ARAUJO BELTRÃO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO ALTO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação aprovada em ____/____/____

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva c UFPB

(Orientador)

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos Natal UFPB

Examinador Interno

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE

Examinadora Externa

João Pessoa-PB

2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus. Sem Ele teriam, há muito, me faltado forças para continuar.

Ao meu irmão, Péricles Teles Beltrão e minha cunhada Samara Oida Beltrão que nos momentos mais difíceis sempre tiveram uma palavra de conforto e de amor para me oferecer.

Ao meu noivo, Júlio Cesar Rocha Fontes Filho, por ter estado ao meu lado através de todas as dificuldades desse longo caminho.

Ao meu avô, que hoje tão distante, permeia meus dias com lembranças constantes da pessoa que você foi e de quem sou hoje graças a você.

Aos meus tios, agradeço profundamente o papel e a participação de vocês especialmente no último ano. Sem suas palavras, sem a vontade de você eu teria sucumbido, vocês me mostraram o quanto eu consigo suportar e ser forte. Jamais esquecerei.

Ao meu orientador, professor Dr. Richarde Marques, agradeço a oportunidade de aprender, a paciência e a solidariedade nos momentos difíceis que precisei enfrentar.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB por todo conhecimento compartilhado ao longo do curso.

Aos bolsistas do Laboratório de Pesquisa e Projetos em Análise Espacial (LEPPAN) da UFPB, especialmente José Carlos, por sua participação essencial durante todo decorrer do trabalho.

Aos funcionários da coordenação do programa, em especial Miriam, por toda ajuda e suporte.

Aos professores que aceitaram compor a banca examinadora, Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães e Prof. Dr. Suzana Maria Gico Montenegro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido.

Finalmente, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para conclusão desse trabalho. Com vocês divido a felicidade de ter chegado ao fim.

RESUMO

Há na contemporaneidade uma preocupação maior com a gestão sistêmica dos recursos hídricos em virtude do desequilíbrio entre oferta e demanda desse bem. Estudos hidrológicos em bacias hidrográficas são, principalmente, voltados à compreensão do balanço hídrico, dos processos hidrológicos predominantes na região, dos impactos causados por mudanças no uso do solo, ou a respeito da qualidade e quantidade da água disponível para consumo. Nesse contexto o presente estudo teve como objetivo realizar um diagnóstico do escoamento superficial na Sub-bacia 40 do Rio São Francisco, localizada na região do Alto Rio São Francisco, a fim de avaliar a aplicabilidade do modelo par a área. A fim de auxiliar as análises, os procedimentos metodológicos consistiram em (1) entrada de dados no modelo; (2) discretização em sub-bacias e criação das unidades de resposta hidrológica (URH); (3) análise de sensibilidade; (4) calibração e validação do modelo; (5) simulações e análises estatísticas. Foram geradas 20 sub-bacias e 190 URH. A análise de sensibilidade mostrou seis parâmetros mais sensíveis que ao serem aplicados no modelo geraram resultados considerados satisfatórios para a calibração e insatisfatórios para alguns períodos da validação. De forma geral, o modelo apresentou uma boa eficiência para os eventos simulados, apesar de algumas limitações nos resultados finais relacionadas, principalmente, a deficiência nos dados observados para a área de estudo desta pesquisa.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, SWAT, Alto Rio São Francisco.

ABSTRACT

In the contemporary times, there is an expressive concern about systemic management of water resources due to the imbalance between supply and demand of that good. Hydrological studies about water basin are, mainly aimed at understanding the water balance, the prevailing hydrological processes in the region, the impacts of changes in land use, the quality and quantity of water available for consumption. In this context the goal of this work is to carry out a diagnosis of runoff in the Sub Basin 40 of São Francisco River, located in the Upper São Francisco River region, in order to evaluate the applicability of the model for the area. To assist the analysis, the methodological steps consisted in (1) loading data in SWAT database; (2) definition of the sub basins and creation of hydrological response units (HRU); (3) sensitivity analysis; (4) calibration and validation; (5) simulation and statistical analysis. Were generate 20 sub basins and 190 HRU; the sensitivity analysis showed six parameters more sensitive which, when applied to the model, generated satisfactory results for the calibration and unsatisfactory for some validation periods. In general, the model showed a good efficiency for the simulated events, in spite of some limitations in the related final results primarily in a deficiency observed data for the study of this area of research.

Keywords: Hydrologic modeling, SWAT, Upper São Francisco.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativa	15
1.2. Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.3 Objetivos específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Ciclo hidrológico.....	18
2.2 Escoamento Superficial.....	20
2.3 Processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas	22
2.3.1. Produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas.....	24
2.3.2. Influência do uso e ocupação do solo na produção de sedimentos.....	25
2.4 Modelos hidrológicos.....	26
2.4.1. Classificação dos modelos hidrológicos.....	27
2.5 Aplicações do modelo SWAT.....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Caracterização da área de estudo	35
3.2 O modelo SWAT.....	38
3.3 Construção da base de dados.....	48
3.3.1 Dados de chuva e vazão.....	48
3.3.2 Modelo digital de elevação.....	49
3.3.3 Mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo.....	50
3.3.4 Dados de precipitação	53
3.4 Discretização da bacia e determinação das Unidades de Resposta Hidrológica	54
3.5 Definição dos parâmetros característicos da área de estudo	55
3.6 SWAT-CUP	56

3.6.1. SUFI-2	57
3.7 Análises de tendências: os métodos Mann-Kendall e Sen	60
3.7 Dados de entrada do modelo	62
3.7.1 Modelo digital de elevação	62
3.7.2 Mapas de uso e ocupação do solo e classes de solo	64
3.8 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT	69
3.9 Calibração e análise de sensibilidade	70
3.10 Análises de desempenho do modelo SWAT	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1. Modelagem hidrológica	74
4.1.1 Calibração do modelo SWAT	74
4.1.2 Validação do modelo SWAT	80
4.2 Análises de tendências e correlação chuva-vazão.....	84
4.3 Análise da variabilidade da precipitação na produção de sedimentos e na vazão ..	92
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
6. REFERÊNCIAS	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de perda de solo e produção de sedimentos.....	29
Tabela 2 – Parâmetros de solo no modelo SWAT.	52
Tabela 3 – Descrição dos postos pluviométricos.....	53
Tabela 4 – Classes de uso do solo e reclassificação do modelo Swat.....	68
Tabela 5 – Tipos de solo e reclassificação do modelo Swat	68
Tabela 6 – Parâmetros utilizados pelo SWAT na simulação de vazão	69
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações.....	70
Tabela 8 – Classificação do índice de eficiência estatística dos coeficientes de Nash-Sutcliffe e R^2	72
Tabela 9 – Lista de parâmetros mais sensíveis durante a calibração, faixa de variação e valores otimizados.	80
Tabela 10 – Índice de correlação entre dados de precipitação e vazão.	86
Tabela 11 – Variabilidade temporal das vazões observadas entre 1978 a 1998 e 1999 a 2007.	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do ciclo hidrológico.....	19
Figura 2 – Mapa de localização da bacia do Alto Rio São Francisco.....	36
Figura 3 – Procedimentos para a geração da base de dados do SWAT.....	40
Figura 4 – Componentes de simulação hidrológica pelo SWAT.....	42
Figura 5 – Localização geográfica dos postos pluviométricos.....	54
Figura 6 – Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação.....	58
Figura 7 – Modelo Digital de Elevação do Terreno da bacia do Alto Rio São Francisco.....	63
Figura 8 – Mapa de declividade da bacia do Alto Rio São Francisco.....	64
Figura 9 – Mapa dos tipos de solo da bacia Alto Rio São Francisco.....	65
Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Alto Rio São Francisco.....	66
Figura 11 – Mapa das sub-bacias geradas no modelo SWAT. Os postos fluviométricos foram considerados exutórios e correspondem, respectivamente, as sub-bacias 9 (Posto de Porto das Andorinhas), 19 (Posto de Pari) e 20 (Posto de Ponte da Taquara.....	67
Figura 12 – Hidrogramas observado e simulado no período de janeiro de 1978 a dezembro de 1998, para o posto Porto das Andorinhas (calibração).....	74
Figura 13 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Porto das Andorinhas.....	75
Figura 14 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1978 a 1998, para o posto Pari (calibração).....	76
Figura 15 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Porto das Andorinhas.....	77
Figura 16 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1978 a 1998, para o posto Ponte da Taquara (calibração).....	78
Figura 17 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Ponte da Taquara.....	79
Figura 18 – Relação entre as vazões observadas e simuladas no período de 1999 a 2007, para o posto Porto das Andorinhas (validação).....	81

Figura 19 – Relação entre as vazões observadas e simuladas no período de 1999 a 2007, para o posto Pari (validação).....	82
Figura 20 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1999 a 2007, para o posto Pari (validação).....	82
Figura 21 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1999 a 2007, para o posto Ponte da Taquara (validação).....	83
Figura 22 – Gráfico de tendência de precipitação para toda a bacia.	85
Figura 23 – Gráfico de tendência de vazão para toda a bacia.	85
Figura 24 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados pluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95%. ...	87
Figura 25 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados fluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95%. ...	89
Figura 25 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados fluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95% (continuação).....	90
Figura 26 – Distribuição espacial das tendências de precipitação e vazão na área de estudo.	91
Figura 27 – Produção de sedimentos estimada para as sub-bacias do Alto Rio São Francisco: (a) 1978 a 1998, e (b) 1999 a 2007.....	94
Figura 28 – Vazão estimada para as sub-bacias do Alto Rio São Francisco: (a) 1978 a 1998, e (b) 1999 a 2007.....	95

1. INTRODUÇÃO

Há na contemporaneidade uma preocupação maior com a gestão sistêmica dos recursos hídricos em virtude do desequilíbrio entre oferta e demanda desse bem. A exploração controlada e sustentável dos recursos naturais em geral, e da água em particular, vem sendo cada vez mais valorizada especialmente em áreas urbanas de elevado crescimento populacionais.

Nesse sentido, os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas são principalmente voltados à compreensão do balanço hídrico, dos processos hidrológicos predominantes na região, dos impactos causados por mudanças no uso do solo, ou a respeito da qualidade e quantidade da água disponível para consumo.

A fim de auxiliar esse monitoramento, além da proteção e uso de bacias hidrográficas, uma ampla gama de modelos matemáticos vem sendo utilizada, uma vez que permitem simular e avaliar os impactos das mudanças ocorridas na área da bacia, rio ou reservatório (KUWAJIMA, 2012) além de facilitar a compreensão dos fenômenos que envolvem estes eventos.

Basicamente, a modelagem matemática consiste em representar o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. Seu objetivo é compreender melhor o sistema e prever situações futuras, e algumas vezes também reproduzir o passado para direcionar as ações de decisão (MACHADO, 2002).

Contudo, não é possível representar todas as relações existentes dentro de uma bacia hidrográfica apenas em termos matemáticos. Por isso, tornou-se comum a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) associados aos modelos uma vez que essa prática permite a manipulação, tratamento e combinação de dados de diversas fontes nas análises realizadas.

Dentre estes modelos destaca-se o modelo chuva-vazão-erosão, distribuído e de base física *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), que discretiza a bacia em unidades de resposta homogêneas, criadas mediante mapas de tipos de solos, uso do solo e do Modelo Digital de Elevação (MDE) no ambiente ArcSWAT, uma integração do SIG ArcGIS e do modelo SWAT (Srinivasan & Arnold, 1994; Neitsch et al., 2010).

O SWAT vem sendo aplicado de forma eficiente no estudo de bacias pequenas ou grandes sendo capaz de simular longos períodos de tempo o que torna possível observar efeitos de alterações nos padrões de uso e ocupação do solo nos anos de interesse. Além disso, o modelo também é capaz de analisar mudanças hipotéticas

nesses padrões, produzir dados de escoamento superficial e estimar a produção de sedimentos na bacia.

Considerando que em regiões próximas a barragens e reservatórios, estudos sobre o aporte de sedimentos são de extrema valia para gestão dos recursos hídricos – uma vez que o acúmulo indevido resulta na perda da capacidade de armazenamento de água – esta pesquisa propôs a aplicação do modelo SWAT na simulação da vazão e produção de sedimentos na Região do Alto Rio São Francisco, onde estão localizados o Reservatório e Usina Hidroelétrica de Três Marias.

A Região do Alto Rio São Francisco subdivide-se, por sua vez, em duas sub-bacias, de acordo com classificação da Agência Nacional de Águas (ANA): Sub-40 e Sub-41. Das quais a primeira é o objeto de estudo desta pesquisa.

Com uma área total de aproximadamente 46.679 km², a Sub-40 é uma área de grande diversidade econômica e significativa disponibilidade de infraestruturas urbanas, estando localizadas nela as nascentes dos rios São Francisco, Pará, Paraopeba, Indaiá e Borrachudo, além da Usina Hidroelétrica de Três Marias, responsável pelo abastecimento hídrico e elétrico de aproximadamente 1,1 milhão de pessoas, segundo dados da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2012).

Tendo em vista a grande importância socioeconômica e ambiental da área, neste trabalho também foram realizadas análises da variabilidade espacial e temporal da precipitação e vazão observadas, uma análise de tendências dos dados pluviométricos e fluviométricos e a verificação do desempenho do modelo SWAT nas simulações dos processos de escoamento superficial e produção de sedimentos para a bacia estudada.

Os dados da pesquisa estão estruturados em quatro partes, sendo elas: Elementos introdutórios, onde são apresentados a introdução e os objetivos da pesquisa; Fundamentação teórica e revisão bibliográfica, com uma breve descrição sobre bacias hidrográficas, conceitos e relevância de estudos sobre o tema, modelos matemáticos e modelagem hidrológica; Materiais e métodos, onde além da caracterização da área de estudo, descrevem-se os dados matriciais e alfanuméricos utilizados na elaboração da pesquisa, programas utilizados e os métodos aplicados para obtenção dos resultados; Resultados, onde são apresentadas as informações e análises obtidas ao final do processamento dos dados de entrada no modelo hidrológico.

1.1. Justificativa

Neste trabalho será apresentada a aplicação de um modelo de simulação de vazão e erosão numa bacia hidrográfica que apresenta grande diversidade econômica e disponibilidade de infraestruturas urbanas, a Sub-bacia 40 do Rio São Francisco. A mesma já possui instalado um comitê de bacia hidrográfica, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, assim os resultados que venham a ser obtidos podem ser utilizados pelo comitê atuando como uma ferramenta em estudos de previsão hidrossedimentológica.

Além disso, no Alto Rio São Francisco estão localizados, o reservatório e a Usina Hidroelétrica de Três Marias, em regiões próximas a barragens e reservatórios, estudos sobre o aporte de sedimentos são de extrema valia para gestão dos recursos hídricos disponibilizados uma vez que o acúmulo de sedimentos resulta na perda da capacidade de armazenamento de água seja para fins de consumo humano, irrigação e geração de energia.

Outro efeito que pode ser citado é um possível aumento, ou maior suscetibilidade de enchentes nas áreas a montante da área de remanso ou mesmo o aumento dos processos erosivos na calha do rio a jusante da barragem devido à falta de sedimentos no escoamento e à regularização do curso d'água que ao perder sua capacidade de carga passa a depositar mais sedimentos nos leitos do rio levando a um consequente assoreamento desses corpos d'água.

Tendo em vista os possíveis problemas causados pela deposição de sedimentos e a escassez de recursos hídricos decorrentes das atividades humanas, acredita-se que a justificativa para realização e relevância desta pesquisa fica bastante clara, especialmente considerando que se pretende identificar as áreas mais vulneráveis a fim de sugerir medidas mitigadoras ou preventivas para os impactos existentes e previstos na bacia.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a variabilidade da precipitação e sua influência nos processos hidrossedimentológicos na bacia do Alto Rio São Francisco.

1.2.3 Objetivos específicos

- Analisar os padrões de tendências da precipitação na bacia do Alto Rio São Francisco.
- Analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação e da vazão na bacia do Alto Rio São Francisco.
- Identificar áreas com maior risco à erosão dos solos no Alto Rio São Francisco a partir da utilização do modelo hidrossedimentológico SWAT.
- Verificar o desempenho do modelo SWAT na simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Alto Rio São Francisco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata a respeito dos fundamentos teóricos que embasaram a realização desta pesquisa, são conceitos sobre processos hidrológicos, bacias hidrográficas, erosão e transporte de sedimentos, modelos hidrológicos e integração destes com Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

2.1. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico ou ciclo da água é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície da terra e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela ação da energia solar associada à gravidade e à rotação da terra (TUCCI, 2009).

Trata-se de um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer e se transformar ao longo do tempo, e integra três partes do sistema que compõem a Terra: a atmosfera, onde é encontrada principalmente água no estado gasoso; a hidrosfera, representando a água na fase líquida ou sólida na superfície do planeta; e a litosfera, abrangendo todos os tipos de águas subterrâneas (CHOW, 1964; CASTRO, 2013).

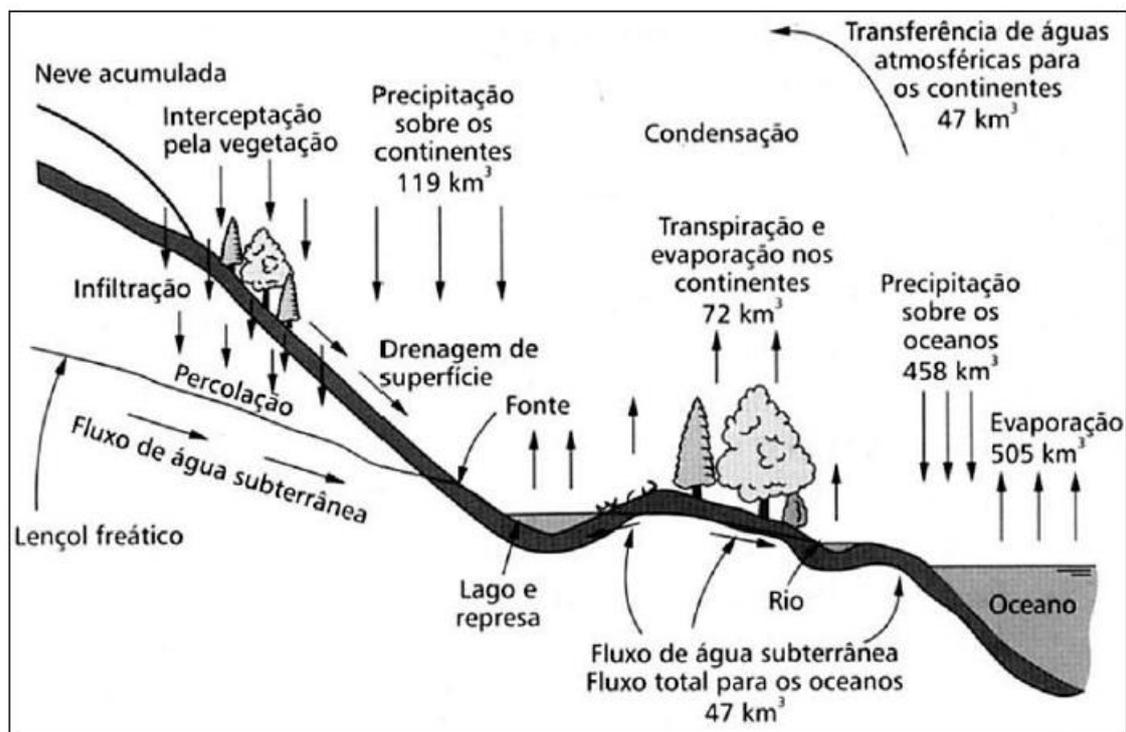
O ciclo hidrológico pode ser dividido em etapas para uma melhor compreensão: precipitação; interceptação; infiltração e percolação; escoamento superficial; escoamento subterrâneo; evaporação e transpiração (evapotranspiração) (PAIVA et al., 2010). A Figura 1 apresenta as etapas do ciclo hidrológico.

A precipitação, adotada como ponto inicial do ciclo, corresponde a toda a água que passa da atmosfera para a superfície terrestre, independente do estado físico (a forma mais frequente é no estado líquido: chuva). A água proveniente da precipitação, que atinge a superfície do solo, percorre vários caminhos até atingir os rios, canais, reservatórios e oceanos. Parte da precipitação, antes de tocar o solo, pode ficar retida na vegetação, dando origem a etapa do ciclo conhecida como interceptação. A precipitação interceptada pela vegetação irá evaporar (passar do estado líquido para o gasoso) (PAIVA et al., 2010).

Após alcançar o solo, parte da água tende a infiltrar. A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da

superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (TUCCI, 2009).

Figura 1 – Ilustração do ciclo hidrológico.



Fonte: Tundisi (2003).

A taxa de infiltração superficial depende da umidade e condições superficiais do solo, enquanto que a movimentação da água na camada depende da condutividade hidráulica do solo (SANTOS, 1994). O movimento descendente da água para as camadas inferiores do solo é denominado de percolação (TUCCI, 2009).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima pra baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. Normalmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo perfil, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo decresce com a profundidade (SANTOS, 1994).

A partir do momento em que for excedida a capacidade de retenção de água pela vegetação e a superfície do solo já estiver saturada, passa a ocorrer o escoamento superficial, que se caracteriza como o movimento da água sobre a superfície do solo.

O escoamento superficial é regido por leis físicas (conservação de massa, energia e quantidade de movimento) e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade. O escoamento é influenciado pelas características da precipitação (intensidade e duração), pelas características do solo (textura, capacidade de infiltração e umidade) e pelo tipo de cobertura vegetal. Quanto maior for a capacidade de infiltração do solo, menor será a parcela da precipitação que irá escoar (ARAGÃO, 2000).

No processo de escoamento superficial, a água é impulsionada pela gravidade para cotas mais baixas, forma pequenos filetes que tendem a se unir e formar cursos d'água, que continuam fluindo até encontrar riachos, que formaram rios, de porte cada vez maior, até atingir um oceano ou lago (PAIVA et al., 2010).

O escoamento subterrâneo ocorre quando a porção de água infiltrada percola até os aquíferos subterrâneos (zona de saturação), escoando de forma bastante lenta. Quando o escoamento da água infiltrada ocorre na zona de aeração do solo (camada insaturada) até surgir como escoamento superficial, é chamado de escoamento de base. O escoamento de base mantém a vazão de base dos rios nos períodos de estiagens (PAIVA et al., 2010).

Parte da água armazenada no solo será consumida pela vegetação, voltando, em seguida, à atmosfera (no estado gasoso) pelas folhas das plantas em um processo conhecido como transpiração. Já o fenômeno da evaporação se inicia antes mesmo da precipitação atingir o solo, atuando na água que foi interceptada pela vegetação. A evaporação ainda ocorre diretamente no solo desprovido de vegetação, nos lagos, rios, oceanos e outros corpos hídricos (PAIVA et al., 2010). O conjunto da evaporação e da transpiração recebe o nome de evapotranspiração.

O processo de evapotranspiração devolve a água, que foi precipitada, à atmosfera (em estado gasoso), completando o ciclo hidrológico, e disponibilizando-a para ser precipitada novamente.

2.2 Escoamento Superficial

Dentre os componentes do ciclo da água, citados anteriormente, um dos mais importantes, e objeto da maioria dos estudos hidrológicos, é o escoamento superficial. O conhecimento dos processos relacionados a essa importante variável hidrológica,

possibilita o planejamento da utilização das águas superficiais para diversas finalidades, como: construção de reservatórios, hidrelétricas, entre outras, além do escoamento superficial ser um dos principais processos que ocasionam a erosão dos solos.

Segundo Figueiredo (1998), existe dois tipos de mecanismos geradores de escoamento: a) fluxo superficial devido ao excesso de precipitação, também conhecido como Hortoniano; b) fluxo superficial devido ao excesso de saturação.

O primeiro caso ocorre normalmente em regiões áridas e semiáridas, em que de acordo com Aragão (2000), o escoamento acontece devido ao excesso de precipitação sobre a infiltração, desde a superfície até as camadas inferiores. O segundo caso ocorre normalmente em regiões úmidas, em que o principal mecanismo de geração de escoamento ocorre devido à elevação do lençol subterrâneo. Esse se diferencia do fluxo Hortoniano, pelo fato que neste mecanismo, a saturação do solo ocorre das camadas inferiores para a superfície, e no fluxo Hortoniano, ocorre de modo inverso (CHOW et al., 1988).

Diversas são as formulações que buscam quantificar o escoamento superficial em bacias hidrográficas. Rawls et al. (1993) destacam três modelos principais: modelos empíricos de infiltração, modelos empíricos de excesso de chuva e modelos de infiltração com aproximação física. O modelo de Horton (1933) lida com a capacidade de infiltração, de modo que o volume de água que não infiltra torna-se disponível para o escoamento superficial. Enquanto que o modelo de Curva Número (CN) (SCS, 1972) trabalha com a capacidade de armazenamento e redução de parte da precipitação a partir da chamada abstração inicial. O modelo de infiltração com aproximação física que se destaca é o de Green e Ampt (1911), que assume que o perfil do solo é homogêneo e que a distribuição de umidade ocorre de maneira uniforme, de modo que proporciona uma frente saturada bem definida que se propaga para baixo, no solo devidamente seco (CARVALHO NETO, 2011).

Fatores como tipo de vegetação e solo, condições topográficas, uso e ocupação do solo, são fatores que determinam a relação entre a vazão e a precipitação. Quando a bacia hidrográfica é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento superficial sofre a interferência dessa cobertura e grande parte dele se infiltra. Já em bacias urbanas, o escoamento superficial é regido pela interferência do homem através de superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais (PAIVA et al., 2010).

Paiva et al. (2010) ainda alertam que alterações ocorridas no uso e ocupação do solo acarretam em mudanças nas características do escoamento superficial. A derrubada da vegetação nativa para o desenvolvimento da agricultura, pecuária e expansão das cidades, aumenta a superfície de solo exposto e impermeável, diminuindo com isso, o potencial de infiltração do solo e recarga dos aquíferos subterrâneos, potencializando, conseqüentemente, o escoamento superficial (tanto em termos de volume, quanto velocidade), a ocorrência de enchentes e a erosão dos solos.

2.3 Processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas

O conceito de bacia hidrográfica, tal como é usado hoje, vem sendo ampliado para abarcar mais do que apenas aspectos hidrológicos, envolvendo conhecimentos tanto da estrutura biofísica da bacia quanto das mudanças nos padrões de uso da terra e suas implicações ambientais (PIRES, SANTOS e DEL PRETTE, 2002).

Com o desenvolvimento da civilização e constante crescimento populacional, a disputa pelo controle e utilização dos recursos de água tem se propagado e tornado cada vez maior. As águas superficiais das bacias hidrográficas, atualmente gerenciadas pelos comitês de bacias hidrográficas, são destinadas prioritariamente às necessidades de consumo humano e seu potencial ecológico, ou mesmo importância ambiental, foram renegados a um papel secundário.

Neste sentido, estudos sobre suas características naturais e dos processos que estão relacionados ao comportamento hídrico de bacias hidrográficas tornam-se indispensáveis para a gestão destas áreas (PEREIRA, 2013) uma vez que alteração nas áreas de bacia hidrográfica ocasionadas pela ação antrópica resultam em transformações do ciclo hidrológico, em geral, aumentando os processos erosivos responsáveis pelo desgaste de rochas e solos (CARVALHO, 2014).

A interação entre processos hidrológicos e sedimentológicos resulta no chamado ciclo hidrossedimentológico, responsável pela remoção, transporte e deposição de sedimentos originados de processos erosivos que ocorrem no solo por diferentes formas de ação (BRANCO, 1998).

Carvalho (2008) define sedimentos como sendo partículas de rocha ou de materiais biológicos desprendidos por ação de agentes físicos ou químicos que é transportada pela água ou vento até rios ou outros locais de deposição.

No Brasil, o agente erosivo mais frequente é a água, especialmente devido ao clima tropical que favorece a ocorrência de eventos chuvosos. A ação das chuvas sobre um estrado mineral é denominada "erosão hídrica" e pode ser classificada em dois tipos principais, segundo Arroio Junior (2013): erosão pluvial (resultante da ação das chuvas) e erosão fluvial (representado pela erosão nas margens dos rios).

A erosão pluvial está diretamente relacionada com a intensidade da precipitação em um determinado local em certo período de tempo e tem início com o impacto das gotas de chuva no solo (efeito *splash*), a continuidade do evento chuvoso satura o solo diminuindo o *splash* e aumentando o escoamento superficial, ou *runoff*.

O fluxo hídrico não concentrado remove uma fina camada do solo, causando a chamada erosão laminar que remove poucos milímetros do solo a cada evento chuvoso. Em geral, esse tipo de erosão pode durar anos até que evidências de sua ocorrência sejam percebidas, o que ocorre quando fragmentos de rochas ou mesmo raízes são expostas em locais onde antes costumavam ficar recobertas por solo (ARROIO JUNIOR, 2013).

Um segundo tipo de erosão pluvial é a erosão linear, caracterizada pela concentração do fluxo hídrico no arraste de partículas do solo que pode evoluir em três tipos diferentes de processos erosivos: sulcos, ravinas ou voçorocas.

Os sulcos são representados por pequenas incisões na superfície, perpendiculares às curvas de nível e que dificilmente ultrapassam cinquenta centímetros de profundidade, ocorrem em áreas onde a erosão laminar é mais intensa (GUERRA, 1999). As ravinas, por sua vez, apresentam profundidades superiores a 0,5 metros e ocorrem quando o fluxo de água é mais concentrado escavando o solo atingindo seus horizontes mais inferiores.

A forma mais complexa e destrutiva de erosão linear são as voçorocas, resultantes da ação combinada do escoamento superficial e subterrâneo. Em superfície, o fluxo de água age criando as voçorocas, em sub-superfície ele irá desenvolvendo processos de *pipping* (erosão interna), que abrem canais ou "tubos" vazios no interior do solo provocando colapsos e escorregamentos no terreno, conseqüentemente, alargando as voçorocas.

A erosão fluvial é causada pelas águas dos rios e compreende três fases: desgaste, transporte e deposição de sedimentos. O desgaste é dominante nas regiões que envolvem o curso superior do rio onde há uma maior declividade do terreno e a água

corre com maior velocidade, nessa fase o desgaste ocorre mais em profundidade do que em largura e o fundo do rio é escavado.

O transporte de materiais ao longo do rio depende do tamanho das partículas erodidas, quando muito pequenas (silte e argila) serão carregadas em suspensão ou dissolvidas nas águas do rio; quando são muito pesadas ou grandes (areia, cascalho ou fragmentos de rochas) para ser levado em suspensão, o transporte é feito por saltação ou arraste. A última fase compreende a deposição dos sedimentos carregados, em geral ocorre quando o rio começa a perder energia devido a fatores como diminuição da precipitação, aumento da evaporação, assoreamento do leito ou diminuição da topografia (CAMPOS e FREITAS, 2007). Assim, a erosão fluvial está diretamente relacionada com a produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas.

2.3.1. Produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas

A produção de sedimentos é o resultado da erosão e transporte de material erodido por uma determinada seção de medição da bacia hidrográfica durante um período de tempo, geralmente expressa em t/km²/ano. Por ser resultante de processos erosivos e de transporte, a produção de sedimentos depende de todas as variáveis que influenciam tanto a erosão (topografia, cobertura vegetal, clima) quanto o transporte de sedimentos (morfologia da bacia e uso do solo) (VERSTRAETEN e POESEN, 2001).

Taveira (2012) explica que nas porções mais altas da bacia, onde a topografia é mais expressiva a erosão e transporte de sedimentos é maior uma vez que as características morfológicas geram maiores velocidades de escoamento. Ao atingir a porção média da bacia, com a diminuição das declividades e da intensidade das chuvas, a produção de sedimentos decresce até que o material erodido passa a ser distribuído pelo terreno na parte baixa da bacia formando os depósitos sedimentares. Em suma, nas regiões mais altas predomina a degradação do solo e, nas porções mais baixas, há maior deposição de sedimentos (CARVALHO, 2014).

Vale ressaltar que nem todo sedimento produzido em uma bacia chega ao exutório sendo depositado ao longo dos cursos de água. De acordo com Uzeika (2009), isso ocorre devido às diferentes características das partículas erodidas que podem variar de forma, tamanho e peso, sendo submetidas a diferentes formas de transporte de acordo com as condições do local e de escoamento.

As partículas retiradas dos leitos do rio que possuem maior densidade e granulometria são transportadas por arraste ou saltação, ambas caracterizadas pelo movimento longitudinal ao longo do curso de água. No arraste as partículas estão em contato constante com o leito do rio, já na saltação, devido à correnteza ou ao impacto com outras partículas, os sedimentos "saltam" para dentro do escoamento e retornam à superfície do leito (ARROIO JUNIOR, 2013; BRANCO, 1998).

As partículas mais finas como silte e argila, provenientes do escoamento superficial nas áreas de contribuição da bacia são conhecidos como carga de lavagem ou *wash-load* e transportados ao longo do rio em suspensão. Branco (1998) afirma que esse tipo de sedimento é mantido em suspensão devido às forças de sustentação da turbulência do rio e movem-se aproximadamente na mesma velocidade da corrente.

2.3.2. *Influência do uso e ocupação do solo na produção de sedimentos*

O uso intensivo dos recursos naturais aliado às características físicas de uma determinada área pode ser considerado um agravante dos processos erosivos alterando severamente a paisagem e as características naturais de escoamento e produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Em geral, mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo relacionam-se às necessidades econômicas locais causando impactos ambientais graves em benefício do desenvolvimento social não sustentável. As águas superficiais das bacias hidrográficas, atualmente gerenciadas pelos comitês de bacias hidrográficas, são destinadas prioritariamente ao consumo humano, a indústria e a agricultura sem que seja delegada a devida importância ao seu potencial ecológico e ambiental.

O contexto da ocupação humana em áreas de bacia resulta, quase sempre, em expressivo desmatamento e urbanização. Por sua vez, a retirada da cobertura vegetal - que atua como proteção natural do solo - potencializa o escoamento superficial ao mesmo tempo em que diminui a capacidade de infiltração e retenção de umidade do solo.

Diante disso, a necessidade de gerir de forma sistêmica essas áreas torna-se cada vez mais latente visando à preservação do meio ambiente especialmente em regiões onde ocorrem constantes intervenções humanas responsáveis pelo aumento no grau de complexidade nas inter-relações de fatores de forma e processos hidrológicos que, somados, constituem e caracterizam uma bacia hidrográfica.

No sentido de estudar os processos hidrológicos em escala de bacia, modelos de simulação hidrológica vêm sendo cada vez mais utilizados para auxiliar no monitoramento das variáveis do ciclo hidrológico e gestão do uso de bacias hidrográficas.

2.4 Modelos hidrológicos

Na natureza, a água está em constante movimento: dos rios, lagos e oceanos ela evapora condensa-se e forma nuvens, volta para a superfície em forma de chuva, granizo ou neve, onde pode se infiltrar no solo passando pelos poros entre os fragmentos de rochas para ser absorvida por raízes de plantas ou por outros seres vivos, voltar à atmosfera através da evapotranspiração, acumular-se em zonas mais profundas – preenchendo os poros e formando depósitos subterrâneos de água ou retornar para outros corpos hídricos superficiais.

Esse movimento contínuo da água recebe o nome de ciclo hidrológico. Ele acontece sem cessar pelas mudanças de estados físicos da água, movido por fatores como energia solar, responsável pela evaporação; força gravitacional, que influencia os fenômenos de precipitação, infiltração e deslocamento das águas; e a rotação terrestre, da qual resultam as massas de ar que transportam o vapor de água.

Tundisi (2003) previu que o aumento e diversificação da economia impactaria diretamente o ciclo hidrológico que poderia passar a ser considerado como ciclo hidrosocial, resultante dos diversos impactos sofridos e das adaptações sociais às novas condições de escassez hídrica, especialmente em regiões áridas e semiáridas que apresentam elevada variabilidade anual na oferta de água.

De fato, nos últimos anos houve um aumento significativo no volume de água utilizado, principalmente, para fins industriais e de irrigação, segundo dados da ANA (2015) essas atividades correspondem hoje a 72% do consumo de água no Brasil.

As novas demandas de água e seus respectivos impactos quali-quantitativos estimularam à busca tanto por novas formas de gerenciamento integrado de recursos hídricos quanto por ferramentas que aperfeiçoassem o processo de gestão, resultando na utilização de novas tecnologias que promovessem avanços substanciais no monitoramento e organização das áreas com significativo interesse hídrico (TUNDISI, 2003).

No sentido de estudar processos hidrológicos em escala de bacia, esse suporte tecnológico se traduz na utilização de modelos hidrológicos que auxiliam o monitoramento das variáveis do ciclo hidrológico e gestão do uso de bacias hidrográficas. Modelagem hidrológica nada mais é do que a representação dos processos naturais por meio de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros específicos para cada tipo de modelo.

2.4.1. Classificação dos Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos podem ser considerados como abstrações ou simplificações da realidade a partir da observação de dados concretos. São ferramentas extremamente úteis que permitem entender, simular e projetar o comportamento de bacias hidrográficas a partir da equacionalização dos processos que a envolvem (TUCCI, 1998).

Um mesmo processo pode ser representado de maneiras diferentes de acordo com o tipo de modelo utilizado, suas variáveis e parâmetros. Nesse caso não existe um modelo que seja melhor do que outro, mas sim aquele que melhor descreve determinado fenômeno (RENNÓ e SOARES, 2003).

Autores como Tucci (1998) e Collischonn (2001), classificam os modelos, de acordo com suas características, quanto:

Ao tipo de variável utilizada na modelagem em modelos estocástico e determinístico: chama-se modelo estocástico aquele em que pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório ou quando a série simulada pode ser gerada sinteticamente. Por outro lado, se a série simulada for uma sequência de anos históricos ou caso sejam negligenciados os conceitos de probabilidade, o modelo é dito determinístico.

Ao tipo de relação entre essas variáveis em modelos conceituais e empíricos: um modelo conceitual "envolve todo o levantamento e interpretação de dados e observação do sistema real" (MACHADO, 2002), são baseados em representações dos processos físicos do fenômeno estudado enquanto os processos empíricos não apresentam nenhuma relação com estes e utilizam funções de análises estatísticas.

Ao tipo de representação dos dados em modelos concentrados (ou agregados) e distribuídos: nos modelos concentrados a principal variável é o tempo, por este motivo a bacia hidrográfica é considerada como um único elemento não sendo, portanto, considerada a variação espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no estudo. Nos modelos distribuídos, a bacia hidrográfica é subdividida em elementos menores (quadrículas ou sub-bacias), permitindo que a variabilidade espacial das características físicas da bacia seja representada.

A existência ou não de relações espaciais em modelos estacionários e dinâmicos: os modelos podem ser estacionários, onde descrevem os fenômenos em determinado momento, os parâmetros não variam com o tempo. Já nos modelos dinâmicos, os parâmetros podem variar no tempo, sendo, portanto, as variáveis em função do tempo.

A existência de dependência temporal em modelos discreto (por evento) e contínuo: quando o modelo simula alguma parte específica do ciclo hidrológico ou períodos isolados da série de dados é denominado modelo discreto ou por evento. Os modelos contínuos, em contra partida, simulam o ciclo hidrológico completo ou longos períodos da série, sendo, portanto mais bem estruturados e detalhados.

Dentre os modelos hidrológicos existem aqueles capazes de representar processos sedimentológicos através equações matemáticas que reproduzem os efeitos de agentes ambientais como clima, solo, topografia e uso do solo, são os chamados *modelos hidrossedimentológicos*, cuja principal ferramenta tem sido a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1961 (TAVEIRA, 2012).

Apesar de superestimar a produção e sedimentos, uma vez que fornece a erosão bruta, ou seja, a erosão no solo ou o sedimento disponível para ser transportado em suspensão pelo escoamento superficial, é um dos modelos de maior aplicabilidade devido, dentre outros fatores, a simplicidade dos parâmetros e facilidade de implementação (BELLINASSO, 2005; PEREIRA, 2013).

Em 1965 e 1971, a USLE sofreu revisões e modificações dando origem a outras duas equações: a primeira RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), difere-se da original ao fazer uso de novos algoritmos para calcular o comprimento da

vertente e declividade (LS), além de considerar a sazonalidade das chuvas anuais o que permite considerar a variabilidade do fator de erodibilidade para o período simulado.

Já a segunda alteração resultou na MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) que substitui o fator de erosividade das chuvas por um fator de escoamento superficial, permitindo estimar a produção de sedimentos no exutório em decorrência de um evento chuvoso (ARROIO JUNIOR, 2013). A partir da USLE, vários modelos de previsão de erosão foram desenvolvidos (Tabela 1):

Tabela 1 – Modelos de perda de solo e produção de sedimentos.

Modelo	Aplicação	Referência
WESP <i>Watershed Erosion Simulation Program</i>	Escoamento superficial, taxa de pico, erosão e produção de sedimentos.	Lopes e Lane (1987)
AGNPS <i>Agricultural Non-point Source Pollution Model</i>	Escoamento superficial, taxa de pico, erosão e produção de sedimentos.	Young et al. (1995)
KINEROS <i>Kinematic Erosion Model</i>	Escoamento superficial, taxa de pico, erosão e produção de sedimentos.	Woolhiser et al. (1990)
WEPP <i>Water Erosion Prediction Project</i>	Escoamento superficial, erosão e produção de sedimentos.	Flanagan e Nearing (1995)
SWAT <i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Escoamento superficial, taxa de pico, erosão e produção de sedimentos.	Arnold et al. (1998)
LISEM <i>Limburg Soil Erosion Model</i>	Escoamento superficial e produção de sedimentos.	De Roo e Jetten (1999)

Fonte: Adaptado de Arroio Junior (2013).

O WESP é um modelo de base física, distribuído e contínuo aplicado, em geral, para pequenas bacias. Ele é capaz de prever mudanças de topografia, superfície de rugosidade, propriedades do solo e a geometria dos canais de fluxo. Nele, o fluxo superficial é considerado variado e unidimensional, cada plano é representado por valores médios do comprimento, largura, inclinação e rugosidade, representando o fluxo por cada zona do solo.

Outros dois modelos elaborados para aplicação em pequenas bacias são o LISEM e o AGNPS. O primeiro é de base física, distribuído e pode ser aplicado para simulações de erosão, transporte e deposição de sedimentos durante e imediatamente após um evento chuvoso. Por sua vez, o AGNPS é um modelo conceitual desenvolvido para avaliar práticas relacionadas ao manejo do solo pela agricultura, ele estima erosão,

produção de sedimentos e carga de nutrientes. O escoamento é dado através do método da curva-número e a produção de sedimentos a partir da MUSLE.

No modelo KINEROS, – modelo físico orientado a eventos, distribuído e não linear – são calculados componentes de erosão, transporte e deposição em pequenas bacias urbanas e rurais. A bacia é representada em planos e canais cujas equações diferenciais se orientam pelo método das diferenças finitas.

O modelo WEPP é de base física e contínuo, elaborado para ser aplicado a encostas e grandes bacias. Ele pode simular tanto eventos individuais quanto contínuos, além de ser capaz de estimar a erosão, deposição e outros processos relativos à erosão do solo (física do solo, crescimento das plantas, infiltração e hidráulica do escoamento).

O SWAT, por sua vez, é um modelo de base física, distribuído e contínuo desenvolvido para prever o efeito, a longo prazo, do manejo do solo sobre a qualidade da água, produção de sedimentos e carga de poluentes em bacias agrícolas de larga escala.

Existem ainda outros modelos de previsão de vazão e erosão com variados graus de complexidade que assemelham-se por estarem todos condicionados à existência de dados climáticos para modelagem de processos hidrossedimentológicos. Quase sempre, esses modelos requerem uma ampla quantidade de dados de entrada e séries temporais muito extensas, muitas vezes com registros diários de informações.

Visando otimizar o processamento, manipulação e visualização desses dados, além de distribuí-los espacialmente dentro das bacias hidrográficas de interesse, os Sistemas de Informações Geográficas vêm sendo aplicados em conjunto à modelos hidrológicos o que permite integrar diversos bancos de dados e georreferenciá-los, facilitando análises mais complexas através do cruzamento de dados tabulares e espaciais.

2.5 Aplicações do modelo SWAT

Dentre as aplicações do modelo SWAT, pode-se citar como exemplos os estudos de Machado e Vettorazzi (2003), Baldissera (2005), Jha et al. (2006), Wang et al. (2008), Ficklin et al. (2009), Silva et al. (2013), Tibebe e Bewket (2011), Lelis et al. (2011), Carvalho Neto et al. (2011), Betrie et al. (2011), Durães et al. (2011), Lelis et al. (2012), Fukunaga (2012), Getechew et al. (2012), Andrade et al. (2013), Aragão et al.

(2013), Lubini e Adamowski (2013), Castro (2013), Ferrigo (2014), Ferrigo et al. (2014), e Melo Neto et al. (2014).

Os estudos de Baldissera (2005), Fukunaga (2012), Andrade *et al.* (2013), Castro (2013) e Melo Neto *et al.* (2014), analisaram a eficiência do modelo SWAT em simular os processos hidrológicos em diferentes bacias hidrográficas, utilizando como referência para análise, a verificação da vazão.

Baldissera (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para simulação de vazões líquidas mensais da Bacia do Rio Cuiabá – MT, que possui uma área de aproximadamente 900.000 km². Para tanto o modelo foi calibrado, com base em dados observados de cinco postos fluviométricos, e avaliado com base no coeficiente de NSE, R² e desvio de regressão, para o período de 05/1994 a 01/1998.

Após a calibração, foram obtidos valores médios de NSE de 0,71, R² de 0,75 e desvio de -8,84%. Demonstrando uma aplicabilidade satisfatória para as condições heterogêneas da região de análise e o potencial do SWAT para modelagens de grandes bacias. O estudo de Baldissera (2005) foi o primeiro a ser realizado no Brasil, com o modelo SWAT, para modelagem de vazão em uma bacia de grande escala.

Melo Neto et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na estimativa da vazão em duas bacias hidrográficas com escalas espaciais distintas. O modelo foi aplicado à bacia do Ribeirão Jaguará e na bacia do Ribeirão Marcela, para uma série histórica de quatro anos (2006–2010). Para avaliar a precisão do modelo na simulação da vazão, foi adotado o coeficiente de NSE como referência. De acordo com os resultados apresentados, o modelo SWAT simulou de modo satisfatório o escoamento para a Bacia do Ribeirão Jaguará, apresentando coeficiente de NSE entre 0,58 e 0,71 na fase de calibração e de 0,46 na fase de validação. Em contrapartida, na microescala o modelo obteve desempenho inadequado com valores dos índices estatísticos abaixo dos limites recomendados na literatura (NSE de entre 0,25 e 0,53 na fase de calibração, e -1,37 na validação).

Os modelos distribuídos são capazes de simular, sequencialmente, processos dentro do sistema físico em um intervalo determinado pelo usuário, podendo ser desde simulações diárias até longos períodos temporais, o que permite computar efeitos cumulativos das variações no uso e ocupação do solo no tempo estimado (ARROIO JUNIOR, 2013).

Uma das principais características dos modelos distribuídos em geral e, particularmente do modelo SWAT, é a divisão da bacia em subunidades. Esse processo é feito em duas etapas de acordo com Bouraoui et al. (2005): a partir dos dados topográficos a bacia é dividida em sub-bacias que em seguida são classificadas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH) a partir da combinação entre o tipo de solo, cobertura da área e topografia permitindo, assim, o aumento da precisão dos cenários previstos além de fornecer melhor descrição física do balanço hídrico na bacia (ARNOLD et al., 1998).

De acordo com Neitsch et al. (2005), as simulações hidrológicas dentro do SWAT podem ser classificadas em duas fases, ou etapas: a primeira diz respeito à fase terrestre do ciclo hidrológico, neste caso a erosão e transporte de sedimentos e a segunda corresponde aos movimentos de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas, ou seja, ao escoamento superficial através da bacia até seu exutório.

Para Carvalho Neto (2011), o SWAT não é um simples modelo, mas um conjunto de vários outros pré-existentes aprimorados e utilizados para simulação de cada uma das etapas do processo. Neste sentido, os parâmetros de entrada no modelo SWAT relacionam-se com as características físicas da bacia estudada, segundo Baldissera (2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação científica depende de um conjunto de procedimentos intelectuais técnicos para que seus objetivos sejam atingidos. Estes procedimentos têm como objetivo facilitar a construção do raciocínio lógico permitindo que o desenvolvimento do trabalho aconteça de forma melhor estruturada. A realização desta pesquisa foi baseada nas seguintes etapas metodológicas:

Coleta de dados observados de chuva e vazão: para calibragem e validação do modelo escolhido foi preciso coletar dados de séries temporais de chuva e vazão. Os dados correspondem ao período de 1939 a 2012 e foram obtidos no site Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Já as informações sobre precipitação vão desde 1978 a 2007 conseguidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA). Entretanto, levando em consideração que os dados de chuva e vazão devem ser correspondentes em anos, será utilizada a série temporal de 1978 a 2007 para todos os dados totalizando 30 anos.

Escolha do modelo: levando em consideração suas especificidades, nesta pesquisa foi escolhido o modelo SWAT para modelagem hidrossedimentológica da sub-bacia uma vez que este mostrou-se bastante eficaz em análises de impactos decorrentes de alterações de uso do solo, produção de sedimentos e previsão de cenários futuros;

Analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e da vazão: utilizando técnicas de geoestatística e de tendência como os testes de Sen e Mann-Kendall.

Obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE): o MDE, utilizado para facilitar a discretização da sub-bacia, foi obtido junto ao Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) correspondendo a um conjunto de oito imagens que englobam a área total em estudo.

Elaboração dos mapas de uso do solo e tipos de solo: dentre os dados de entrada pedidos pelo modelo SWAT estão os mapas de uso e tipos de solo elaborados a partir de imagens LANDSAT TM 5 de 2011, e do Mapa de Solos de Minas Gerais, respectivamente disponibilizados através dos *sites* do Instituto Nacional de Pesquisa espacial e Universidade Federal de Viçosa (MG).

Discretização da sub-bacia em planos individuais e geração das Unidades de Resposta Hidrológica (URH): tendo em mãos o MDE, mapa de uso e tipos de solo, passa-se a ao início da modelagem dividindo a bacia em outras unidades menores (sub-

bacias) menores que em seguida são processadas de acordo com características semelhantes de uso e tipo de solo resultando nas URH.

Calibração e validação do modelo: após discretização da bacia, será feita a calibração e validação do modelo em fase antecedente aos processos de simulação e previsão hidrossedimentológica. A calibração será feita com dados de precipitação diária e mensal para os 15 primeiros anos de dados (1978 a 1998) e a validação com os demais anos (1999 a 2007).

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) está localizada entre as latitudes 7°00' e 21°00' S e longitudes 35°00' e 47°40' W e possui uma área total de 639.219 km², que corresponde a cerca de 8% do território nacional. Ao todo, a bacia abrange 503 municípios e sete unidades da federação: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Sergipe, Goiás e Distrito Federal.

Devido a sua extensão, a BHRSF foi dividida em quatro regiões: Alto Rio São Francisco, da nascente na Serra da Canastra (MG) até a cidade de Pirapora (MG); Médio São Francisco, de Pirapora (MG) até Remanso (BA); Sub-médio São Francisco, de Remanso (BA) até Paulo Afonso (BA) e Baixo São Francisco, de Paulo Afonso (BA) até sua foz entre os estados de Sergipe e Alagoas.

Apesar de estar localizada numa região semi-árida, a bacia do Alto Rio São Francisco possui um significativo potencial hídrico com uma vazão média de aproximadamente 2% do total do país. É formada por duas sub-bacias denominadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) como Sub-40 e Sub-41, sendo a primeira escolhida como objeto de estudo desta pesquisa (Figura 2).

A região hidrográfica denominada de Alto Rio São Francisco em Minas Gerais, refere-se a partir deste ponto à Sub-40 e compreende as nascentes dos rios São Francisco, Pará, Paraopeba, Indaiá e Borrachudo, além de seus afluentes até o reservatório de Três Marias e a bacia do rio Abaeté localizada a jusante do reservatório. Sua área de drenagem corresponde a 57.097km², aproximadamente, e representa 24% do total da bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais.

Sua formação geológica está representada em grande parte pelas rochas antigas do Pré-cambriano Indiviso e, em menor porção, pelas rochas calcárias do Grupo

BambuÍ. A altimetria da área varia em torno de 1.600 a 600 m em relação ao nível do mar e os principais acidentes topográficos encontrados são as Serras da Canastra (aproximadamente 1.200 m de altitude) e do Espinhaço (aproximadamente 1.300 m de altitude).

Figura 2 – Mapa de localização da bacia do Alto Rio São Francisco.



Quanto a sua formação sedimentar, está inserida unicamente sobre a Bacia Sedimentar Sanfranciscana que apresenta-se alongada na direção norte-sul cujo

paralelismo em relação ao aulacógeno¹ do Recôncavo-Tucano-Jatobá sugere tratar-se de rifte² relacionado à evolução da margem continental brasileira, segundo Campos e Dardenne (1997).

São encontradas quatro seis classes de solo na área, a saber: Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Cambissolo Háptico (CX), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Litólico (RL). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), suas características principais são descritas como:

- **Argissolo vermelho:** possui cor vermelha acentuada devido ao alto teor de óxidos férricos presentes; apresenta fertilidade natural muito variável devido à diversidade de materiais de origem; o teor de argila no horizonte subsuperficial é bem maior do que no horizonte superficial; ocorrem geralmente em áreas de relevo ondulado, mas podem ser identificados em áreas menos declivosas; suas principais limitações são os declives nos terrenos mais acidentados e a deficiência de fertilidade.
- **Argissolo vermelho-amarelo:** apresenta horizonte de acumulação de argila, B textural, com cores vermelho-amareladas devido à presença da mistura dos óxidos de ferro hematita e goethia; apresentam principalmente textura média/argilosa com baixa/muito baixa fertilidade, com reação fortemente ácida e argilas de atividade baixas; ocorrem em maior proporção nas áreas sob floresta subcaducifólia e variação significativa do relevo.
- **Latossolo vermelho:** sua coloração é de origem semelhante à dos argissolos vermelhos; ocorrem principalmente em áreas de relevo plano a suavemente ondulados, sendo responsáveis por grande parte da produção de grãos na área; por serem profundos e porosos/muito porosos, apresentam condições adequadas a um bom desenvolvimento radicular em profundidade; em condições naturais apresentam baixos níveis de fósforo; as limitações identificadas dizem respeito à baixa quantidade de água disponível às plantas e a susceptibilidade de compactação.

¹ Depressão linear que se forma no interior de uma placa tectônica na ocasião de um processo de *rifting*.

² Estrutura de bacia tectônica originada por tectônica extensional sobre *hot spot*, margeada por falhas de gravidade desenvolvendo vale ou depressão extensa em continentes ou, em sua possível evolução, em oceanos.

- **Latosolos vermelho-amarelo:** são identificados em extensas áreas associados aos relevos do tipo plano, suave ondulado ou ondulado; ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito profundos e uniformes; são muito utilizados para agropecuária apresentando limitações de ordem química, em condições naturais também possui baixo teor de fósforo e suas limitações são semelhantes ao anterior.
- **Cambissolo háplico:** identificados normalmente em relevos fortemente ondulados ou montanhosos, que não apresentam horizonte superficial A húmico; são solos de fertilidade natural variável; apresentam como principal limitação para uso o relevo com declives acentuados, a pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa de solo.
- **Neossolos litólicos:** compreendem solos rasos, estando associados normalmente a relevos mais declivosos; as limitações de uso estão relacionadas a pouca profundidade, presença de rocha e aos declives acentuados.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima na região é do tipo Aw, descrito como tropical com estação seca no inverno. Apresentam-se, em geral, como megatérmicos, com temperaturas médias nos meses mais frios maiores que 18 graus, sem estação invernal, com precipitação anual média de 1.372 mm é maior que a evapotranspiração potencial que chega a 1.000 mm, em média (ANA, 2015). O trimestre mais chuvoso corresponde aos meses de novembro, dezembro e janeiro, concentrando 60% do total das chuvas, enquanto o período mais seco é de junho a agosto.

3.2 O modelo SWAT

A escolha do modelo SWAT para o desenvolvimento desse trabalho se deu em virtude do SWAT ser uma ferramenta básica para os estudos, em função de ter sido desenvolvido visando à verificação dos efeitos resultantes das modificações no uso e ocupação do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, bem como na produção de sedimentos (ARNOLD et al., 1998).

O modelo SWAT foi desenvolvido no início da década de 90 pelo *United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service* e *Texas A&M University*, com o objetivo de prever o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e carga de poluentes em bacias hidrográficas agrícolas (TAVEIRA, 2012). Segundo Kuwajima (2002), esse modelo é classificado como um modelo de base física distribuído, dinâmico e contínuo, rodado a partir do ambiente ArcView.

A interface ArcSWAT é uma extensão para ArcGIS-ArcView (ESRI – *Environmental Systems Research Institute*), empregado como ferramenta de pré e pós-processamento de dados na execução do modelo hidrológico SWAT.

A construção da base de dados foi direcionada seguindo as recomendações do referencial teórico do SWAT conforme publicado por Neitsch et al. (2009) e também os procedimentos de entrada e saída do modelo, conforme documentação tutorial e metodológica desenvolvida pelos criadores do SWAT com revisões e atualizações publicadas por Arnold et al. (2012). Foi utilizado o programa do SWAT Interface ArcGIS – ArcSWAT - versão 10.1, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA em parceria com a Texas A & M University - TAMU. Parte dos dados de entrada foram gerados pela própria interface ArcSWAT.

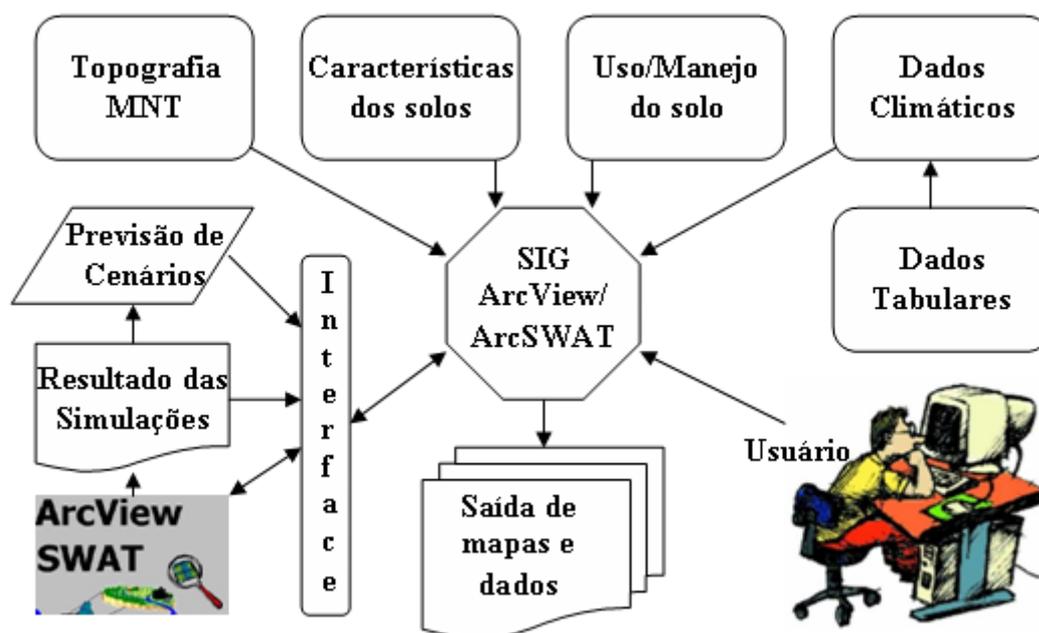
A inserção dos dados nos planos de informação (PIs – MNT, solos e uso da terra) e dos dados alfanuméricos foi realizado por intermédio da interface entre o SWAT e o SIG ArcView[®]. Essa interface possibilita a entrada de dados tabulares das propriedades de solo, uso e ocupação do solo e clima. Nesses casos são realizadas ligações com os respectivos mapas de solo, uso da terra e com a localização do posto meteorológico utilizado (NEITSCH et al., 2009). O SWAT possui cinco bancos de dados que foram alimentados e ou atualizados conforme necessidade de execução do trabalho, seguindo as recomendações para os input e output do modelo conforme metodologia SWAT publicada por (ARNOLD et al., 2012).

Entre as informações de entrada, a interface é capaz de armazenar dados geoespaciais, numéricos e de texto (OLIVERA et al., 2006). Dados geoespaciais referem-se aos arquivos do Modelo Numérico do Terreno (MNT), uso e ocupação do solo e tipo de solo. Enquanto que os dados numéricos e de texto caracterizam os dados espaciais, climáticos e hidrológicos.

A interface desenvolvida entre o SWAT e o ArcView, facilita a entrada de dados no modelo, além de possibilitar a subdivisão automática da bacia em sub-bacias com a utilização dos dados do MNT. Essa interface possibilita que os dados de saída sejam exibidos em forma de mapas, gráficos e tabelas do ArcView. Os procedimentos para gerar a base de dados estão expostos na Figura 3. Essa interface abastece um gerador de dados climáticos, tais como: velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar, esses dados servirão para o fornecimento de algumas variáveis em suas simulações.

Enquanto a ferramenta de pós-processamento a interface é capaz de proceder com uma organização estrutural dos resultados promovendo visualização objetiva com diversos arquivos de saída.

Figura 3 – Procedimentos para a geração da base de dados do SWAT.



É importante frisar que o modelo SWAT ainda na fase de pré-processamento de dados trabalha com a configuração da chamada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) contida nas sub-bacias. Essa interface é capaz de realizar as conversões dos dados geoespaciais de Uso e Tipo de Solo para o banco de dados, encontrando combinações únicas destes dois aspectos e obedecendo a intervalos de declividade definidos pelo usuário. É no âmbito da área de uma URH que o SWAT procede com suas simulações.

Nesta pesquisa os parâmetros utilizados estão divididos em hidrológicos, climáticos e de solo cada um deles ligados a rotinas específicas no simulador para modelagem hidrológica e à produção de sedimentos, de acordo com o descrito por Neitsch et al. (2005) no manual teórico do SWAT.

Como descrito anteriormente, os processos hidrossedimentológicos em uma bacia tem início com o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT em quatro volumes, sendo eles: reservatório superficial, reservatório subsuperficial, aquífero raso e aquífero profundo. Castro (2013) explica ainda que o modelo utiliza como base para as simulações do ciclo hidrológico, a Eq. 1, de balanço hídrico, apresentada abaixo:

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

Onde:

SW_t = conteúdo final de água no solo (mm);

SW_0 = conteúdo inicial de água no dia i (mm);

R_{day} = precipitação no dia i (mm);

Q_{surf} = escoamento superficial no dia i (mm);

E_a = evapotranspiração no dia i (mm);

w_{seep} = quantidade de água que entra na zona vadosa percolada através do perfil (mm);

Q_{gw} = quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento subsuperficial (fluxo de retorno) (mm).

A partir das variáveis contidas na Eq. 1 é possível determinar a variação da umidade de água no solo, salientando que os dados de precipitação são provenientes de monitoramentos climáticos e devem ser inseridos pelo próprio usuário de acordo com o período de interesse da pesquisa.

A evapotranspiração é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evaporação potencial. O modelo oferece três opções para a estimativa da evaporação potencial: Penman e Monteith, Hargreaves e Samani, Priestley e Taylor. Esse estudo foi realizado com o método de Penman e Monteith por apresentarem melhores resultados para a bacia.

No SWAT a componente percolação (Figura 4) usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinando com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez percolada abaixo da zona das raízes, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. Esse procedimento é apresentado pela Eq. 2, conforme tutorial do modelo apresentado por Neitsch et al. (2009).

$$SW_i = -SW_0 \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \quad (2)$$

Sendo:

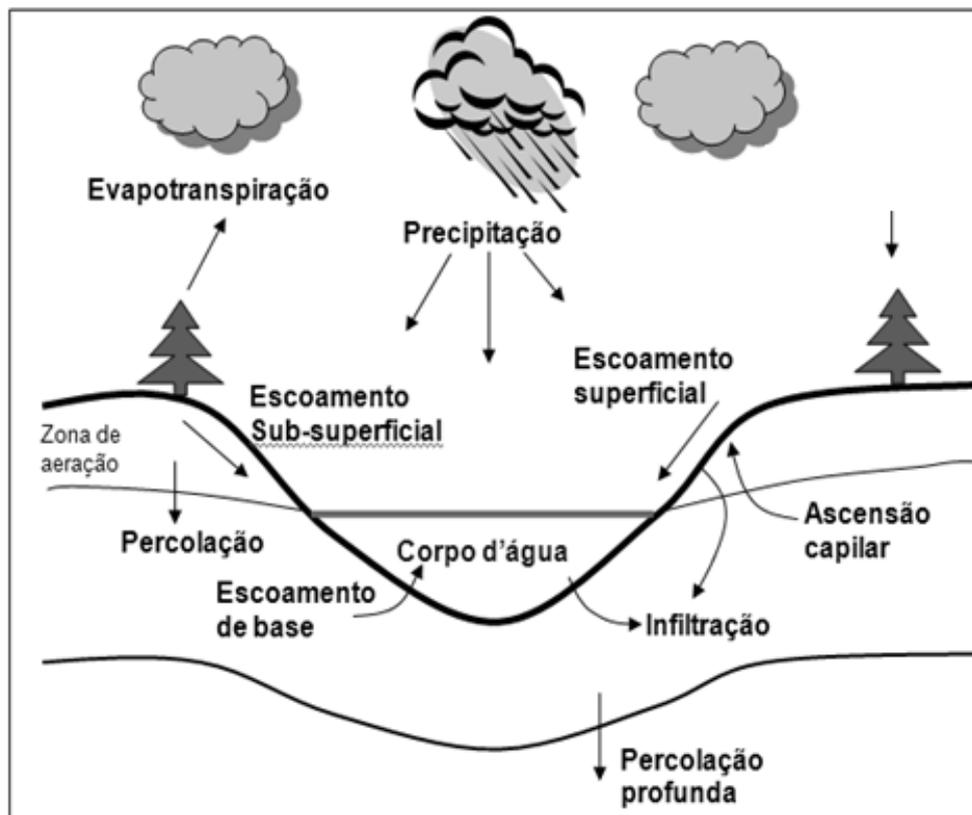
SW_i e SW_0 = A umidade do solo no começo e fim do dia (mm), respectivamente;

Δt = Ao intervalo de tempo (h);

TT = Ao tempo de propagação através da camada i em h;

i = Ao índice de identificação da camada do solo.

Figura 4 – Componentes de simulação hidrológica pelo SWAT.



Fonte: Adaptado de Uzeika (2009).

Assim, a percolação pode ser calculada pela relação mostrada na Eq. 3 (NEITSCH et al., 2009).

$$P_i = SW_{0i} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (3)$$

sendo P_i a percolação em mm/dia.

O tempo de propagação nas camadas de solo é calculado através da Eq. 4 (NEITSCH et al., 2009).

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{K_s} \quad (4)$$

Onde:

FC = A capacidade de campo, menos a lâmina de água do ponto de murcha para a camada i (mm);

K_s = A condutividade hidráulica do solo (mm/h).

O modelo analisa o dossel das plantas, pois elas afetam significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração (Figura 5). Com a queda da chuva, a interceptação do dossel reduz a energia erosiva das gotas e recolhe uma porção de precipitação dentro do dossel. A influência que o dossel exerce nesses processos é uma função da densidade da cobertura da planta e a morfologia das espécies de planta.

Ao calcular o escoamento superficial, o método do número de curva SCS agrupa a interceptação do dossel em termos de abstrações. A variável também inclui o armazenamento da superfície e infiltração antes do escoamento e é calculada como 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia.

Quando a equação de infiltração é usada para calcular o escoamento superficial e infiltração, a interceptação da precipitação pelo dossel deve ser calculada separadamente para uma melhor quantificação dos resultados.

O modelo SWAT permite calcular a quantidade máxima de água que pode ser mantida no armazenamento do dossel que pode variar de um dia para o outro como uma função de índice de área foliar conforme equação 5, extraída do referencial teórico do SWAT publicado por Neitsch et al. (2009).

$$\text{can}_{\text{day}} = \text{can}_{\text{max}} \times \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{mx}}} \quad (5)$$

Em que:

can_{day} = refere-se a quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro do dossel em um determinado dia (mmH₂O).

can_{mx} = é a quantidade de água que pode ficar retida dentro do dossel quando o mesmo encontra-se completamente desenvolvido (mmH₂O).

LAI = é o índice de área foliar para a planta.

Outro segmento do ciclo hidrológico quantificado pelo SWAT é o escoamento superficial, entendido como o deslocamento de água na superfície do solo e nos cursos naturais quando a intensidade da precipitação ultrapassa a capacidade de infiltração.

O escoamento superficial é influenciado diretamente por três fatores: climáticos (relacionados à precipitação), fisiográficos (que dizem respeito ao relevo da região) e ao uso e ocupação do solo. O SWAT quantifica a chuva que esco superficialmente em função destes fatores através do método da Curva Número (CN) desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS).

A equação para o cálculo do escoamento superficial é dada por:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0,2S)^2}{(R_{\text{day}} + 0,8S)} \quad (6)$$

Onde:

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial acumulado ou excesso de chuva (mm);

R_{day} = quantidade de chuva em um dia (mm);

S = parâmetro de retenção.

O parâmetro de retenção S está relacionado a capacidade de retenção máxima de água no solo e varia espacialmente em função do uso do solo, declividade do terreno e devido as variações das condições anteriores de umidade. Vale destacar que a umidade antecedente é obtida a partir de tabelas que relacionam o parâmetro CN a tipos de solos diversos agrupados de acordo com suas características de infiltração nos chamados grupos hidrológicos.

Esses grupos são definidos por solos que apresentam similaridades quanto à produção de escoamento superficial quando sujeitos as mesmas condições de precipitação e ocupação. São ao todo quatro categorias, classificadas pelo Serviço de Conservação dos Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS): A, B, C e D, onde o grupo A estaria em um extremo representando solos com elevada taxa de infiltração e pouco escoamento superficial, e o grupo D no outro, sinalizando solos que geram maior escoamento superficial devido a sua baixa capacidade de infiltração (NEITSCH et al. 2005).

A equação que determina o parâmetro S pode ser observada abaixo:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (7)$$

Onde: CN = número da curva para um determinado dia.

No SWAT, os valores de CN variam diariamente e de maneira não linear indo de 1 a 100, onde o limite inferior corresponde a uma cobertura de solo totalmente permeável e o limite superior a uma cobertura de solo totalmente impermeável onde toda a precipitação seria convertida em escoamento superficial.

Também são considerados três condicionantes de umidade antecedente do solo, responsáveis pela variação nos resultados de CN, estas diretamente ligadas à intensidade e duração das chuvas, precipitação total, condições de umidade do solo e densidade de cobertura, definidas, segundo Sartori (2004), como:

1ª Condição (CN1): quando os solos da bacia hidrográfica estão secos, mas não o suficiente para que as plantas murchem (período de murcha), em geral quando se cultiva o

solo;

2ª Condição (CN2): neste momento os solos estão com "umidade ideal" precedendo um período de cheia na bacia hidrográfica;

3ª Condição (CN3): quando os solos apresentam-se saturados ou quase saturados devido à ocorrência de precipitação intensa durante os cinco dias anteriores.

Os valores de CN para a 1ª e 3ª Condição são obtidos a partir das seguintes equações:

$$CN1 = CN2 - \frac{20(100 - CN2)}{(100 - CN2 + \exp[2.533 - 0,0636(100 - CN2)])} \quad (8)$$

$$CN3 = CN2 \cdot \exp[0,00673(100 - CN2)] \quad (9)$$

Após calculado o escoamento superficial, o SWAT utiliza a Eq. 6 para calcular o volume deste que atinge o canal principal:

$$Q_{sup} = (Q'_{sup} + Q_{arm,i-1}) \cdot [1 - \exp(-SURLAG/t_{conc})] \quad (10)$$

Onde:

Q_{sup} = quantidade de água que chega ao canal principal por escoamento superficial (mm);

Q'_{sup} = quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm);

$Q_{arm,i-1}$ = quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm);

SURLAG = coeficiente de atraso do escoamento superficial (hr), e

t_{conc} = tempo de concentração (hr).

Segundo Taveira (2012), o valor de SURLAG é responsável pela determinação da fração do total do volume de água que atinge o canal em um dia. Neste caso, quanto maior o valor de SURLAG, menos água será mantida armazenada e, portanto, maior será o montante final que chegará ao canal.

Outra equação relevante diz respeito àquela que calcula a vazão de pico na bacia. Entende-se como vazão de pico a máxima vazão que ocorre no canal devido a um evento chuvoso e, por ser considerado um indicador da força erosiva da chuva, é aplicada na determinação da perda de sedimentos através da Eq. 11:

$$q_{\text{pico}} = \frac{a_{\text{tc}} \times Q_{\text{sup}} \times A}{3,6t_{\text{conc}}} \quad (11)$$

sendo:

q_{pico} = vazão de pico (m^3/s);

a_{tc} = fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração;

Q_{sup} = volume do escoamento superficial (mm);

A = área da sub-bacia (km^2);

t_{conc} = tempo de concentração (hr).

Essa equação é conhecida como Equação do Método Racional Modificado que, de acordo com Neitsch et al. (2005) supõe que se uma chuva de intensidade i tem início num tempo zero e continua indefinidamente, a vazão de pico irá aumentar até o tempo de concentração quando todas as sub-bacias contribuirão para o fluxo de saída no exutório da bacia.

O tempo de concentração é definido como o tempo gasto para que a água precipitada no local mais distante da bacia chegue até seu exutório. É calculado pela soma do tempo de fluxo superficial e do tempo de fluxo no canal através da Eq. 12:

$$t_{\text{conc}} = t_{\text{cs}} + t_{\text{cc}} \quad (12)$$

Onde:

t_{cs} = tempo de concentração na superfície.

t_{cc} = tempo de concentração no curso d'água.

Quanto às equações que compõe a fase de terra do SWAT, pode-se dizer que a principal delas é a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (do inglês *Modified Universal Soil Loss Equation* ou MUSLE) responsável pela estimação da erosão do

solo. A MUSLE é aplicada na estimativa do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas e trata-se de uma modificação da Equação Universal de Perda de Solo, desenvolvida para estimar erosão média em vertentes. Seu equacionamento apresenta-se da seguinte forma:

$$\text{sed} = 1,18 \cdot (Q_{\text{sup}} \cdot q_{\text{pico}} \cdot \text{area}_{\text{URH}})^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot \text{LS} \cdot P \cdot \text{CFRG} \quad (13)$$

Onde:

Sed = produção de sedimentos após evento de precipitação no dia (ton);

Q_{sup} = escoamento superficial (mm);

q_{pico} = vazão de pico do escoamento (m³/s);

area_{URH} = área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha);

K = erodibilidade do solo;

C = fator de uso e manejo do solo;

LS = fator topográfico;

P = fator das práticas conservacionistas;

CFRG = fator de fragmentação esparsa.

Para que estas rotinas hidrológicas sejam executadas, o SWAT exige uma série de dados de entrada bastante detalhados, divididos em plano de informações (Modelo Digital de Elevação, Mapa de uso e ocupação do solo, Mapa de tipos de solo) e alfanuméricos (climatológicos, hidrológicos e parâmetros de solo).

Para que estas rotinas hidrológicas sejam executadas, o SWAT exige uma série de dados de entrada bastante detalhados, divididos em plano de informações (Modelo Digital de Elevação, Mapa de uso e ocupação do solo, mapa de tipos de solo) e alfanuméricos (climatológicos, hidrológicos e parâmetros de solo).

3.3 Construção da Base de Dados

3.3.1 Dados de chuva e vazão

Para a calibração e a validação do modelo escolhido foi preciso coletar dados de séries temporais de chuva e vazão obtidos nos sites da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), correspondendo ao período de 1978 a 2007, totalizando 30 anos. Ao todo foram doze postos de observação de precipitação e três postos de vazão que por estarem em região semiárida apresentaram um número significativo de falhas, dificultando a análise e utilização dos dados.

A fim de contornar este problema, os dados coletados foram corrigidos a partir dos métodos tradicionais de preenchimento de falhas e, posteriormente, submetidos a testes estatísticos para avaliar se os mesmos eram consistentes, assim diminuindo erros ou outras inexatidões nos resultados obtidos nas simulações.

3.3.2 Modelo Digital de Elevação

O MNT apresenta o relevo de forma real e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo dessa forma, a consistência hidrológica do processo de simulação.

Por meio desse modelo foi possível o levantamento da altitude em todos os pontos da bacia. A carta de declividade também foi obtida através do MNT, com resolução de detalhes suficientes para representação das características do terreno e da rede de drenagem, seguindo o referencial do modelo publicado por (NEITSCH et al., 2009).

Nesse trabalho, o MNT foi gerado com resolução espacial de 30 metros a partir de curvas de nível disponibilizadas pelo IBGE, escala 1:50000. A elaboração do MNT foi feita através do programa de geoprocessamento ArcGIS 10.2[®], e utilizando, aplicativos desenvolvidos pela ESRI.

A inclusão do MNT ao modelo SWAT foi gerada pelo ArcGIS com a rede de drenagem, a convergência do escoamento superficial e os pontos de saída de cursos d'água. A extensão dos cursos d'água foi calculada com base na rede hidrográfica que foi gerada pelo SWAT automaticamente, conforme descrito por (NEITSCH et al., 2009).

As simulações hidrológicas no SWAT têm início com o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia. Nesta pesquisa, o MDE utilizado foi obtido no site do Serviço Topográfico do Brasil (TOPODATA) e correspondeu a um conjunto de oito

cenar do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) tratadas para uma resolução espacial de 30m.

De acordo com Uzeika (2009), o refinamento das imagens TOPODATA permite que os resultados obtidos a partir da MUSLE, onde a precisão dos parâmetros topográficos é determinante para estimar a produção de sedimentos, sejam mais consistentes devido à resolução das células que compõe a matriz *raster* do MDE, isso ocorre porque o desempenho da modelagem será mais satisfatório quanto melhor for a representatividade geomorfológica.

O MDE Topodata, entretanto, não possui referência espacial quando inserido no ambiente ArcGIS, assim foi determinado a Projeção Universal Transversa de Mercator extrapolando para a área total da bacia a zona 23°S e DATUM WGS 1984 tanto para o MDE quanto para os demais dados utilizados.

Definidas as informações espaciais, as imagens foram inseridas em um novo banco de dados para então serem exportadas como mosaico em formato .tiff para aplicação no modelo. Das informações altimétricas contidas no MDE o SWAT permitiu gerar a rede de drenagem e determinar a direção de fluxo para cada pixel, além de delimitar a bacia e subdividi-la de acordo com as ramificações da rede hidrológica e da quantidade de pontos de confluência de rios, definidos tanto automaticamente quanto identificados pelo usuário.

Segundo Pruski (2009), a representação do sistema de drenagem e do seu grau de ramificações irá caracterizar a velocidade do escoamento e, portanto, da produção e transporte de sedimentos ao longo da bacia, sendo preciso extremo cuidado na execução desta etapa.

3.3.3 Mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi gerado a partir de duas etapas: classificação supervisionada de imagens de satélite LANDSAT disponibilizada por meio do site do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) e recorte da área no mapa de vegetação do Brasil este disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

As imagens LANDSAT foram inseridas no ambiente ArcGIS para definição das informações espaciais de DATUM, projeção e zona, sendo estas, respectivamente,

WGS 1984, Projeção Universal Transversa de Mercator e zona 23S extrapolada para toda extensão da bacia que, devido a sua área, encontra-se sob domínio das zonas 23S e 24S, sendo a primeira mais expressiva e, portanto, considerada como única.

Em seguida foram executados os procedimentos para classificação supervisionada da imagem com as bandas espectrais 1, 2, 3 e 4 onde foram definidas quais assinaturas espectrais correspondem a cada tipo de cobertura em seguida associando os pixels da imagem às classes definidas pelo usuário (área urbana, corpos hídricos, vegetação escassa, vegetação de grande porte e solo exposto).

Após realizada a coleta das amostras representativas de cada classe, procedeu-se com a classificação de Máxima Verossimilhança com limiar de aceitação de 99%, método no qual se considera que pixels pertencentes as mesmas classes irão apresentar respostas similares, resultando em uma nova imagem com todas as classes definidas anteriormente em toda a bacia.

A classe correspondente a área urbana foi extraída e convertida em polígonos em formato vetorial a fim de sobrepô-la ao mapa dos tipos de vegetação subsequentemente recortado, a partir do limite da Sub40, com as ferramentas de edição vetorial disponíveis no ArcGIS e resultando no mapa final de uso e ocupação.

Quanto ao mapa de tipos de solo, este foi elaborado a partir do recorte da área de estudo no mapa de solos do Brasil, fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), contudo, observou-se uma série de falhas e “vazios” entre os diferentes tipos de solo que compunham a bacia.

Assim, foi preciso preencher esses espaços através da ferramenta de edição de vértices do ArcGIS, ao final foram classificados seis grupos pedológicos para a bacia: Argissolo vermelho (PV), Argissolo vermelho-amarelo (PVA), Cambissolo háplico (CX), Latossolo vermelho (LV), Latossolo vermelho-amarelo (LVA), Neossolo lítólico (RL) (Tabela 2).

O conhecimento desses grupos permitiu que fosse gerado o banco de dados pedológico contendo informações específicas exigidas pelo modelo para a discretização da bacia em etapas subsequentes. Estes parâmetros de solo foram extraídos de trabalhos anteriores e são descritos na Tabela 2.

O grupo hidrológico diz respeito a classificação do *U.S. Natural Resource Conservation Service* onde os solos são classificados de em função do fator de

condutividade hidráulica em quatro grupos A, B, C e D onde, segundo Baldissera (2005):

- Corresponde a solos com alta taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada maior que 150mm/hr;
- Corresponde a solos com moderada taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada entre 5 e 150mm/h;
- Corresponde a solos com baixa taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5mm/h;
- Corresponde a solos com baixíssima taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada menor que 1mm/hr.

Tabela 2 – Parâmetros de solo no modelo SWAT.

Parâmetros	Descrição	Unidade
NLAYERS	Número de camadas do perfil	–
HYDGRP	Grupo hidrológico	–
SOL_ZMX	Profundidade máxima da raiz no solo	Mm
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo	–
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte	Mm
SOL_BD	Densidade aparente	g/cm ³
SOL_AWC	Capacidade de água disponível	mm/mm
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico no solo	%
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada	mm/h
CLAY	Porcentagem de argila	%
SILT	Porcentagem de silte	%
SAND	Porcentagem de areia	%
ROCK	Porcentagem de cascalho	%
SOL_ALB	Albedo do solo	–
USLE_K	Fator K da USLE	–

Quanto a profundidade máxima da raiz, considerou-se que estas se desenvolvem por toda a profundidade do solo, tal qual Arroio Junior (2013), devido à falta de dados para os parâmetros na área de estudo. O mesmo autor descreve a porosidade do solo como a relação entre o volume dos poros e o volume total do solo e pode ser calculado a partir da equação de densidade aparente.

O Fator K da Equação Universal de Perca de Solo, do inglês USLE, diz respeito a propensão de um determinado tipo de solo à erosão; já o albedo corresponde a

parcela de radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo e levando em consideração a cobertura vegetal (ARROIO JUNIOR, 2013). Os demais parâmetros são autoexplicativos em suas descrições.

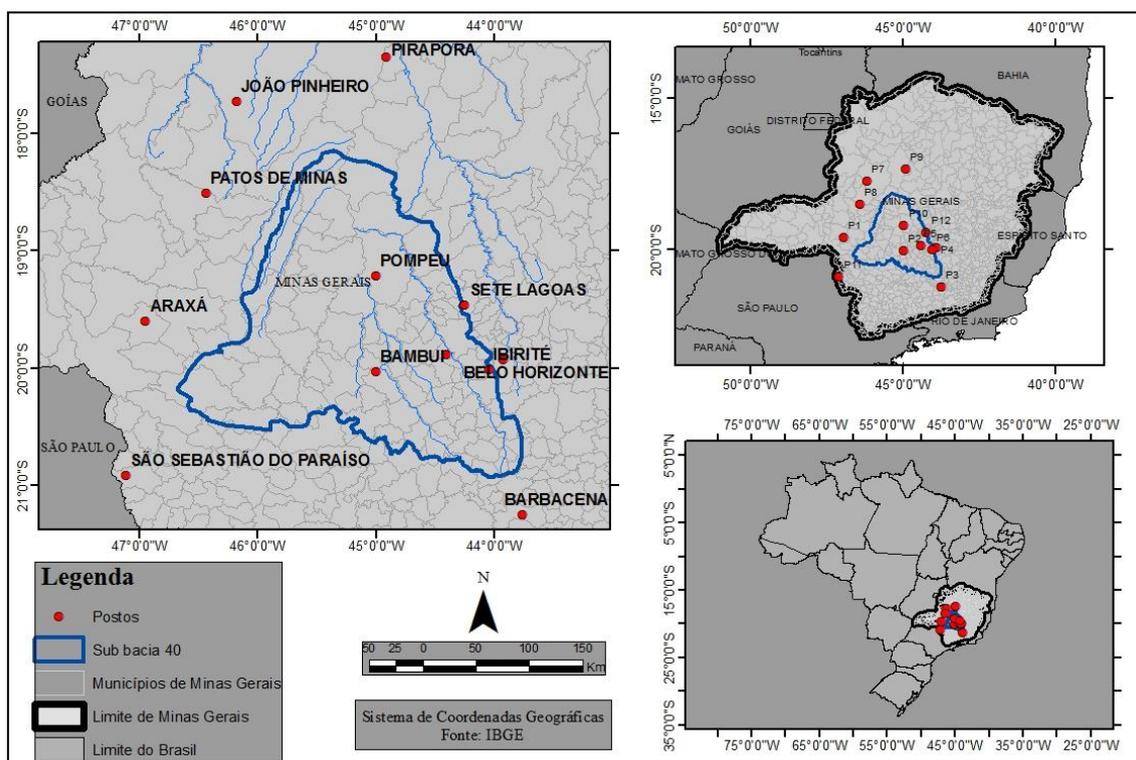
3.3.4 Dados de precipitação utilizados

O modelo SWAT exige dados de precipitação diária, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Na falta dos dados referentes à temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa o modelo gerou estes dados, utilizando o gerador climático WXGEN (SHARPLEY e WILLIAMS, 1990). Os dados diários de chuva foram obtidos através de 12 postos pluviométricos, descrito na Tabela 3 e Figura 5. O período de calibração foi de 1978 a 1998 e para a validação foi o período de 1999 a 2007.

Tabela 3 – Descrição dos postos pluviométricos utilizados neste estudo.

Posto	Código	Latitude	Longitude	Altura(m)	Período
Araxá	P1	-19,60	-46,94	1023	1916–2012
Bambuí	P2	-20,03	-45,00	661	1926–2012
Barbacena	P3	-21,25	-43,76	1126	1914–2012
Belo horizonte	P4	-19,93	-43,93	915	1910–2012
Florestal	P5	-19,88	-44,41	760	1960–2012
Ibirité	P6	-20,01	-44,05	814	1959–2012
João pinheiro	P7	-17,73	-46,17	760	1925–2012
Patos de Minas	P8	-18,51	-46,43	940	1947–2012
Pirapora	P9	-17,35	-44,91	505	1912–2012
Pompeu	P10	-19,21	-45,00	690	1972–2012
São Sebastião do Paraíso	P11	-20,91	-47,11	820	1945–2012
Sete Lagoas	P12	-19,46	-44,25	732	1926–2012

Figura 5 – Localização geográfica dos postos pluviométricos utilizados neste estudo.



3.4 Discretização da bacia e determinação das Unidades de Resposta Hidrológica

O SWAT possibilita a partição da bacia hidrográfica em unidades de resposta hidrológica (URHs) embasadas no cruzamento de dados como usos e cobertura do solo, tipos de solo e declividade. Nessa etapa, foi realizado o reconhecimento dessas características automaticamente pelo modelo a partir do cruzamento dos mapas de solo, declividade e uso do solo conforme procedimento do SWAT apresentado por (NEITSCH et al., 2009)

A divisão da bacia hidrográfica em URHs possibilita que o modelo determine diferenças na evapotranspiração decorrentes dos diversos manejos e solos existentes em cada sub-bacia. Levando em consideração que os regimes de precipitação e evaporação na bacia sejam bastante distintos entre as suas regiões fisiográficas, essa é uma informação importante nessa pesquisa, pois refina os resultados do modelo conforme descrito por Arnold et al. (2012) no tutorial do SWAT

O escoamento superficial foi estimado separadamente para cada URH de forma automática, depois foi realizada a junção dos dados para obtenção do escoamento

total da bacia. Esse processo aumenta a exatidão e promove uma melhor descrição física do balanço hídrico.

O número de URHs na bacia foi definido por essa combinação gerada pelo SWAT e com supressão de áreas menores que 2% do total nos dados de usos de solo, tipo de solo e declividade. Além disso, o modelo através das URHs gera os parâmetros da MEUPS - Equação Universal de Perda de Solos Modificada.

A discretização da bacia em subunidades é realizada a partir do MDE, a partir dele foi gerada a rede de drenagem da área de interesse, as direções de fluxo e área de contribuição mínima para formação dos canais de drenagem. Com esses dados, o SWAT gerou um total de 21 sub-bacias definidos pelo modelo, entretanto, considerando que quanto maior o número de divisões maior eficiência dos resultados,.

Os postos de coleta dos dados de vazão corresponderam as sub-bacias 9, 17 e 21, respectivamente Porto das Andorinhas, Pari e Ponte de Taquara, escolhidos por serem os únicos localizados a montante do Reservatório de Três Marias, e cujos postos estão adequadamente inseridos dentro da área das sub-bacias criadas.

Em seguida foi determinado o exutório da bacia, definidos seus limites topográficos e gerados os parâmetros hidrológicos de todas as sub-bacias geradas anteriormente para só então dar-se início a criação das URHs.

As URH podem ser definidas de duas formas, descritas por Taveira (2012): a primeira pelo método da URH dominante, onde para cada sub-bacia é considerado o uso e tipo de solo predominante e os demais serão descartados; e a segunda, conhecida por URH múltiplas, onde são criadas várias combinações de usos e tipos de solo para cada sub-bacia de acordo com o nível de sensibilidade escolhido pelo usuário. Nesta pesquisa foram geradas 190 URH utilizando o segundo método descrito com sensibilidade de 15%, como aconselhado no manual técnico do SWAT, desta forma evitando perdas de informações referentes a tipo e uso do solo.

3.5 Definição dos Parâmetros Característicos da Área de Estudo

O SWAT possui no seu banco de dados interno com informações de estações meteorológicas e de solos dos Estados Unidos, sendo, portanto necessário entrar com dados climáticos diários, assim como as características químicas e físicas dos solos que compõe a bacia do São Francisco. O banco de dados de solo foi preparado

levando em consideração as informações repassadas pela Embrapa Solos (tipos e perfis de solos, da área da bacia do São Francisco) para simulação do modelo na área estudada.

Já a estruturação do banco de dados climáticos foi proveniente das informações coletadas no INMET – Instituto Nacional de Meteorologia e junto a ANA. Sendo essas informações (precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) estruturadas para o período de 1988 a 2012, conforme dados de entrada do modelo e publicado por Arnold et al., (2012). Desse modo, foram criados para a Bacia do São Francisco os bancos de dados de solo e climáticos.

3.6 SWAT-CUP

Modelos hidrossedimentológicos como o SWAT, que possui uma grande quantidade de processos integrados e conseqüentemente uma grande quantidade de parâmetros que influenciam na resposta do modelo, necessitam de uma automação em sua calibração para que um melhor ajuste seja obtido. Pois as possibilidades de combinações entre os parâmetros são inúmeras e podem demandar uma enorme quantidade de tempo para que seja obtido um ajuste satisfatório, caso a calibração seja realizada de forma manual.

A calibração automática de um modelo exige que seus parâmetros sejam sistematicamente alterados, o modelo executado, e os arquivos de saída comparados com os valores observados correspondentes. A principal função de uma interface é fornecer essa ligação entre a entrada/saída de um programa de calibração com o modelo (ABBASPOUR, 2012).

A calibração automática do modelo SWAT pode ser realizada a partir da utilização do software de domínio público SWAT-CUP, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). O SWAT-CUP possibilita a realização da análise de sensibilidade, calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT, a partir de cinco diferentes algoritmos: SUFI-2 (ABBASPOUR, 2004; 2007), PSO (ABBASPOUR, 2012), GLUE (BEVEN e BINLEY, 1992), ParaSol (VAN GRIENSVEN et al., 2006), e MCMC (KUCZERA e PARENT, 1998; MARSHALL et al., 2004; YANG et al., 2007).

Os estudos de Yang et al. (2007), Schuol et al. (2008) e Faramarzi et al. (2009) comparam os diferentes algoritmos de auto calibração utilizados pelo SWAT. O algoritmo SUFI-2, que tem sido o mais utilizado para a calibração automática do modelo SWAT, é descrito de forma simplificada no item a seguir, com base em Abbaspour (2012) e Ferrigo (2014). A descrição do algoritmo SUFI-2 na íntegra pode ser consultada em Abbaspour (2012).

3.6.1. SUFI-2

No SUFI-2 levam-se em conta para a análise de incerteza todas as suas fontes, como a incerteza nas variáveis de entrada, o conceitual do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o fator-P, que é a percentagem dos dados medidos delimitadas pela incerteza de predição de 95% (95PPU). Outra medida que busca quantificar a eficácia de uma análise de calibração e incerteza é o fator-R, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos.

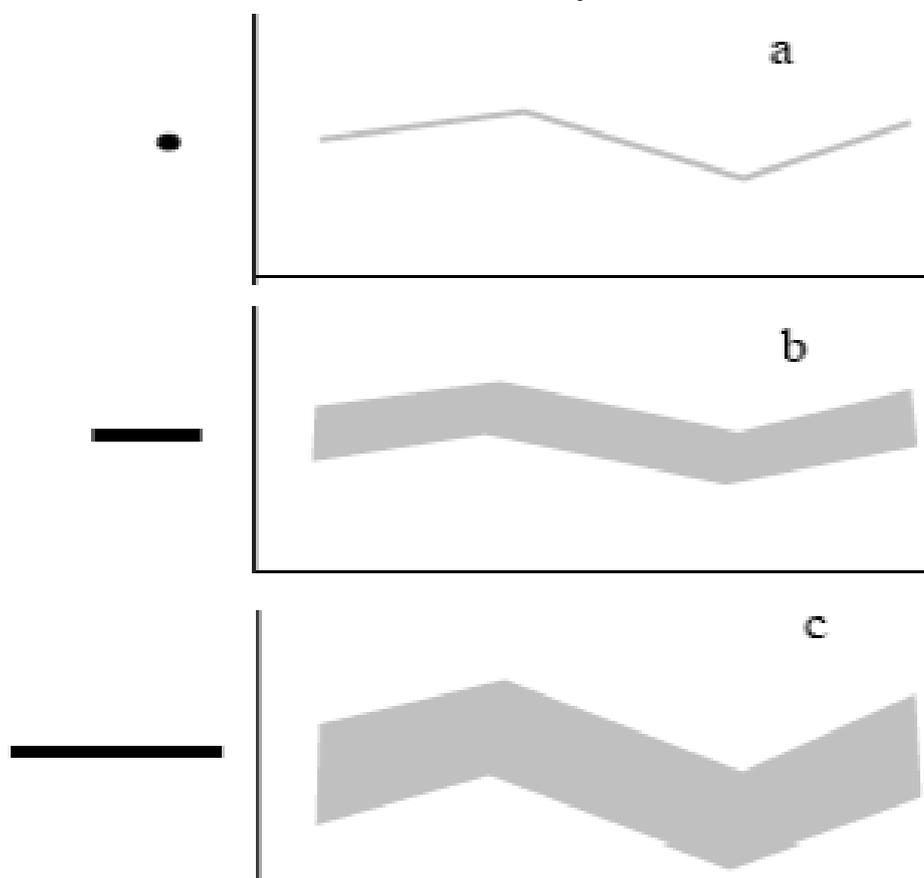
O SUFI-2 tenta lidar com uma banda menor possível de incerteza. O conceito subjacente à análise de incerteza do algoritmo SUFI-2 está representada graficamente na Figura 2.

É possível observar que um valor de parâmetro único (mostrada por um ponto) leva a uma resposta de um modelo único (Figura 6), enquanto que a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) conduz aos 95PPU ilustrados pela região sombreada na Figura 2b. À medida que aumenta a incerteza dos parâmetros, a incerteza de saída também aumenta (não necessariamente de forma linear) (Figura 2c).

Desta forma, o SUFI-2 começa assumindo uma grande faixa de incerteza para os parâmetros (dentro de uma faixa fisicamente significativa), de modo que os dados medidos inicialmente se enquadram no 95PPU. Em seguida, essa incerteza é reduzida com base no monitoramento dos fatores P e R. A cada passo, as faixas de parâmetros anteriores são atualizadas através do cálculo da matriz de sensibilidade, seguido pelo cálculo da matriz de covariância, de 95% de confiança intervalos dos parâmetros, e a matriz de correlação (mais detalhes em Abbaspour et al., 2004; 2007). Os parâmetros

são depois atualizados de tal modo que as novas faixas de valores são sempre menores do que as faixas anteriores, e estão centradas em torno da melhor simulação.

Figura 6 – Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação.



Fonte: Abbaspour et al. (2007).

A confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo fator-P e fator-R. Teoricamente, o valor para o fator-P varia entre 0 e 100%, enquanto que o fator-R varia entre 0 e infinito. O fator-P de 1 e o fator-R de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos. A distância desses números pode ser utilizada para avaliar a eficácia da calibração. Por isso, muitas vezes um equilíbrio entre os dois valores deve ser atingido. Quando os valores aceitáveis de fator-R e fator-P são alcançados, as incertezas dos parâmetros são os intervalos gerados.

Além disso, a eficácia da modelagem pode ser quantificada pelos coeficientes de determinação R^2 e/ou coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), dentre outras funções objetivas disponibilizadas pelo SWAT-CUP.

Para a utilização do SUFI2, algumas definições básicas, por parte do usuário, são necessárias, como: (a) escolha dos parâmetros que serão otimizados; (b) o estabelecimento de faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros selecionados, assim como a relação matemática que deve ser adotada para a variação dos valores dos parâmetros; (c) o número de interações que devem ser realizadas; (d) a, ou as variáveis a serem verificadas (vazão observada, por exemplo), incluindo a série histórica a ser considerada; (e) a função objetivo a ser utilizada como referência (como por exemplo, NSE).

Durante a execução do SWAT-CUP, a amostragem Latin Hypercube (McKAY et al., 1979) é realizada, levando a n combinações de parâmetros, em que n é o número de simulações desejadas. Este número deve ser relativamente grande (cerca de 500 a 1000). O programa é executado n vezes e as variáveis de saída simuladas, de interesse correspondente às observadas, são guardadas.

A sensibilidade dos parâmetros é computada por meio do cálculo de um sistema de regressão múltipla, que regressa os parâmetros gerados pelo hipercubo latino versus os valores da função objetivo selecionada pelo usuário.

Um t-test é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro e a sensibilidade é estimada pelas mudanças médias na função objetivo, resultante das alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados. Essa sensibilidade relativa determinada é baseada numa aproximação linear e, conseqüentemente, fornece somente informações parciais sobre a sensibilidade dos parâmetros do modelo na função objetivo (ABBASPOUR et al., 2007).

O SWAT CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o t-stat, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro; e (2) o p-value que determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo à zero indica maior significância.

A plotagem e a análise dos resultados das simulações dão uma visão geral sobre os efeitos das mudanças dos parâmetros na função objetivo e em relação a variável observada.

3.7 Análises de tendências: os métodos Mann-Kendall e Sen

Estudos de séries temporais de precipitação e vazão são capazes de fornecer importantes informações acerca do comportamento natural de determinada bacia e em demonstrar até que ponto as ações humanas alteram seu funcionamento. Para este estudo, a análise dos dados pluviométricos e fluviométricos foi realizada utilizando os testes de tendência e ruptura de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e Sen (SEN, 1968).

Em 1975, Sneyers propôs o teste sequencial estatísticos e não paramétrico de Mann-Kendall que baseia-se em duas hipóteses: na primeira, H_0 , os dados da série temporal são independente e igualmente distribuídos; já em uma hipótese positiva, H_1 , as observações da série possuem tendência monotônica no tempo. Sob H_0 , a estatística do teste é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (14)$$

sendo n é o tamanho da série temporal, x_i e x_j os valores dos dados da série temporal i e j ($j > i$), respectivamente, e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

A variação nesse método é calculada como:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^P t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (16)$$

no qual P é o número de grupos amarradas, t_i é o número de valores analisados do grupo de P_{th} . Se os grupos não são vinculados, este processo pode ser ignorado. Um grupo vinculado é um conjunto de dados de amostra com o mesmo valor. Nos casos em que o

tamanho da amostra $n > 30$, a estatística de teste normal padrão Z_S é calculado usando a Eq. 17:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (17)$$

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada através do valor de Z_S . Esta estatística é usada para testar a hipótese nula de que nenhuma tendência existe. Os valores positivos de Z_S indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos Z_S mostram tendências decrescentes. A significância estatística foi realizada pelo teste p -valor. Quando $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$, a hipótese nula é rejeitada e, portanto, uma tendência significativa é determinada na série histórica. $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido a partir do quadro de distribuição normal padrão.

Neste estudo, os níveis de significância $\alpha = 0,01$ e $\alpha = 0,05$ foram usados. Ao nível de significância de 5%, a hipótese nula de nenhuma tendência é rejeitada se $|Z_S| > 1,96$ e rejeitado se $|Z_S| > 2,576$ ao nível de significância de 1%.

Estando uma tendência linear presente numa série temporal, a mudança por unidade de tempo (declividade), pode ser estimado utilizando-se o método não paramétrico desenvolvido de Sen (1968), que estima a declividade de N pares, sendo computada pela Eq. 18.

$$Q_i = \frac{(x_i - x_k)}{(j - k)} \quad (18)$$

Para todo $i = 1, 2, \dots, N$. Onde x_j e x_k , correspondem aos valores de x nos tempos j e k sendo $j > k$. A mediana dos N valores de Q_i será a declividade de Sen calculado através da equação 15, se N for ímpar ou pela Eq. 19, se N for par:

$$Q_{med} = Q_{\left[\frac{N+1}{2}\right]} \quad (19)$$

$$Q_{med} = \frac{1}{2} \left(Q_{\frac{N}{1}} + Q_{\left[\frac{N+2}{2} \right]} \right) \quad (20)$$

Segundo Silveira et al. (2009), Q_{med} é testado através de um teste bicaudal cujo grau de confiança corresponde a $100(1 - \alpha)\%$ e a declividade estimada é obtida através de um teste não paramétrico.

3.7 Dados de entrada do modelo

3.7.1 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação do terreno gerado para a área de foi analisado em conjunto às classes de declividade (Figuras 7 e 8, respectivamente) e teve suas altitudes variando entre 507 e 1615 metros, dentro do limite da sub-bacia.

A partir do MDE (Figura 7) foi gerado o mapa de classes hipsométricas, onde é possível observar que a sub-bacia apresenta altitudes máxima e mínima de 1.615 m e 507 m, respectivamente, com maior parte correspondendo a áreas com altitudes variando entre 507 e 807 m (verde claro e verde escuro Figura 8), isso implica dizer que na área predomina morfologia plana a levemente ondulada com regiões de relevo abrupto nas zonas próximas aos divisores de água (em vermelho, amarelo e laranja). As regiões mais baixas correspondem às áreas próximas a porção central e ao Reservatório de Três Marias, enquanto as máximas são encontradas nas porções sudoeste e oeste, como mostra a imagem acima.

Nas áreas de maior altitude, mais sujeitas a erosão natural, há um predomínio de atividades agrícolas que potencializam os processos erosivos. Os sedimentos produzidos pelo manejo do solo nessa região são levados em suspensão até as partes mais baixas da bacia onde serão depositados podendo influenciar na qualidade da água devido à presença de agrotóxicos ou resultar na diminuição da taxa de nutrientes, além de provocar o assoreamento do reservatório.

Figura 7 – Modelo Digital de Elevação do Terreno da bacia do Alto Rio São Francisco.

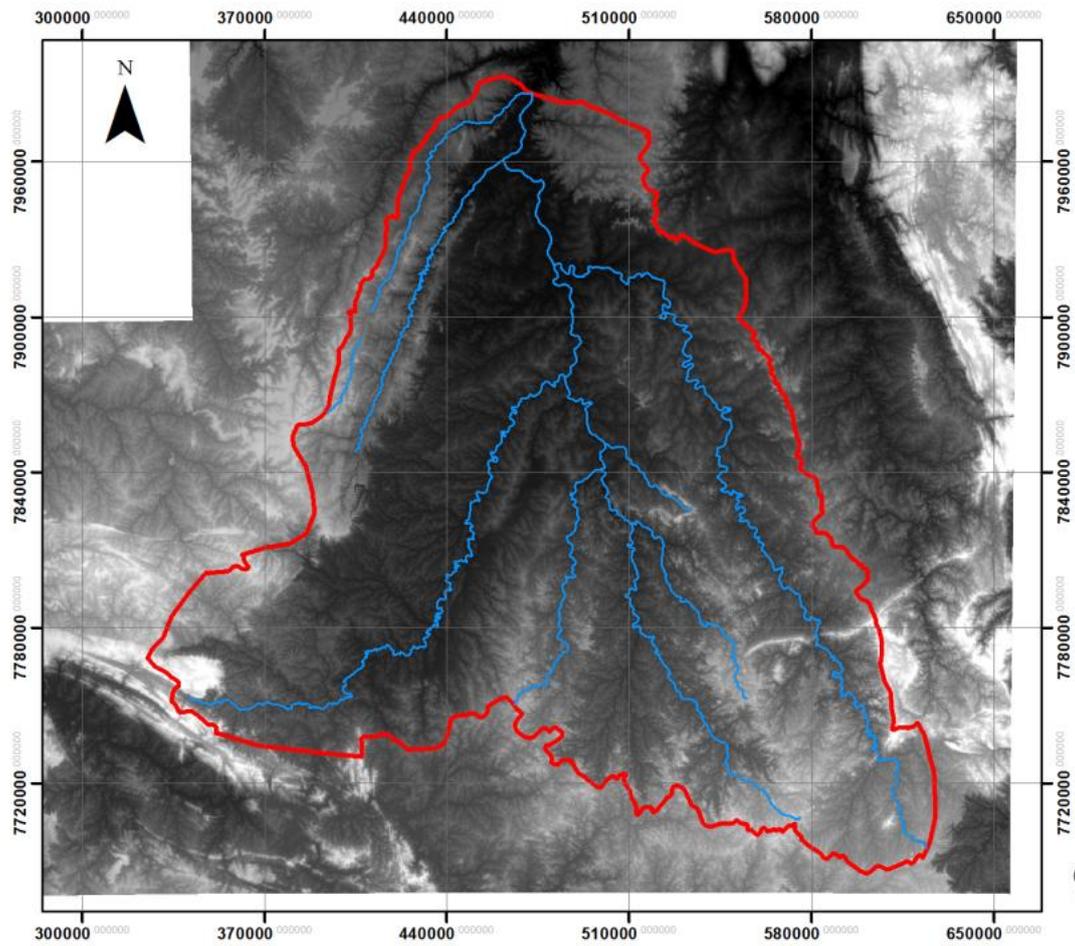
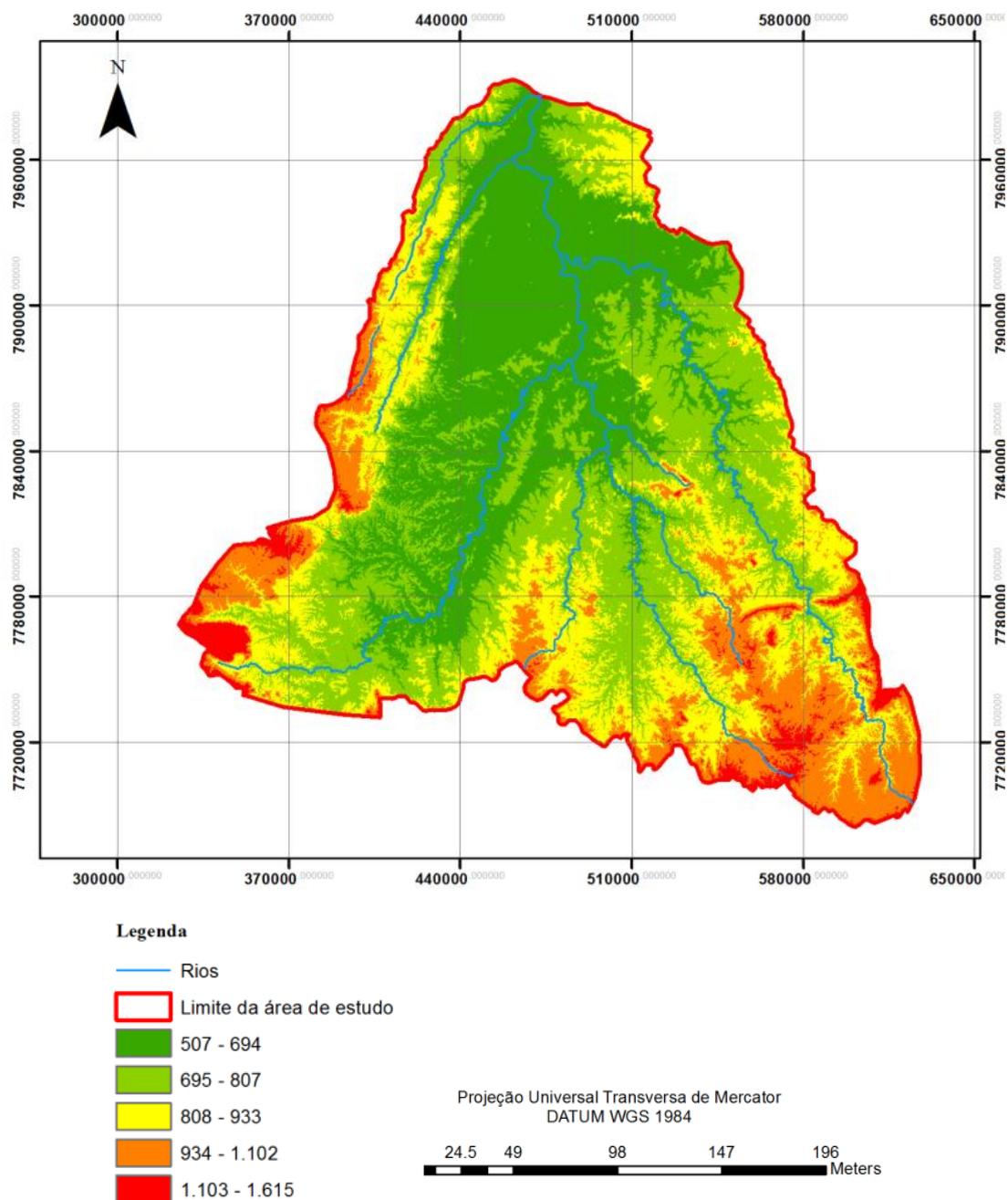


Figura 8 – Mapa de declividade da bacia do Alto Rio São Francisco.



3.7.2 Mapas de uso e ocupação do solo e classes de solo

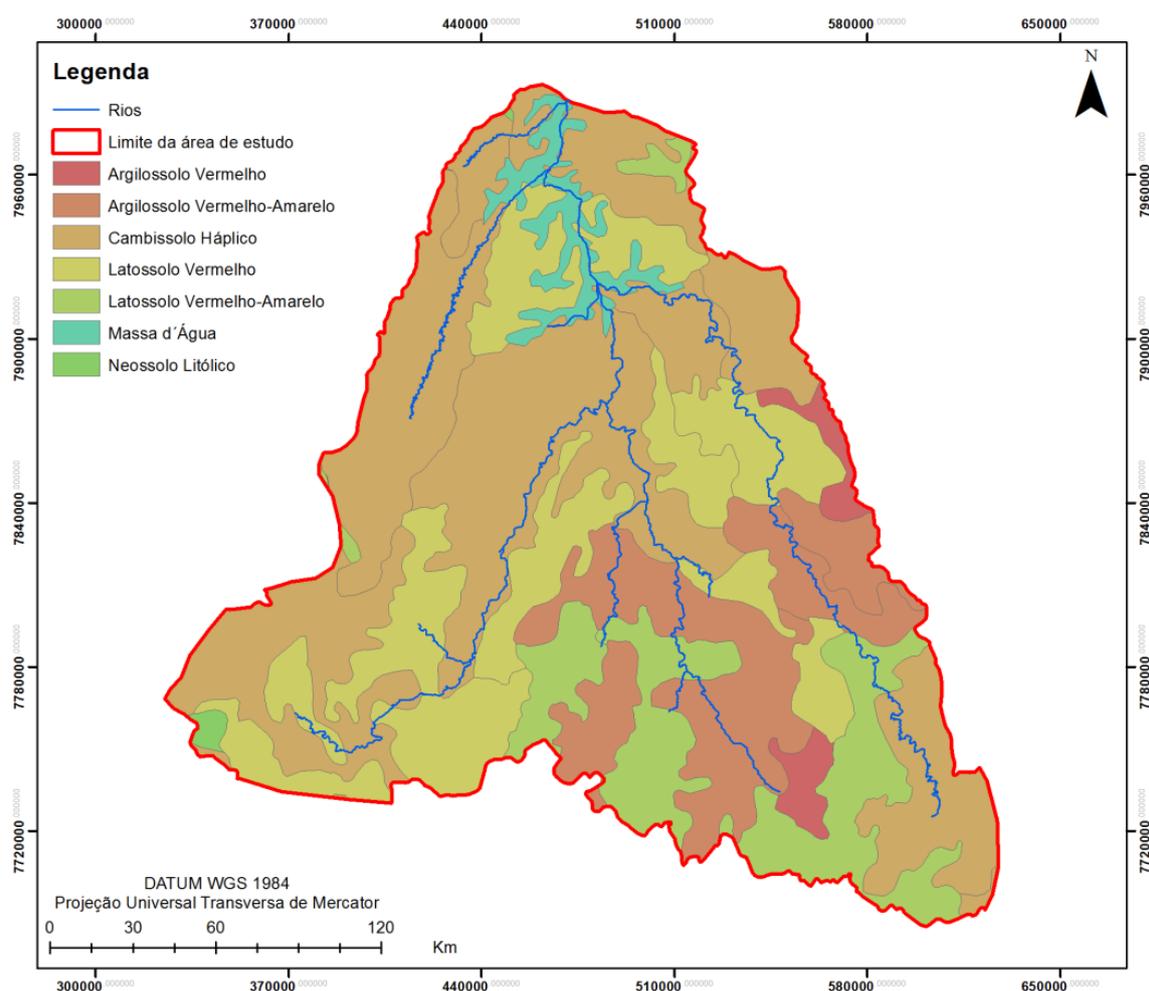
De maneira geral, os solos encontrados na região possuem aptidão para agricultura irrigada e requerem um uso intensivo de adubos devido a sua composição

ácida, na maioria dos casos. Há o predomínio de Latossolos, que recobrem cerca de 35,88% do total, e Cambissolo Háptico correspondendo a 43,28% da área (Figura 9).

Ao sobrepor os dados de tipos de solo às classes hipsométricas observou-se que o Cambissolo Háptico se estende, principalmente, nas áreas de relevo suave a ondulado enquanto os Latossolos e Argissolos se concentram nas porções mais elevada da bacia com relevos mais acidentados de cotas altimétricas variando entre 808 a 1.615 m.

O cruzamento dos tipos e usos do solo mostrou o predomínio de cerrado em áreas com maior existência de Cambissolo Háptico e Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo, classes de solo com baixa fertilidade, profundo e com elevado teor de alumínio em um relevo suave a levemente ondulado e suscetível à erosão. Também há ocorrência de pequenas zonas de cerrado em áreas recobertas por Neossolos Litólicos, por apresentarem-se rasos, pouco desenvolvidos, com alto risco a erosão e baixa fertilidade nas áreas de maiores cotas altimétricas da bacia (Figura 10).

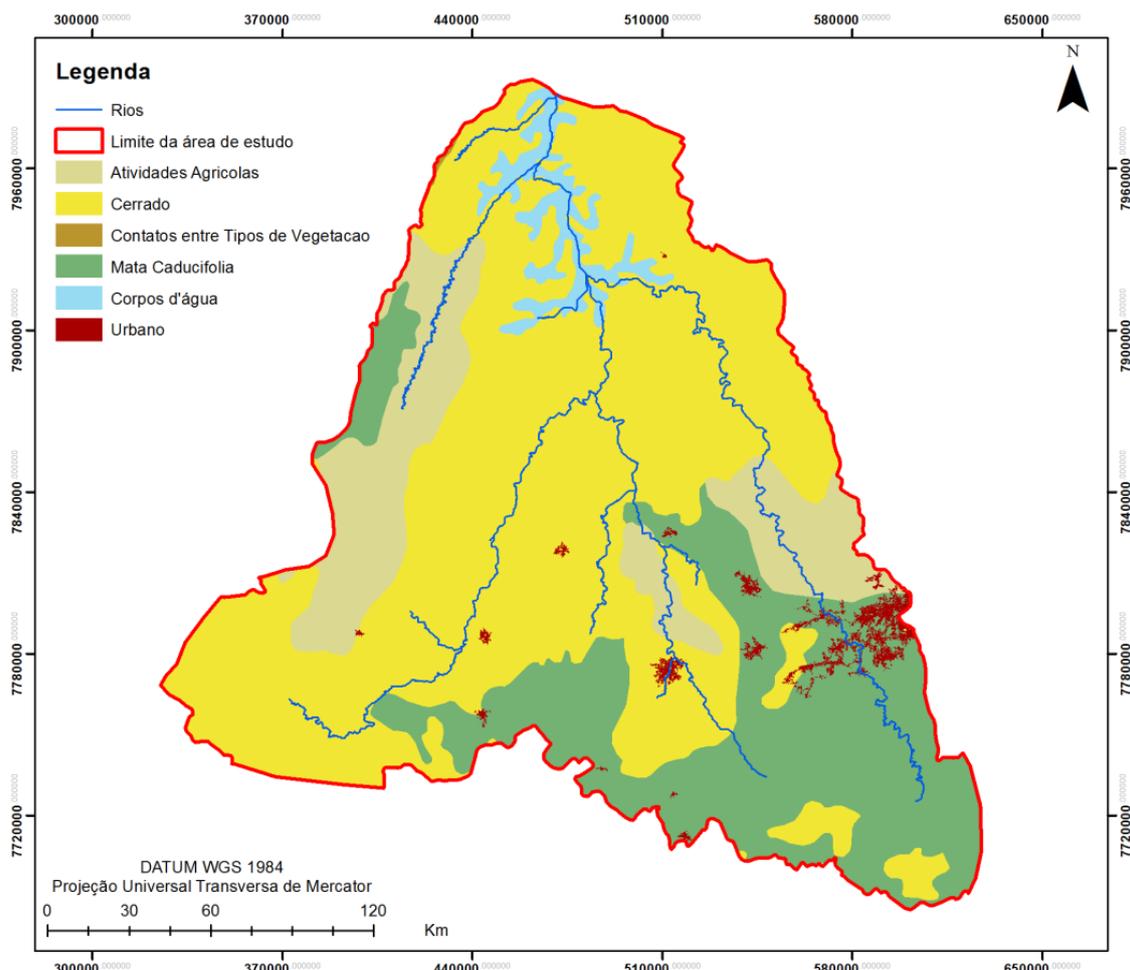
Figura 9 – Mapa dos tipos de solo da bacia Alto Rio São Francisco.



Quanto às classes de uso agrícola, ocorrem nas áreas recobertas por Cambissolo Háplico e Argissolos Vermelho e Vermelho-amarelo. Normalmente, os Cambissolos apresentam dificuldade de exploração devido a sua pouca profundidade e baixa fertilidade, nas áreas de cerrado são mais utilizados para pastagens, mas com manejo adequado podem ser utilizados para cultivo de alguns grãos e cereais, como ocorre na bacia. Já os Argissolos possuem, na região, boas características físicas, mas na bacia correspondem as zonas de tensão ecológica devido à extração da cobertura natural para cultivo agrícola e expansão de zonas urbanas (em cinza, Figura 11).

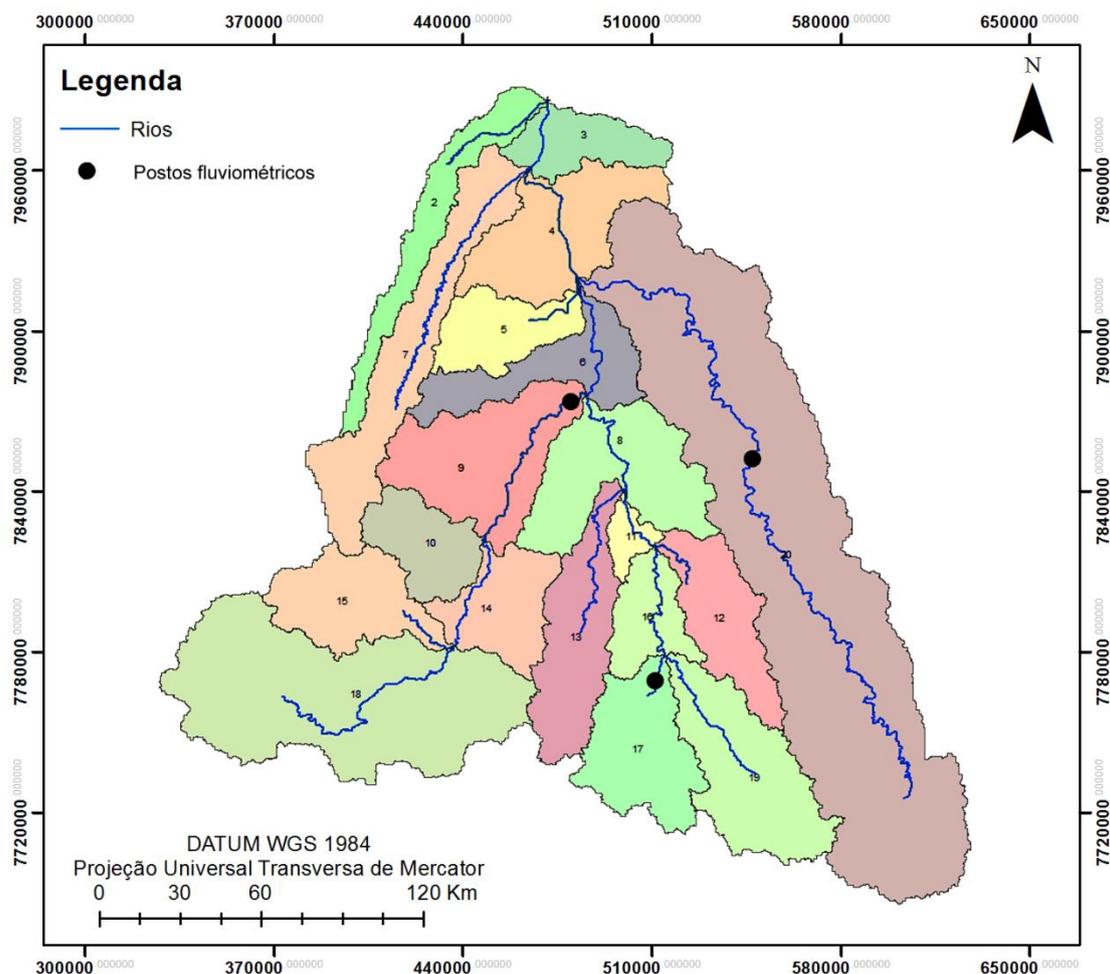
De posse dos mapas apresentados acima, foi possível dar início a discretização da bacia em subunidade e a criação das URH. Ao todo foram geradas 20 sub-bacias e 190 URH com limiar de 15% para combinações de classes de declividade, uso e tipo de solos.

Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Alto Rio São Francisco.



Os *outlets* foram determinados, sempre que possível a partir dos postos fluviométricos inseridos manualmente no modelo, a fim de facilitar a comparação dos dados observados aos simulados pelo modelo. A localização das sub-bacias, bem como dos *outlets* cujos dados foram utilizados na calibração e validação do modelo e a malha hidrográfica são apresentados na Figura 11, abaixo:

Figura 11 – Mapa das sub-bacias geradas no modelo SWAT. Os postos fluviométricos foram considerados exutórios e correspondem, respectivamente, as sub-bacias 9 (Posto de Porto das Andorinhas), 19 (Posto de Pari) e 20 (Posto de Ponte da Taquara).



A partir do mapa acima observa-se que apenas o posto Porto das Andorinhas está localizado precisamente no exutório de uma sub-bacia. Além disso, o posto corresponde a maior área de captação de escoamento superficial a montante do Reservatório de Três Marias, por estes motivos optou-se por utilizar apenas os dados de vazão observada dessa estação a fim de diminuir a possibilidade de erros na modelagem

uma vez que as vazões de todas as sub-bacias devem ser direcionadas a uma única sub-bacia específica, como explica Castro (2013).

Após a definição das sub-bacias, o SWAT calcula, para cada uma delas, parâmetros como área, declividade média e elevação seccionando a área total da bacia em classes de declividade a partir do MDE a fim de associá-las as classes de tipos e uso do solo gerando as URH.

Foram definidas cinco classes de declividade a partir do mapa da Figura 8, onde a maior parte da bacia – aproximadamente 60% de sua extensão total – está presente na classe que varia de 0 a 9% sendo considerado de relevo suavemente ondulado (EMBRAPA, 2006). Aproximadamente 25% da área variam entre as classes de 10 a 20% e de 20 a 40% de declividade, sendo o relevo classificado como ondulado a ondulado. A menor porção da bacia, aproximadamente 15% do total, é de relevo ondulado a fortemente ondulado (EMBRAPA, 2006).

Deu-se início a criação das URH com a associação das classes de tipo e uso do solo àquelas existentes no Swat. No modelo existem apenas dados referentes aos solos dos Estados Unidos logo, foi preciso acrescentar os parâmetros citados anteriormente ao banco de dados para então realizar a reclassificação; quanto aos dados de uso do solo, estes foram associados às classes existentes no modelo de acordo com características gerais. Nas Tabelas 4 e 5 são apresentadas as reclassificações das classes de uso do solo e tipos de solo:

Tabela 4 – Classes de uso do solo e reclassificação do modelo Swat

Classificação original	Reclassificação no Swat
Atividades agrícolas	AGRL
Cerrado	RNGB
Contato entre tipos de vegetação	MIXD
Mata caducifólia	FRSD
Rios e lagos	WATR
Urbano	URBN

Tabela 5 – Tipos de solo e reclassificação do modelo Swat

Classificação original	Reclassificação no Swat
Argissolo Vermelho	Podzólico vermelho-amarelo
Argissolo Vermelho-Amarelo	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico
Latossolo Vermelho	Latossolo vermelho-amarelo
Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo vermelho-amarelo eutrófico
Cambissolo Háptico	Cambissolo
Neossolo Litólico	Litólicos

Observou-se que todas as classes originais foram mantidas quando realizada a reclassificação e criação das URH, exceto a classe denominada “Contato entre tipos de vegetação” que correspondia a menos de 1% da área da bacia e por isso foi descartada pelo modelo devido ao nível de sensibilidade do limiar adotado para combinações.

3.8 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Modelo SWAT

Uma análise de sensibilidade foi realizada com todos os parâmetros que o SWAT emprega para calcular a estimativa de vazão e que podem influenciar a dinâmica hidrossedimentológica no modelo, sendo os parâmetros encontrados pela análise de sensibilidade hierarquizada por ordem de influência. O SWAT utiliza vinte e seis parâmetros para a simulação da vazão, conforme pode ser observado na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Parâmetros utilizado pelo SWAT na simulação de vazão

Parâmetros	Descrição
Alpha_bf	Coefficiente de fluxo de base
Ch_k2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
CN2	Curva número da condição II de umidade
SURLAG	Coefficiente de lag do escoamento superficial
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada
Ch_N2	Coefficiente de Manning para o canal
GWQmn	Água do aquífero profundo que retorna ao canal
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo
Slope	Declividade da encosta
GW_Deley	Tempo de fluxo de água subterrânea
Blai	Máximo de área foliar potencial da cultura
Canmx	Máximo de interceptação da cultura
Sol_AWC	Capacidade de água disponível no solo
Sol_Z	Profundidade do solo
GW_Revap	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
Biomix	Eficiência biológica
Sol_Al	Albedo do solo úmido
Revapmn	Temperatura de retorno da água do aquífero para o canal
EPCO	Fator de crescimento da cultura
Ssubsn	Comprimento médio da encosta da sub-bacia
Sftmp	Temperatura da precipitação = temperatura da neve
Sfmn	Fator para derreter a neve em 21 de dezembro
Smtmx	Fator para derreter a neve em 21 de junho
Smtmp	Temperatura base para derretimento da neve
Timp	Fator de retardo da temperatura na neve
Tlaps	Fator de temperatura

Para esta pesquisa, a análise de sensibilidade foi realizada automaticamente através da plataforma Swat-CUP pelo método LH-OAT. A primeira rodada do modelo foi feita para toda a área da bacia com os parâmetros não ajustados a fim de identificar apenas aqueles que apresentariam maior influência na simulação em virtude do maior relacionamento com o fluxo superficial.

3.9 Calibração e Análise de Sensibilidade

O modelo SWAT utilizada vinte e seis parâmetros cujos valores influenciam diretamente a qualidade dos dados hidrossedimentológicos obtidos ao final da modelagem. Para saber quais desses parâmetros são mais relevantes nas estimativas de vazão e produção de sedimentos, é preciso realizar uma análise de sensibilidade que irá indicar aqueles que melhor se aplicam ao objetivo da pesquisa.

A fim de evitar o uso excessivo de parâmetros, como destacou Van Griensven et al. (2006), neste trabalho foram escolhidos dezenove parâmetros devido ao seu bom desempenho em regiões semiáridas (Tabela 7):

Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetros	Descrição
ALPHA_BF	Coeficiente de fluxo de base
BIOMIX	Eficiência biológica
CANMX	Máximo de interceptação da cultura
CN2	Curva número na condição II de umidade
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal
EPCO	Fator de crescimento da cultura
ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água do solo
GW_DELAY	Tempo de fluxo de água subterrânea
GW_REVAP	Coeficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
GWQMN	Água do aquífero profundo que retorna ao canal
RCHRG_DP	Recarga de água do aquífero profundo
REVAPMN	Temperatura de retorno da água do aquífero para o canal
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da sub-bacia
SOL_ALB	Albedo do solo úmido
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
SOL_Z	Profundidade do solo
SURLAG	Coeficiente de lag do escoamento superficial

A análise dos parâmetros acima foi realizada com o *Latin-Hypercube One Factor At-a-Time* (LH-OAT) que segundo Van Griensven et al. (2006), subdivide cada parâmetro em N intervalos com uma probabilidade de ocorrência igual a $1/N$. Em distribuições uniformes, os valores máximos e mínimos de cada parâmetro são divididos em N intervalos iguais, em seguida, são determinados valores genéricos para cada um deles de forma que cada intervalo apareça apenas uma vez. Esse método resulta em N valores não-sobrepostos e o modelo é rodado N vezes.

Para calibração foi utilizado o período de 1978 a 1998 com o auxílio da plataforma SWAT-CUP que permite a realização da calibração de forma automática, porém supervisionada. Os parâmetros foram ajustados segundo dados dos manuais do próprio SWAT.

O método de análise utilizado foi o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fittig*) que, basicamente, considera todas as incertezas possíveis (variáveis de entrada, parâmetros, o conceitual do modelo) a fim de estimar variáveis que resultem na menor quantidade de incertezas ao final da calibração. O objetivo principal da calibração com o SUFI-2 é minimizar o intervalo de cada parâmetro – que varia entre 0 e 1 – com uma predição de 95% de incertezas (95-PPU)

O SUFI-2 inicia seus procedimentos com um intervalo maior que será diminuído enquanto são monitorados dois fatores: fator-P, que é a porcentagem de dados medidos com a delimitação de 95% de incerteza; e o fator-R, determinado pela espessura média da banda de 95-PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos. Em cada etapa, os parâmetros utilizados são substituídos de forma que os intervalos sejam cada vez menores do que os anteriores, tendo como referência sempre os melhores resultados simulados.

3.10 Análises de Desempenho do Modelo SWAT

Uma situação ideal traria um fator-p igual a 100% e fator-R próximo a zero, entretanto, essa condição dificilmente seria alcançada, sendo assim, a eficiência da simulação no modelo foi calculada a partir do Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (R^2), calculados respectivamente através das equações:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q)^2} \quad (17)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada; Q_s é a vazão simulada pelo modelo; Q é a vazão média observada no período simulado; e n é o número de eventos. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe varia no intervalo de infinito negativo até 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é a calibração.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_n)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_n)(x_i - x_m)}} \right)^2 \quad (18)$$

onde:

x_i = corresponde aos valores observados.

x_m = a média dos valores observados.

y_i = os valores calculado pelo modelo.

y_m = a média dos valores calculados pelo modelo.

Da mesma forma, o R^2 irá variar de infinito negativo até 1, sendo valores próximos a 1 relativos as melhores calibrações. Os resultados obtidos por meio de análise estatística foram classificados segundo o índice de eficiência estatística para modelagem com SWAT descrito por Moriasi et al. (2007), como descritos na Tabela 8:

Tabela 8 – Classificação do índice de eficiência estatística dos coeficientes de Nash-Sutcliffe e R^2

Índice de eficiência estatística	Resultados estatísticos Nash-Sutcliffe	Resultados estatísticos R^2
Muito bom	$\leq 1,00$	$\leq 1,00$
Bom	$\leq 0,75$	$\leq 0,75$
Satisfatório	$\leq 0,60$	$\leq 0,60$
Insatisfatório	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

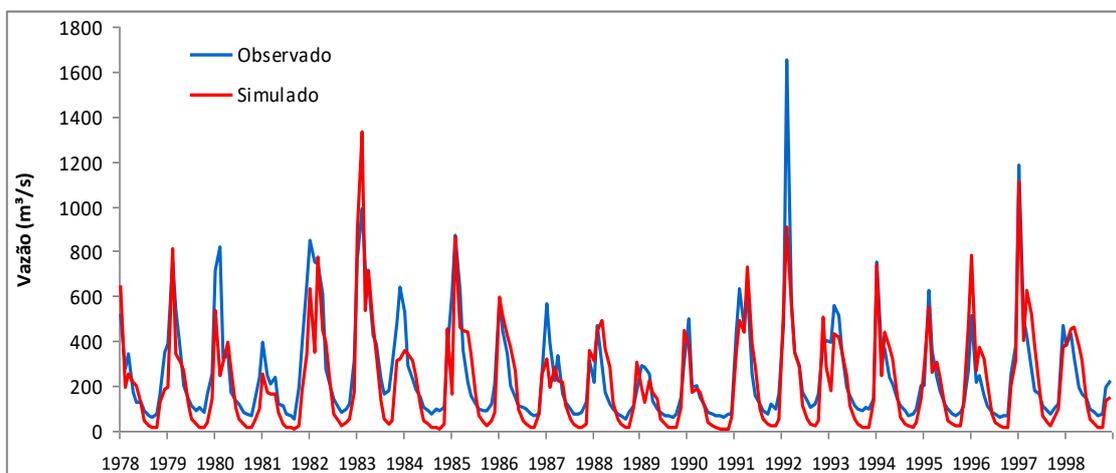
4.1. Modelagem Hidrológica

4.1.1 Calibração do Modelo SWAT

Para as etapas de calibração foram utilizados apenas os parâmetros mais sensíveis, identificados na fase anterior e o período de análise foi de 1978 a 1998. A Figura 12 apresenta os hidrogramas das vazões observada e simulada para o período da calibração no posto Porto das Andorinhas. Observa-se um COE de 0,70 e $R^2 = 0,85$, que são considerados muito bons para a modelagem hidrológica, segundo Moriasi et al. (2007).

Observa-se uma discrepância nos valores do fluxo de base assim como nos picos de vazão, com exceção da vazão máxima que são bastante aproximadas. O comportamento gráfico, no geral, é bastante discrepantes sendo as vazões máxima e mínima simulada equivalente a 1329 e 8,38 m^3/s , enquanto os valores observados foram de 1.653,78 e 50,27 m^3/s .

Figura 12 – Hidrogramas observado e simulado no período de janeiro de 1978 a dezembro de 1998, para o posto Porto das Andorinhas (calibração).

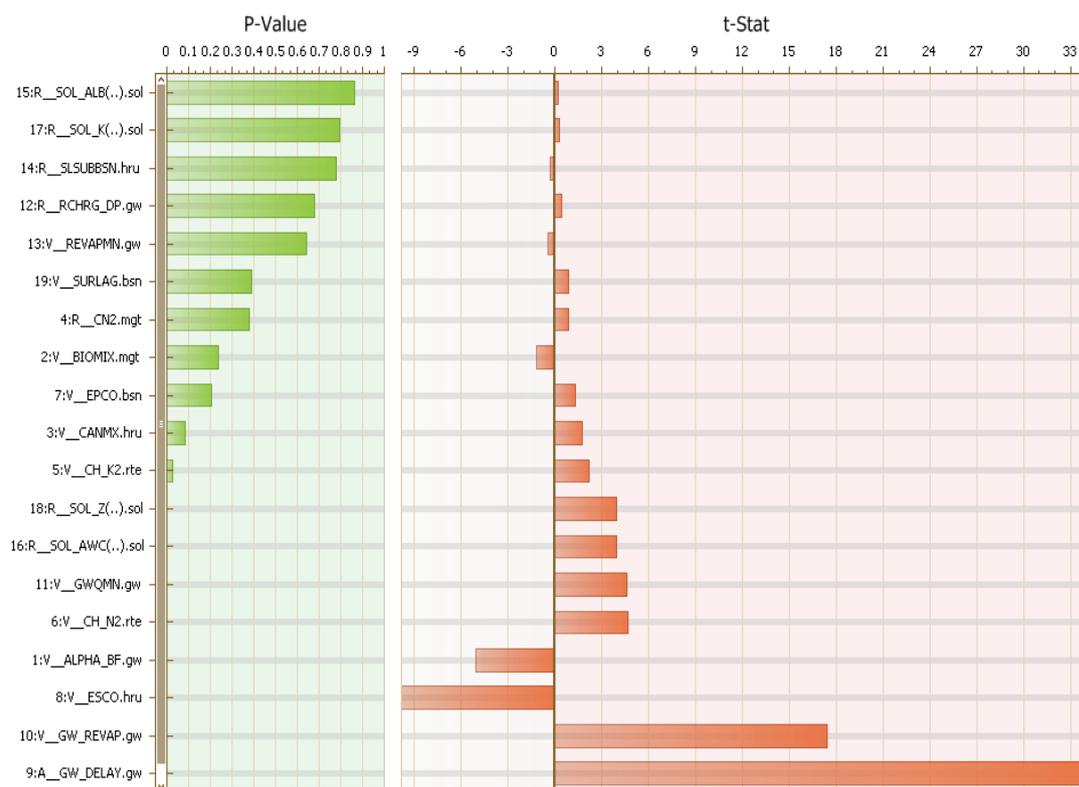


A calibração do modelo foi realizada automaticamente utilizando dados de vazão mensais correspondentes a estação fluviométrica de Porto das Andorinhas cujos testes iniciais de COE e R^2 apresentaram resultados considerados satisfatórios, além de ser a única localizada precisamente no exutório de uma sub-bacia. Nota-se que o modelo foi capaz de reproduzir de maneira adequada as vazões líquidas mensais, pois o

SWAT apresentou uma boa correlação entre a precipitação e a vazão simulada, evidenciando a adequada transferência de água da fase de bacia para a fase de canal.

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos da análise de sensibilidade dos parâmetros otimizados utilizados no processo de validação. Os parâmetros utilizados para calibração do modelo foram os mesmos descritos anteriormente (Item 3.9).

Figura 13 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Porto das Andorinhas.

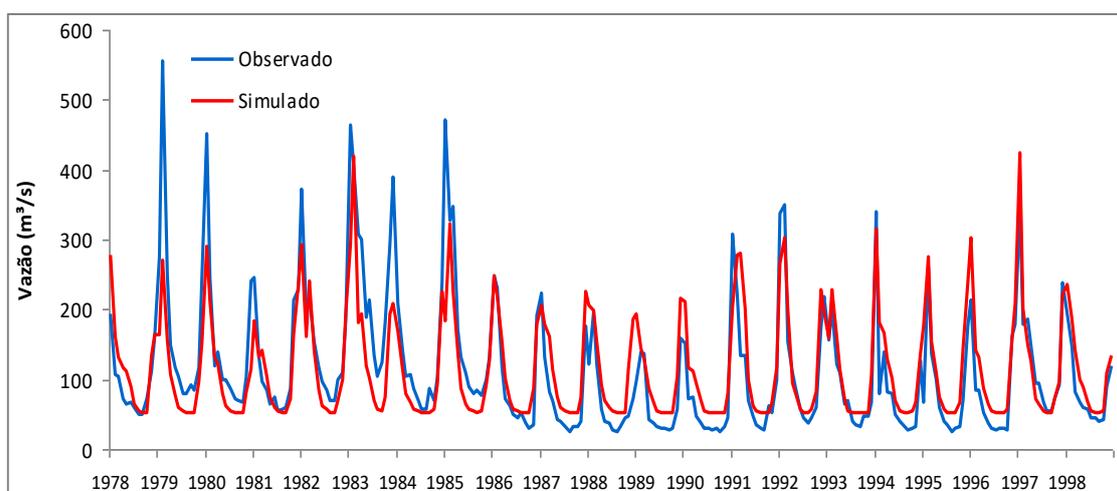


O valor de P-Value é responsável pela determinação do grau de significância da sensibilidade dos parâmetros, pois quanto mais próximo de zero forem os valores apresentados, maior será sua significância na modelagem específica (ABBASPOUR, 2011). Sendo assim, o ranking dos parâmetros mais sensíveis apontados pelo t-Stat, constituiu-se o mesmo para a significância da sensibilidade individual dos parâmetros.

A Figura 14 apresenta o gráfico de vazão observada e simulada após a calibração do modelo para o posto Pari. Observa-se um coeficiente de eficiência (COE) de 0,71 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,83. Estes valores também são considerados por Gotschalk e Motovilic (2000) adequados e muito bons, e, por Zaapa (2002) qualificados para a simulação de vazão.

O modelo superestimou as vazões de picos em aproximadamente 9 eventos e subestimou a vazão mínima em 2 eventos. Tal fato sugere que o banco de dados de cobertura vegetal utilizado pelo modelo SWAT não esteja correspondendo à cobertura vegetal atual que foi associada para a área do posto Pari. Além do mais, é possível que a subestimativa dos picos possa ser em decorrência de parte de água precipitada estar sendo infiltrada no solo e usada para o escoamento subterrâneo.

Figura 14 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1978 a 1998, para o posto Pari (calibração).



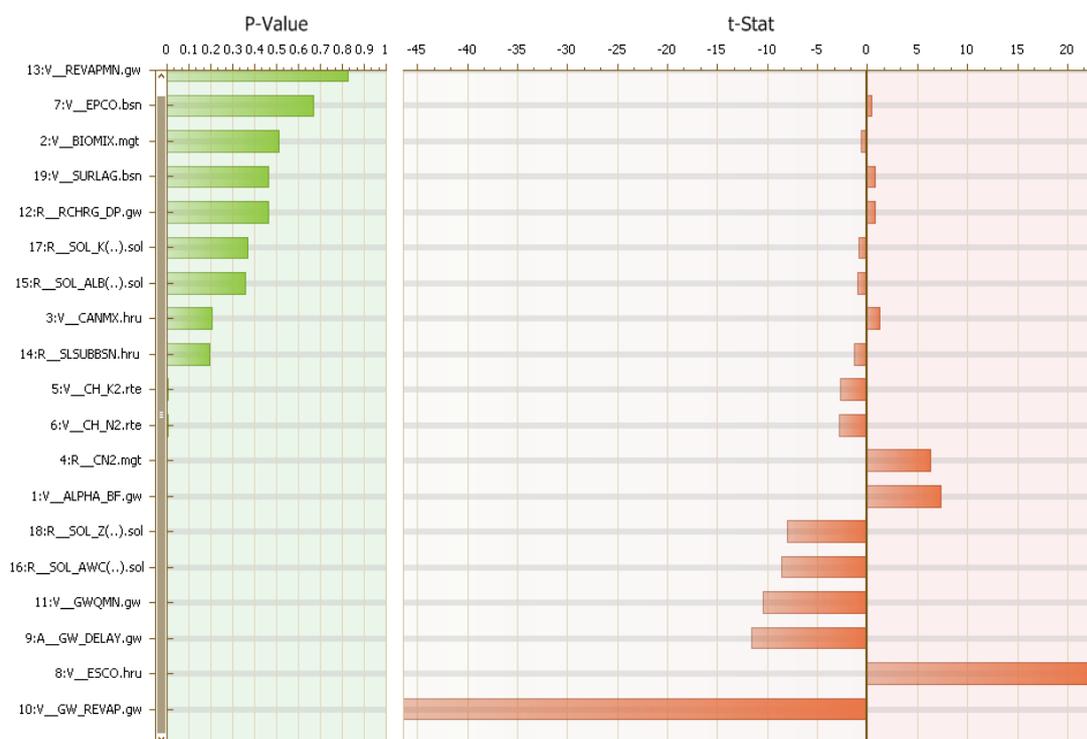
É possível que as oscilações nas vazões possam estar ocorrendo em função das características do Aquífero Bambuí, que possui uma área de recarga de 181.868 km² e pertence à Bacia Sedimentar do São Francisco. Assim, os valores elevados nos gráficos indicam uma recessão, enquanto valores baixos expressam que a drenagem é mais lenta. Segundo Fernandes (2012), tal fato é um fator importante, pois essa é uma zona produtora de águas proveniente do aquífero, é também nessa região onde se encontram muitas das nascentes dos principais rios perenes que alimentam o São Francisco.

Após a calibração é possível observar que houve uma melhora significativa do ajuste nos fluxos de base principalmente do período que vai de 1982 a 1985 e de 1994 a 1998. Esse fato condiz com referências bibliográficas anteriormente citadas a respeito do período de aquecimento do modelo onde nos três primeiros anos da série as simulações tendem a apresentar valores discrepantes. A vazão mínima do modelo depois de calibrado foi de 51 m³/s enquanto os dados observados apresentam valor mínimo de 23,77 m³/s.

Os valores de pico mantiveram-se semelhantes, a vazão máxima observada no período foi de 555 m³/s em 1991. Antes dos ajustes, a máxima simulada foi de 423 m³/s. Entretanto, nos anos de 1980 e 1989, outros dois picos tiveram ajustes consideráveis, pois, os dados observados correspondem, respectivamente, a 57 m³/s e 140 m³/s.

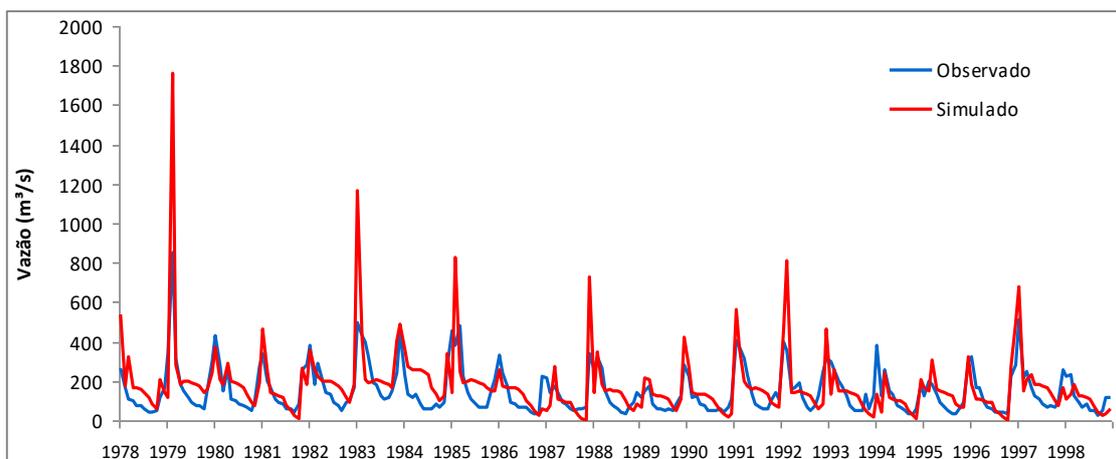
No que tange a variabilidade dos parâmetros mais sensíveis utilizados na calibração do posto Pari, este pode ser conferido na Figura 15. A análise de sensibilidade individual foi conduzida para a função estatística de Nash-Sutcliffe, fornecida pelo SWAT-CUP, assim como o P-value e o t-stat, apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Porto das Andorinhas.



No que tange os resultados da calibração das vazões observadas e simuladas para o posto Ponte da Taquara (Figura 16), pode-se verificar uma boa distribuição do hidrograma com relação aos dados observados, apresentando COE = 0,02, classificado como muito ruim, e $R^2 = 0,74$, definido como bom, segundo Moriasi et al. (2007). Os resultados mostram que a calibração desse posto teve o pior grau de ajuste em relação aos demais postos.

Figura 16 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1978 a 1998, para o posto Ponte da Taquara (calibração).



Nessa figura são apresentadas as variações dos dados simulados em relação à vazão observada. Pode-se notar que o modelo acompanhou os picos de vazão, entretanto, o modelo não conseguiu representar satisfatoriamente as vazões mínimas, apesar da aproximação do R^2 . Pode-se notar ainda um pequeno retardo da vazão simulada, assim como alguns dados de alta e baixa vazão. Este pequeno retardo pode estar relacionado aos tipos de cobertura vegetal, pois esses alteram a velocidade do escoamento superficial. Possivelmente, tenha sido utilizada no modelo uma cobertura vegetal além do período normal de crescimento vegetativo, ou uma cobertura vegetal em local com pouca vegetação, promovendo com isso um retardo da vazão simulada pelo modelo.

De acordo com Fernandes (2012), é possível que desmatamentos ocorridos tenham influenciado a cobertura do solo, ou o mapa de cobertura vegetal utilizado neste estudo não represente a realidade atual da bacia. Problema que ocorre em muitos estudos de monitoramento das bacias hidrográficas brasileiras devido à falta de dados atualizados.

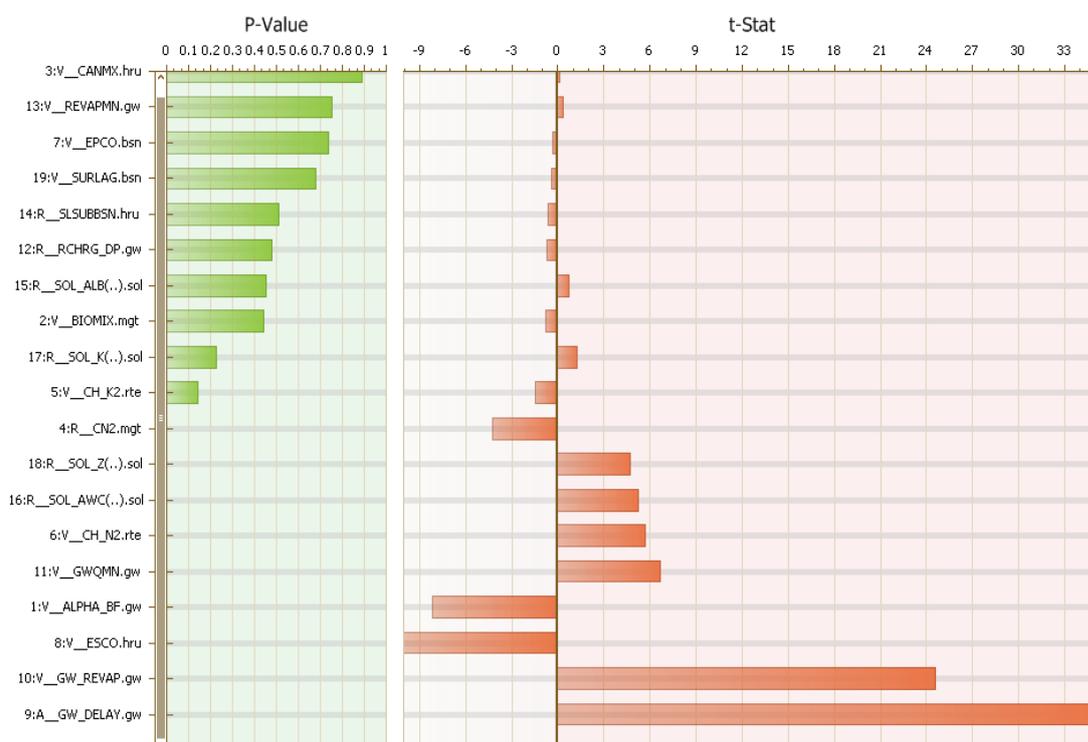
Além disso, o retardamento do escoamento pode estar relacionado com a condição de umidade antecedente do solo que possibilita justificar uma variação nos valores do escoamento superficial, tendo em vista que na escala do fator CN, a umidade antecedente é levada em consideração. Todavia, como os valores de CN utilizados estão atrelados em grande parte às condições dos solos americanos, portanto, diferente das condições dos solos brasileiros, isto poderia ocasionar valores inadequados na determinação do CN, causando assim uma superestimação ou subestimação do

escoamento e vazão, evidenciando com isso a elevada sensibilidade do modelo com relação aos valores de CN.

Saleh e Du (2004) apontam que uma possível limitação do modelo em prever a vazão de forma precisa pode ser atribuída ao fato do uso do Método da Curva Número (CN), uma vez que a aplicação desse método não leva em consideração nos cálculos a duração e a intensidade da chuva, apenas o volume total precipitado.

No que tange a variabilidade dos parâmetros mais sensíveis utilizados na calibração do posto Pari, este pode ser conferido na Figura 17. A análise de sensibilidade individual foi conduzida para a função estatística de Nash- Sutcliffe, fornecida pelo SWAT-CUP, assim como o P-value e o t-start, apresentados na Figura 20. Percebe-se que os parâmetros mais sensíveis foram os mesmo obtidos na calibração dos postos Porto das Andorinhas e Pari, porém, houve uma maior variabilidade dos dados obtida no ajuste da vazão no posto Ponte da Taquara.

Figura 17 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, para o posto Ponte da Taquara.



Analisando o t-stat, possibilitou indicar o grau da sensibilidade, onde quanto maior seu valor absoluto mais sensível o parâmetro será, conforme relatado por

Abbaspour (2011). Para o posto Ponte da Taquara foi possível observar que os com maior sensibilidade foram: ALPHA_BF, CN2, CH_N2, ESCO, GW_DELAY, GW_REVAP, GWQMN, SOL_AWC e SOL_K.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros mais sensíveis durante a calibração, seus respectivos valores mínimos e máximos e os valores ajustados para os três postos pluviométricos utilizados neste estudo.

Tabela 9 – Lista de parâmetros mais sensíveis durante a calibração, faixa de variação e valores otimizados.

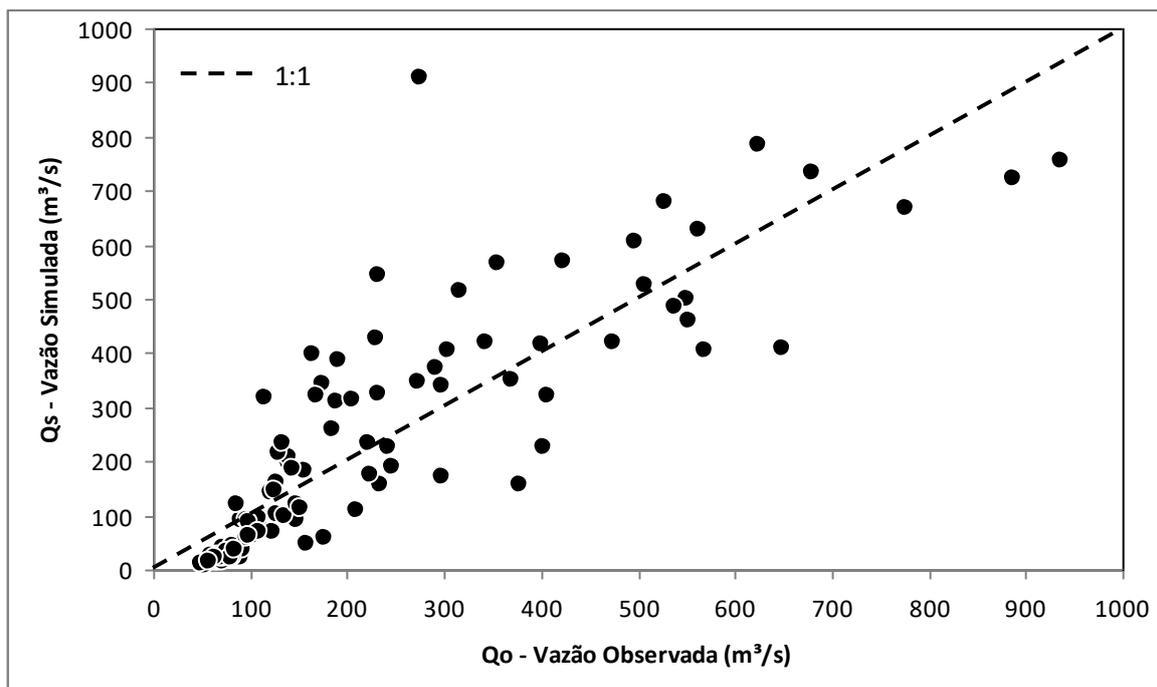
Parâmetros	Faixa de Variação		Valores ajustados		
	Valor mínimo	Valor máximo	Porto das Andorinhas	Pari	Ponte de Taquara
ALPHA_BF	0	1	0,023	0,671	0,005
BIOMIX	0	1	0,893	0,139	0,573
CANMX	2	5	4,241	2,915	2,453
CN2	-0,1	0,1	0,0354	-0,0978	-0,0106
CH_K2	0	5	1,195	4,415	1,965
CH_N2	0	0,3	0,1743	0,0051	0,2481
EPCO	0	1	0,577	0,839	0,229
ESCO	0,5	1	0,5435	0,9985	0,6865
GW_DELAY	-30	60	45,33	-5,25	-1,83
GW_REVAP	0,02	0,2	0,18614	0,03926	0,15698
GWQMN	0	1000	415	165	839
RCHRG_DP	-0,04	0,05	0,03929	0,02327	-0,01669
REVAPMN	0	10	2,11	2,65	5,51
SLSUBBSN	-0,25	0,25	0,2045	0,0755	-0,0665
SOL_ALB	-0,25	0,25	0,0705	0,2135	0,1955
SOL_AWC	-0,25	0,25	-0,0195	-0,1625	0,1585
SOL_K	-0,25	0,25	0,2085	-0,2465	0,0575
SOL_Z	-0,25	0,25	0,1565	0,1865	0,1585
SURLAG	0	24	1,896	11,304	16,632

4.1.2 Validação do Modelo SWAT

A validação foi realizada no período de 1999 a 2007 seguindo o mesmo procedimento da calibração. A Figura 18 mostra os valores de vazões observadas e simuladas para o posto Porto das Andorinhas. Como pode ser observado, o comportamento gráfico expresso para o primeiro período de análise (1978–1998) se

repete na validação, no qual subestima os valores do fluxo de base e os valores de pico. O valor mínimo registrado para vazão observada foi de 25,73 m³/s enquanto que para a vazão simulada esse valor foi de 51,16 m³/s. Na vazão de pico, o valor máximo observado foi de 313 m³/s, já na simulação esse valor chegou a 331 m³/s.

Figura 18 – Relação entre as vazões observadas e simuladas no período de 1999 a 2007, para o posto Porto das Andorinhas (validação).



O COE obtido foi de 0,65 e o $R^2 = 0,85$, superando o esperado para a validação e sendo considerado satisfatório, segundo classificação de Moriasi et. al (2007). Os mesmos parâmetros otimizados utilizados na calibração foram aplicados na validação do modelo.

A Figura 19 mostra os valores de vazões observadas e simuladas para o posto Pari. Nota-se uma grande dispersão entre os dados observados e simulados de vazão. Isso se refletiu nos testes de desempenho, com $COE = 0,30$ e $R^2 = 0,57$. Apesar do COE não ter atingido valores satisfatórios (superior ou igual a 0,6) há um bom ajuste no comportamento da vazão simulada, pois ela se aproxima mais do observado (Figura 20).

O valor médio registrado para vazão observada no período de validação foi de 91 m³/s, enquanto que para a simulada foi de 118 m³/s, ou seja, o modelo superestimou a vazão para esse período. Na vazão de pico, o valor máximo observado foi de 312 m³/s, já na simulação esse valor chegou a 331 m³/s.

Figura 19 – Relação entre as vazões observadas e simuladas no período de 1999 a 2007, para o posto Pari (validação).

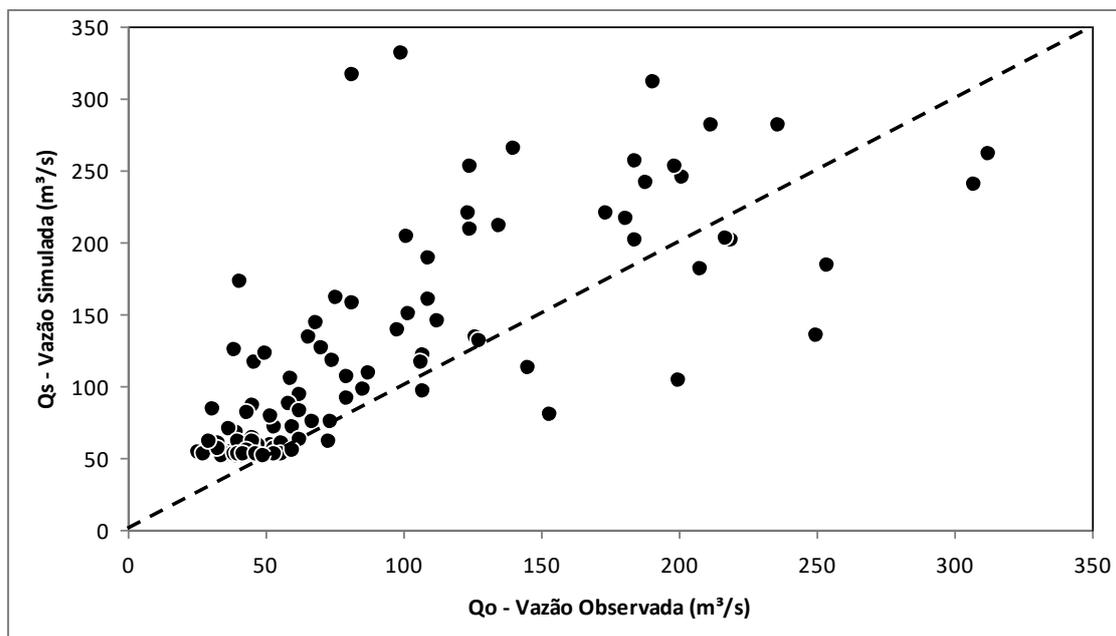
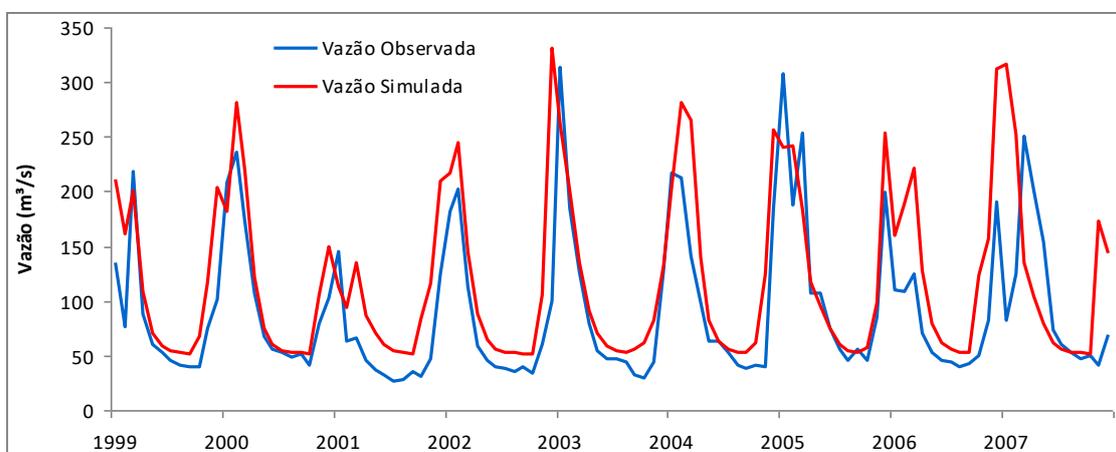


Figura 20 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1999 a 2007, para o posto Pari (validação).

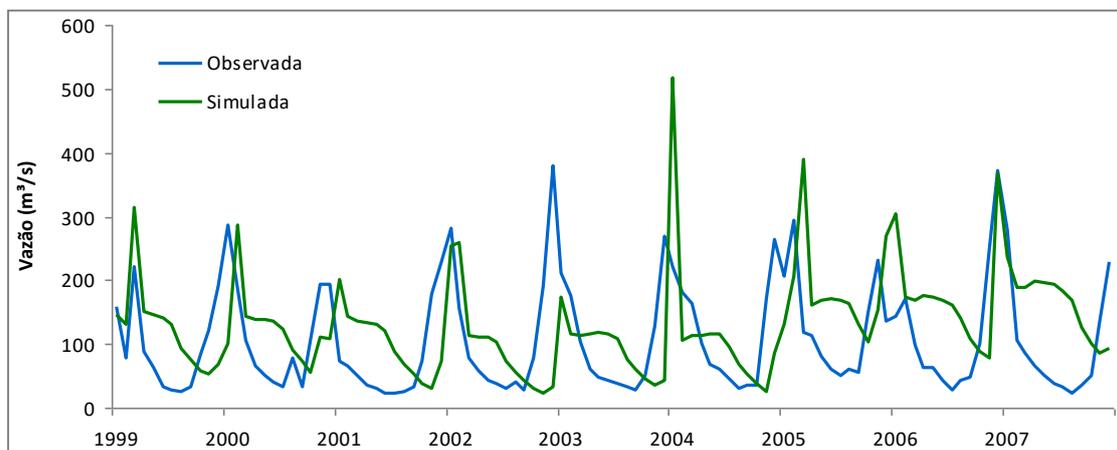


A Figura 21 apresenta os valores de vazões observadas e simuladas para o posto Ponte da Taquara. Pode-se notar que assim como no processo de calibração, os resultados desse posto foram os piores também na validação, pois o modelo não foi eficaz no ajuste das vazões mínimas que ocorreram entre 1999 e 2007. Os resultados obtidos para o COE e o R^2 foram de -0,05 e 0,24, respectivamente.

O valor médio registrado para vazão observada no período de validação foi de $105 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que para a simulada foi de $132 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, o modelo superestimou

a vazão para esse período. Na vazão de pico, o valor máximo observado foi de 378 m³/s, já na simulação esse valor chegou a 518 m³/s, i.e., um aumento superior a 73%.

Figura 21 – Hidrogramas observado e simulado no período de 1999 a 2007, para o posto Ponte da Taquara (validação).



Esses resultados apontam que o modelo foi capaz de simular com uma boa eficiência parte dos eventos, mesmo tendo superestimado e ou subestimado alguns períodos da série, especialmente durante a validação. Estudos anteriores mostram que resultados inferiores na validação em relação à calibração são recorrentes principalmente dos valores do coeficiente de NS. Dentre esses trabalhos é possível citar Durães et al. (2011), Castro (2013).

Outro fator que pode influenciar a qualidade dos resultados é a carência de dados observados para a área de estudo desta pesquisa, sendo necessária a utilização de alternativas para aplicação do modelo que exige uma série bastante complexa de dados. No caso deste estudo, a totalidade dos dados foi obtida através de dados de sensores remotos e SIG devido à inviabilidade de realização de aferições em campo em virtude da extensão da área em estudo. Esses dados influenciam diretamente nos cálculos e rotinas do modelo podendo ter sido um dos fatores que contribuíram para os resultados insatisfatórios das simulações após a validação.

Também se considera que a deficiência nas séries temporais de precipitação e vazão coletadas influenciaram negativamente os resultados finais uma vez que possuíam inúmeras falhas com vários dias e/ou meses consecutivos sem registro de dados que precisaram ser preenchidos a partir da triangulação de dados de outros postos mais

afastados da área de interesse, de forma que talvez não tenham representado adequadamente as condições hidrológicas da bacia.

Ressalta-se ainda que nesta pesquisa não foram considerados os barramentos, reservatórios e a retirada de água para irrigação, o que em geral afeta a resposta da modelagem. Outra medida a ser tomada para obtenção de resultados mais satisfatórios seria a modelagem por sub-bacia com uma série temporal menor no passo de tempo diário ou utilizando-se de outras fontes de dados fluviométricos e pluviométricos com séries mais consistentes e com menos erros.

4.2 Análises de Tendências e Correlação Chuva-Vazão

As séries de precipitação e vazão foram escolhidas pela existência de dados completos no período de estudo, entre 1978 a 1990. Para realização das análises, foram aplicados diversos procedimentos por meio de planilhas do Microsoft Excel, usando recursos de formatação, funções aritméticas, estatísticas, gráficas, dentre outras.

Uma avaliação preliminar dos dados estatísticos de Mann-Kendall e Sen mostrou uma tendência negativa nos dados de precipitação e vazão de toda área da bacia, como apresentado nas Figuras 22 e 23.

Os dois gráficos acima mostram um comportamento semelhante com as máximas ocorrendo em 1983 e as mínimas em 1990. Entretanto, percebeu-se que o coeficiente de angulação calculado pelo teste de Sen foi muito maior para a vazão, em torno de 25°, enquanto para a precipitação o resultado foi de 2°. Essa análise aponta para um possível componente externo que esteja influenciando diretamente o escoamento superficial na área da bacia provavelmente associado à mudança nos padrões de uso do solo que, como foi visto anteriormente, passou por um intenso processo de antropização.

Figura 22 – Gráfico de tendência de precipitação para toda a bacia.

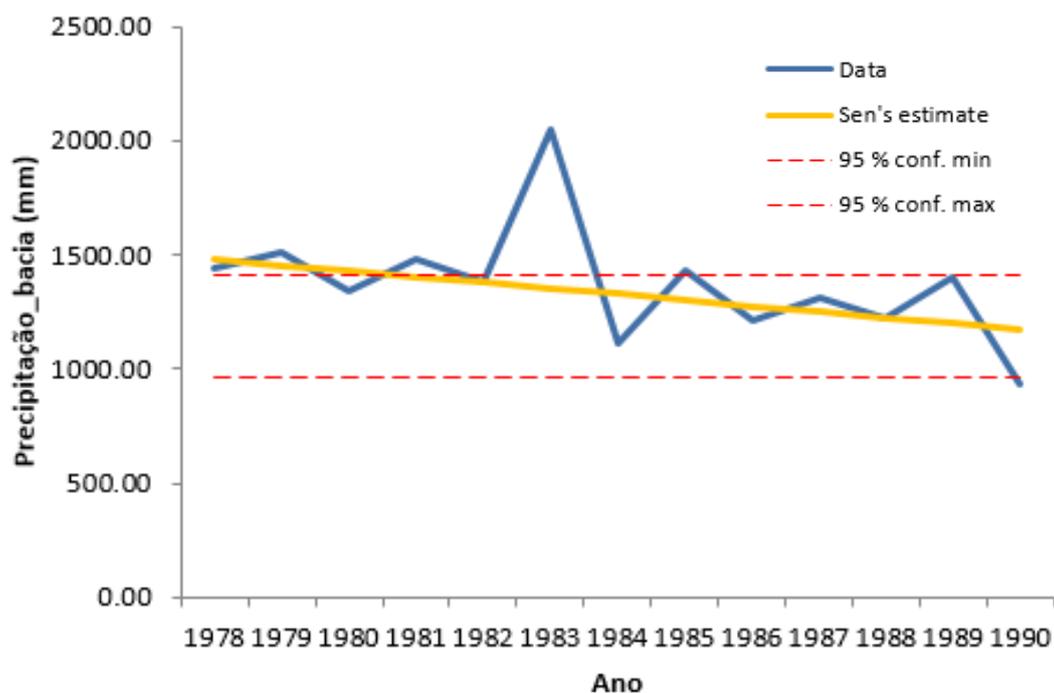
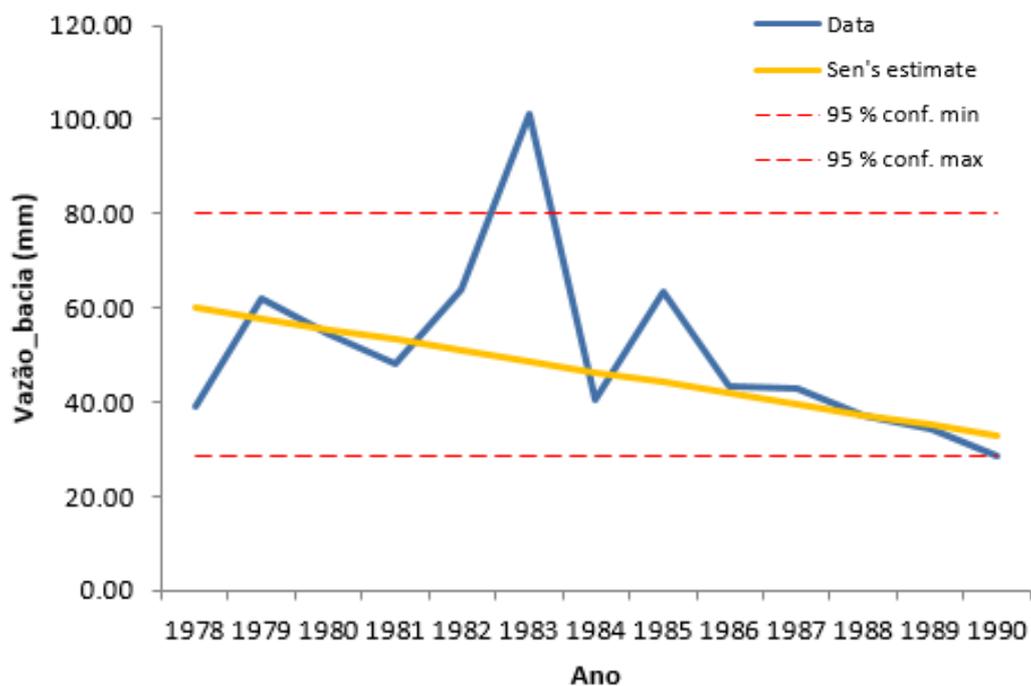


Figura 23 – Gráfico de tendência de vazão para toda a bacia.



Essa diferença também pode ser vista na Tabela 10, abaixo, onde são apresentados os índices de correlação entre os postos de coleta dos dados de precipitação e vazão.

Apesar da baixa correlação, as simulações no SWAT foram feitas com os dados de vazão do posto 1 (Porto das Andorinhas) que dentre os três apresentou a melhor média.

Assim como nos gráficos anteriores, as análises individuais dos doze gráficos das precipitações anuais na área de estudo (Figura 24), detectaram uma diminuição nos regimes pluviométricos, pois, os coeficientes angulares mostraram valores menores do que zero. Entretanto, para a série do posto localizado em São Sebastião do Paraíso, o coeficiente angular aponta para um aumento nos índices de precipitação média.

Tabela 10 – Índice de correlação entre dados de precipitação e vazão.

Postos Pluviométricos	Postos Fluviométricos		
	Porto das Andorinhas	Pari	Ponte da Taquara
Araxá	0,30	0,24	0,24
Bambuí	0,37	0,26	0,32
Barbacena	0,36	0,21	0,21
Belo horizonte	0,39	0,31	0,26
Florestal	0,40	0,31	0,27
Ibirité	0,38	0,30	0,26
João pinheiro	0,33	0,34	0,26
Patos de Minas	0,33	0,33	0,26
Pirapora	0,30	0,31	0,24
Pompeu	0,38	0,32	0,27
São Sebastião do Paraíso	0,20	0,13	0,13
Sete Lagoas	0,39	0,31	0,25

Figura 24 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados pluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95%.

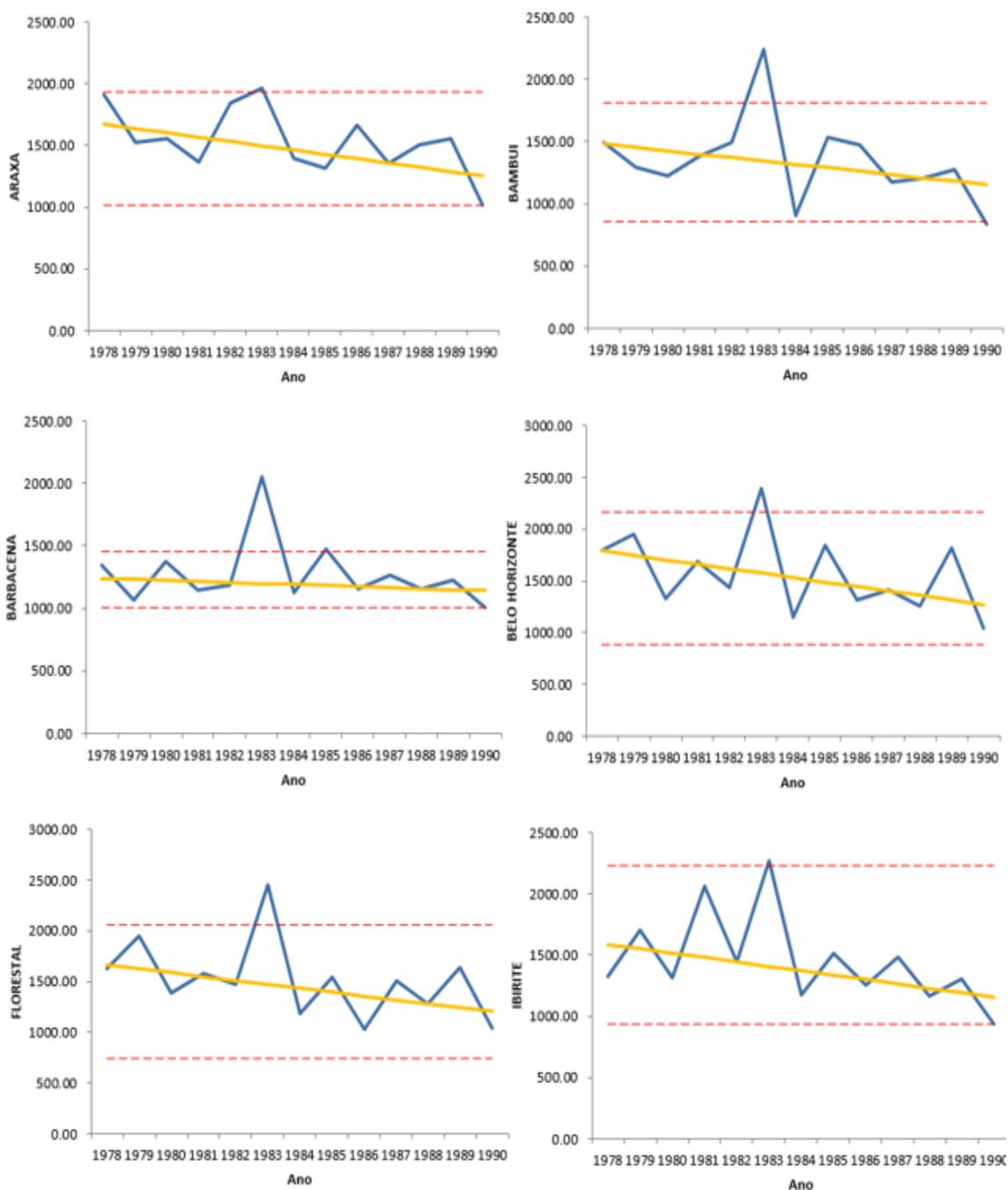
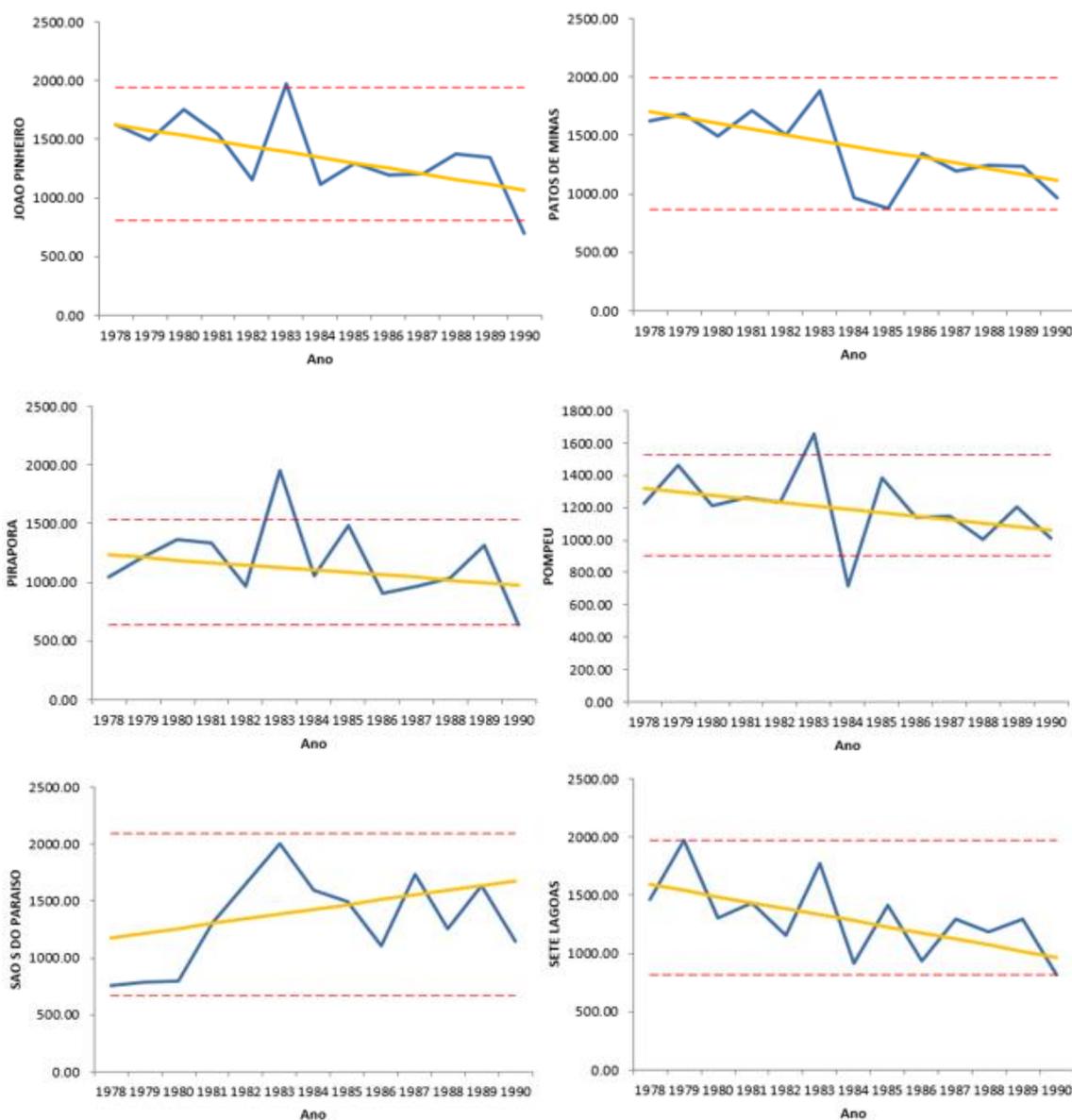


Figura 24 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados pluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95%. (continuação)



Mesmo com tendências decrescentes, os gráficos acima mostram que os valores máximos e mínimos das precipitações não sofrem variação espacial. Quando analisados os índices dos diferentes postos, ao longo de toda a série temporal a precipitação máxima não ultrapassa os 2100 mm (aproximadamente) e as mínimas não são inferiores a 600 mm (aproximadamente).

Para os gráficos de vazão, foram utilizados três postos localizados a montante da Usina Hidroelétrica e Reservatório de Três Marias, são eles: Pari, Porto das Andorinhas e Ponte de Taquara (Figura 25). Assim como os anteriores (Figura 26), os

gráficos de vazão apresentam uma tendência decrescente, todavia com coeficientes angulares de redução (teste de Sen) maiores do que os vistos para a precipitação.

Outro fato importante a ser destacado é que, apesar da baixa correlação estatística, os gráficos pluviométricos e fluviométricos apresentam um comportamento semelhante, com picos máximos no ano de 1983 e mínimos em 1990, ambos fora do intervalo de confiança (IC) de 95% (tracejado vermelho, Figura 25).

Figura 25 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados fluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95%.

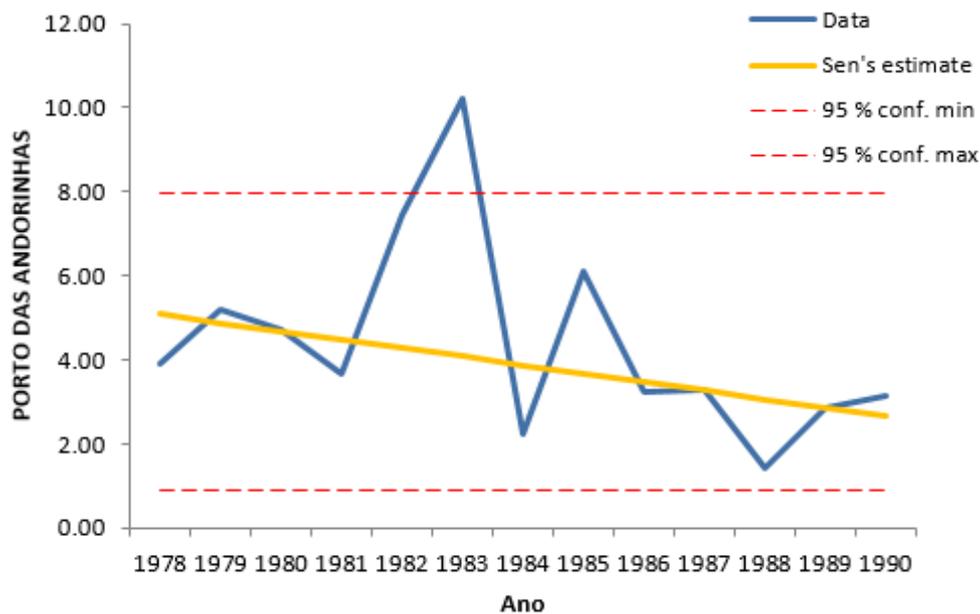
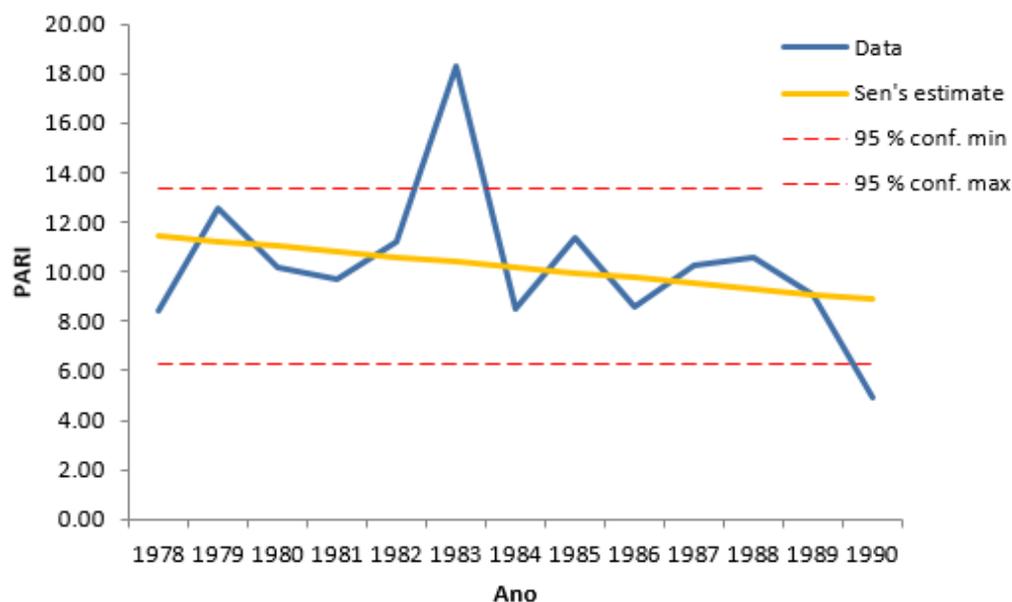
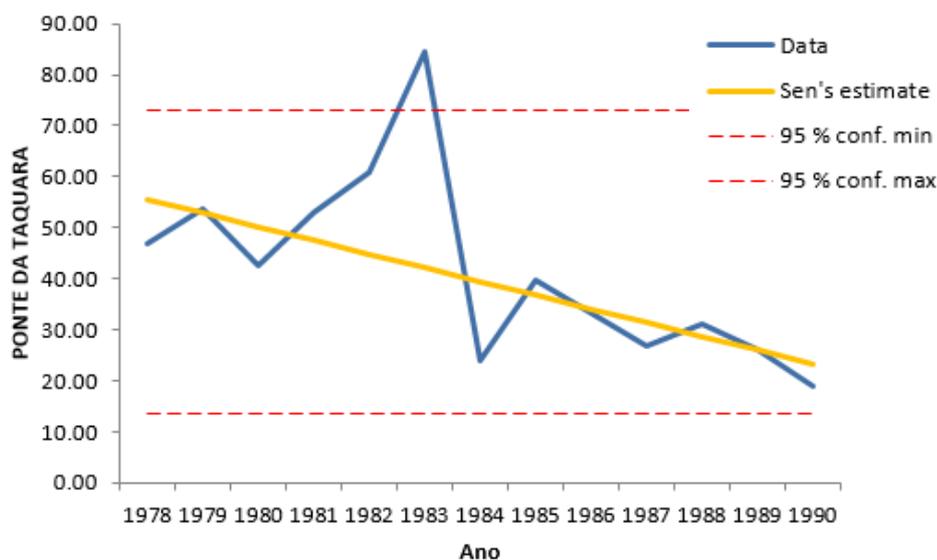


Figura 255 – Gráficos de tendência nos postos de coleta de dados fluviométricos. Em amarelo, teste de tendência de Sen; em azul, dados observados de precipitação; em vermelho tracejado, intervalos de confiança de 95% (continuação).

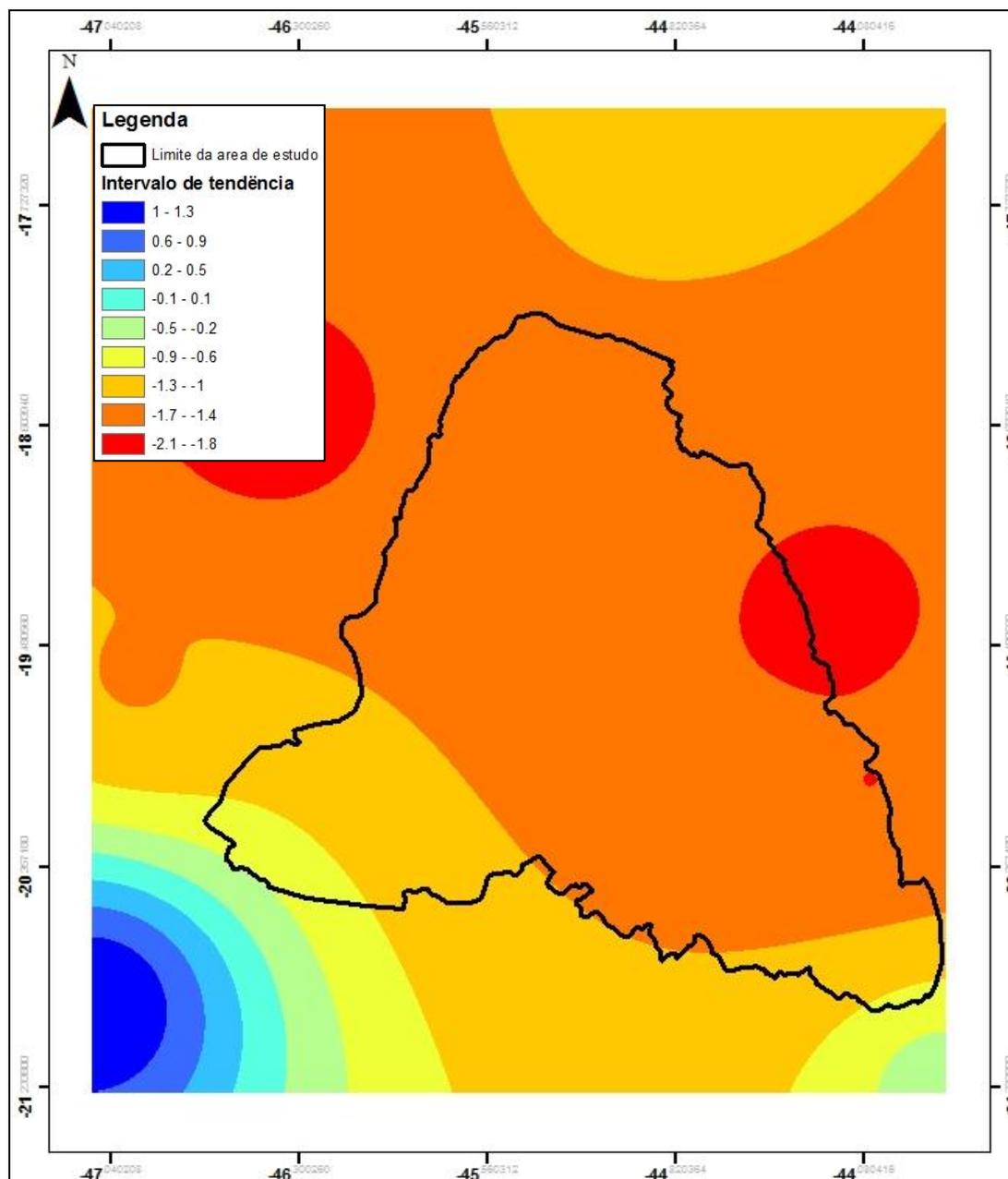


Especialmente tanto as tendências de chuva quanto de vazão melhoram na medida em que se afastam da área da bacia em sentido sudoeste (Figura 26). Em regiões de Cerrado, é comum que séries temporais de precipitação apresentem um número significativo de falhas, seja pela escassez de dados observados ou pelos longos períodos de seca a que são submetidas.

Portanto conclui-se que existe consistência entre os dados pluviométricos e fluviométricos, ou seja, durante a série temporal, houve um decréscimo na precipitação observada e conseqüentemente na vazão superficial para toda a área da bacia. Além disso, o maior coeficiente angular de declividade apresentado pelas vazões é resultante também de mudanças bruscas nos padrões de uso e ocupação do solo durante o período analisado.

Para melhor compreensão do regime das vazões da bacia do Alto Rio São Francisco, estatísticas descritivas da série mensal de vazão do rio nas estações estudadas foram computadas (Tabela 11). Também percebe-se que para as vazões observadas não existe uma similaridade espacial entre os dados coletados que variam significativamente entre os postos de coleta, como apresentado na Tabela 11.

Figura 26 – Distribuição espacial das tendências de precipitação e vazão na área de estudo.



Quanto à significância das tendências, diz-se que nos testes de Mann-Kendall são significativas quando os valores absolutos dos dados ultrapassam os limites do intervalo de confiança (IC) estabelecido. O IC mostra a probabilidade do coeficiente angular da variável encontrar-se no intervalo calculado de 95% dos dados, nesse caso percebe-se que todos os postos tanto pluviométricos quanto fluviométricos, possuem uma tendência significativa para área de estudo.

Tabela 11 – Variabilidade temporal das vazões observadas entre 1978 a 1998 e 1999 a 2007.

Postos	Vazão Média (m ³ /s)		Desvio Padrão		CV	
	1978/1998	1999/2007	1978/1998	1999/2007	1978/1998	1999/2007
Porto das Andorinhas	247,3	220,1	221,0	193,2	0,89	0,88
Pari	113,6	90,9	93,9	65,8	0,83	0,72
Ponte de Taquara	147,0	105,4	114,3	83,4	0,78	0,79

Os resultados mostram uma diminuição das vazões em todos os postos fluviométricos da bacia, com especial destaque para a diminuição de -28,3%, mostrando um sensível declínio das vazões. As análises indicaram que os postos Porto das Andorinhas e Pari apresentaram as maiores vazões médias mensais entre 1978/1998 e Porto das Andorinhas e Ponte de Taquara em 1999/2007.

Os resultados apontam uma diminuição nos dois períodos analisados, e que os postos Ponte de Taquara e Pari foram aqueles que apresentaram as maiores variabilidades temporais, com coeficientes de variação de -28,3% e -19,9%, respectivamente. O menor coeficiente de variação foi de -11% e foi registrado no posto Porto das Andorinhas.

Os resultados do coeficiente de variação apresentaram alta variabilidade anual da vazão no rio durante o período de estudo, principalmente no posto Porto das Andorinhas, que apresentou em ambos os períodos os desvios padrão de 0,89 e 0,88 m³/s. Esses valores obtidos nesse posto podem ser explicados devido ao fato da grande área de drenagem desse posto, possuindo um grande volume de descarga d'água.

4.3 Análise da Variabilidade da Precipitação na Produção de Sedimentos e na Vazão

Analisando a influência da variabilidade da precipitação nos processos hidrossedimentológicos, as Figuras 27a–b mostram a estimativa da produção de sedimentos em dois períodos: (a) 1978 a 1998 e (b) 1999 a 2007. A estimativa da produção de sedimentos foi calculada para toda a série de dados, com exceção dos três primeiros anos de aquecimento do modelo. Verifica-se que a produção sedimentos média na bacia do Alto Rio São Francisco apresenta uma grande variação, pois, nota-se

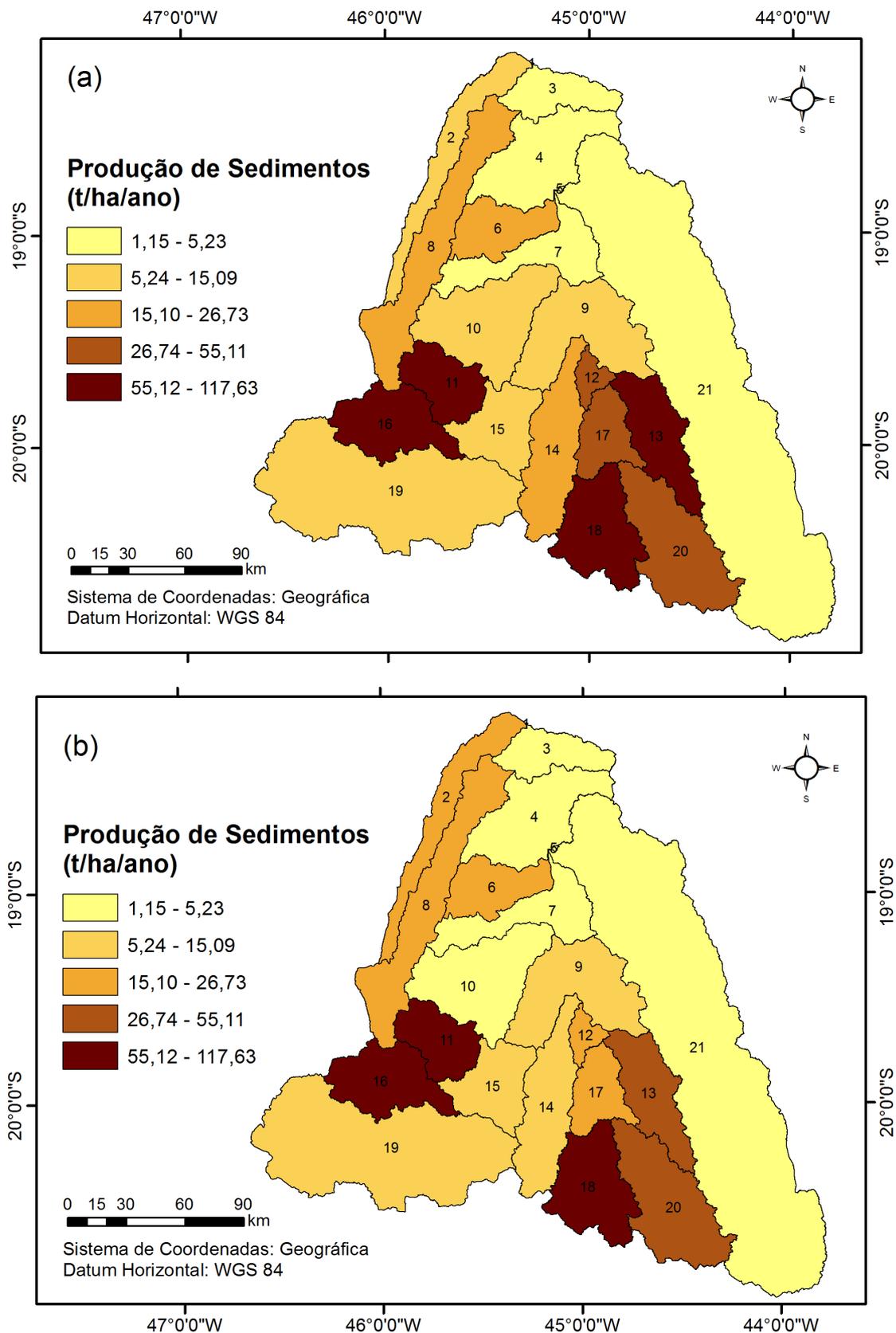
que existe uma sensível variabilidade espacial de produção de sedimentos em ambos os períodos.

Em escala espacial, as sub-bacias localizadas na porção sul da bacia são aquelas que apresentam as maiores produções de sedimentos. No período de 1978 a 1998, as sub-bacias 11, 13, 16 e 18 foram aquelas com as maiores produções de sedimentos 55 a 117 t/ha/ano, devido ao fato da presença de solos do tipo Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolos, além de declividades variando de 800 a mais de 1000%, e apresentando grande parte do território ocupado por pastagens e atividades agrícolas.

Já as sub-bacias localizadas na porção leste apresentam as menores taxas de produção de sedimentos (1 a 5 t/ha/ano). Essas áreas se caracterizam por apresentarem declividades pouco acentuadas e poucos fragmentos de vegetação nativa que protegem os maiores declives.

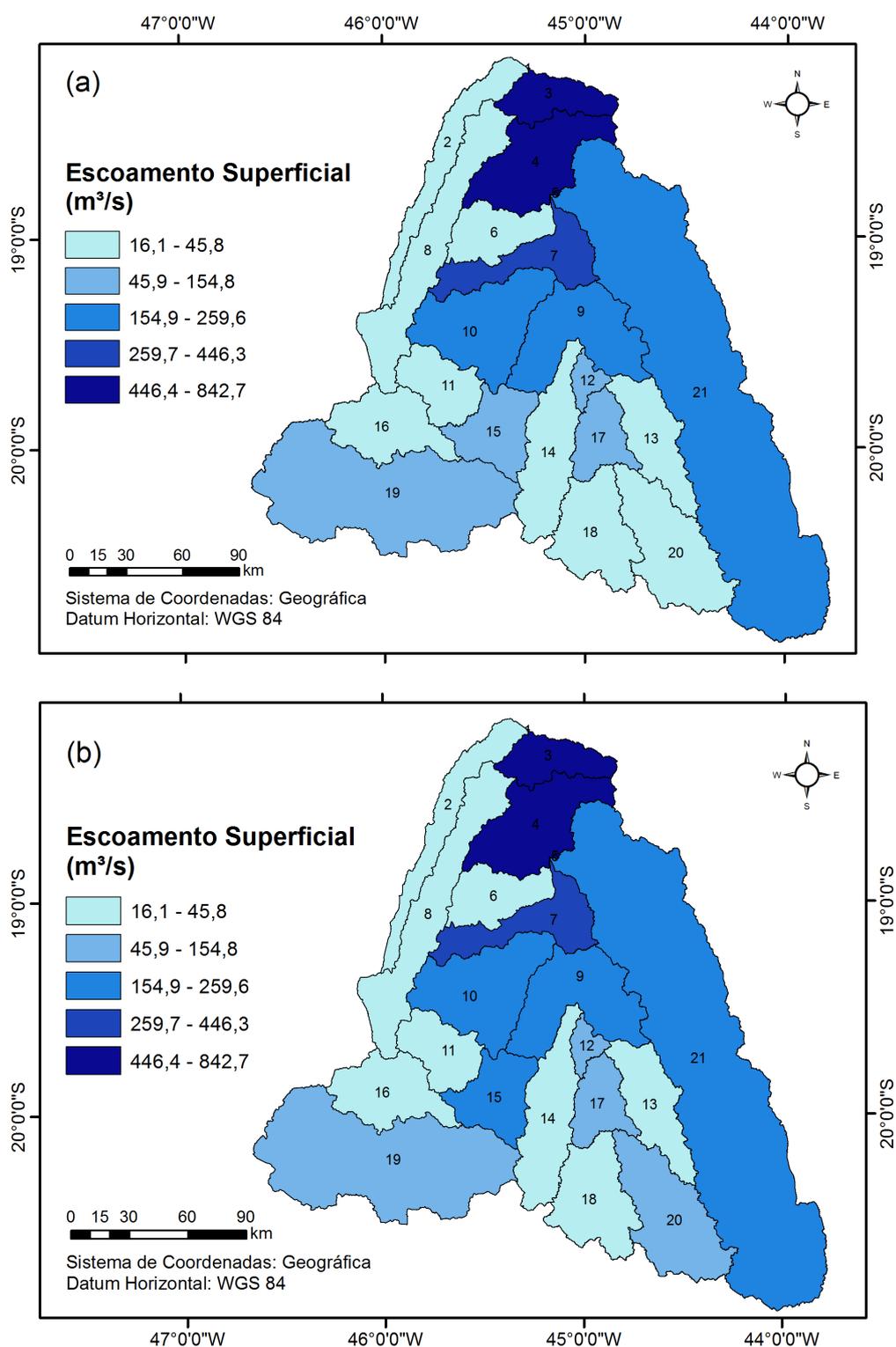
No período de 1999 a 2007, as maiores produções de sedimentos foram obtidas nas sub-bacias 11, 16 e 18, e as com as menores taxas de produção de sedimentos (1 a 5 t/ha/ano) foram as sub-bacias 3, 4, 7, 10 e 21. Como esperado, com a diminuição do volume precipitado sobre a bacia, houve também um decréscimo nas áreas produtoras de sedimentos na bacia. Ressalta-se ainda que, as porções leste e norte da bacia são aquelas áreas onde há menor ocorrência de chuvas na bacia, enquanto nas demais áreas onde há uma maior ocorrência de chuvas existem mais áreas fontes produtoras de sedimentos.

Figura 26 – Produção de sedimentos estimada para as sub-bacias do Alto Rio São Francisco: (a) 1978 a 1998, e (b) 1999 a 2007.



As Figuras 28a–b mostram a estimativa das vazões para dois períodos estudados: (a) 1978 a 1998 e (b) 1999 a 2007. Nota-se que a vazão média na bacia do Alto Rio São Francisco apresentou uma grande variação temporal e espacial.

Figura 27 – Vazão estimada para as sub-bacias do Alto Rio São Francisco: (a) 1978 a 1998, e (b) 1999 a 2007.



Ainda de acordo com a Figura 21, pode-se notar que os menores valores de escoamento (16,1 a 45,8 m³/s) são encontrados na quase totalidade das sub-bacias com rios de primeira ordem, com exceção das sub-bacias 6 e 13, as quais apresentam forte presença de declividades elevadas e grande ocorrência de Argissolos Vermelho, o que somados influenciam em maiores taxas de escoamento superficial em relação às demais sub-bacias localizadas nas regiões de cabeceiras de rios.

Em ambos os períodos estudados, as sub-bacias 3 e 4 representam as áreas com maiores valores de escoamento superficial da bacia, situando-se entre 446 e 842 m³/s. Estas sub-bacias estão localizadas próximas ao exutório da bacia, o que ocasiona a acumulação do escoamento gerado ao longo das sub-bacias à montante desse ponto, contribuindo para o estabelecimento de maiores valores de escoamento superficial nessa região.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os objetivos definidos no início do trabalho, conclui-se que:

- Os testes de correlação chuva-vazão mostram que os dados da série temporal aplicada nesse estudo são pouco consistentes.
- Os coeficientes angulares de declividade evidenciaram uma tendência negativa da precipitação e do escoamento superficial provavelmente resultante das mudanças bruscas nos padrões de uso e ocupação do solo da área durante o período analisado.
- A análise de sensibilidade foi capaz de determinar quais parâmetros foram mais eficientes para a simulação da vazão com o modelo SWAT na bacia do Alto Rio São Francisco.
- Os parâmetros mais sensíveis foram: coeficiente de atraso do escoamento superficial (SURLAG), curva número para condicional de umidade II (CN2), profundidade da água no aquífero para que ocorra a percolação (REVAPMIN), fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC), constante de recessão do fluxo de base (ALFA-BF), e o tempo de fluxo da água subterrânea (GW_DELAY).
- O modelo foi capaz de simular de maneira eficiente parte dos eventos, mesmo tendo superestimado ou subestimado alguns períodos da série. Entretanto, os resultados obtidos na validação foram menos satisfatórios do que os obtidos durante a calibração.
- O modelo conseguiu simular com mais proximidade os eventos de pico, no entanto verificou-se uma tendência em superestimar os períodos de seca durante a calibração e subestimá-los durante a validação. Esses resultados mostram que o modelo não foi representativo para as características climáticas da região.
- O estudo realizado mostrou que o modelo pode ser aplicado para a área, mas ressalta-se que existem limitações nos dados necessários para a modelagem, especialmente de estações pluviométricas e fluviométricas onde alguns postos utilizados para coleta dos dados continham falhas significativas na série temporal com vários dias e meses – consecutivos ou não – que não continham registros de

medições. Nesse caso a modelagem não deve ser considerada como realidade de campo, mas sim como ferramenta de apoio a projetos de gestão na área.

- Para maior eficiência do modelo recomenda-se a inserção de outros dados na simulação como: reservatórios, barramentos e áreas de irrigação; calibração e validação do modelo por sub-bacias em uma série temporal menor com passo de tempo diário; utilização de outras fontes de dados pluviométricos e fluviométricos; implementar a análise de incertezas.

6. REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2012, 103p.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP2009: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 p. 2011.

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

ANDRADE, M.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ARAGÃO, R. **Estimativa dos parâmetros do modelo distribuído WESP com os dados da Bacia Experimental de Sumé-PB**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 2000, 147p.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1091-1102, 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; LIEW, M. W.; KA NNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1-18, 2012.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89. 1998.

ARROIO JUNIOR, P. P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas-SP**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2013. 112p.

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

BELLINASSO, T. B. **Monitoramento hidrossedimentométrico e avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica urbana de encosta**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 341p.

BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y. A.; GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. **Hydrological Earth Systems Science**, 15: 807-818, 2011.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction. **Hydrological Processes**, v. 6, n. 3, p. 279-298, 1992.

BOURAOUI, F.; BENABDALLAH, S.; JRAD, A.; BIDOGLIO, G. Application of the SWAT model on the Medjerda River basin (Tunisia). **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 30, n. 8-10, p. 497-507. 2005.

BRANCO, B. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 1998. 135p.

CAMPOS, R.; FREITAS, P. R. de F. Características granulométricas e descarga de sedimentos em uma bacia urbana: O Rio Maranguapinho no Ceará. **Anais... I Simpósio de recursos hídricos do Norte e Centro-Oeste, Cuiabá, 2007**.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 283-294, 1997.

CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do riacho dos namorados no Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 5, n.1, p. 48-58, 2011.

CARVALHO NETO, J. G. **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2011, 194p.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, 154p..

CASTRO, K. B. de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013, 141p.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **50 Anos de Três Marias – Energia da Gente**. Agosto/Setembro, Ano IX, N.º 91, 2012.

CHOW, V. T. **Handbook of applied hydrology: a Compendium of Water-resources Technology**. New York: McGraw-Hill Book, 1964.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, 1988, 572p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Tese Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p.

DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. **Catena**, v. 37, n. 3, p. 477-493, 1999.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 481-488, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K.C.; YANG, H.; SCHULIN, R. Application of SWAT to quantify internal renewable water resources in Iran. **Hydrological Sciences Journal**, v. 23, p. 486-501, 2009.

FERNANDES, J. G.; GALVINCIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. S. O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 115-126, 2012.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso na Bacia do Lago Descoberto – DF**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2014, 147p.

FERRIGO, S.; TÁVORA, B.E.; MINOTI, R.T.; LIMA, J.E.F.W.; KOIDE, S. (2014). Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em Bacia Hidrográfica no Distrito Federal. **Anais... XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. ABRH: João Pessoa – PB, 1-15.

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

FIGUEIREDO, E. E. Scale effects and land use change impacts in sediment yield modeling in a semi-arid region of Brazil. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, 1998.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**. NSERL Report 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.

FUKUNAGA, D. C. **Estimativa de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012, 98p.

GETECHEW, H. E.; MELESSE, A. M. **The Impact of Land Use Change on the Hydrology of the Angereb Watershed, Ethiopia**. **International Journal of Water Sciences**, v. 1, n. 4, p. 1-7, 2012.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOC, Y. Macro-scale hydrological modelling - a scandinavian experience. **Anais...** International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World', Japan Society of Hydrology and Water Resources, Tokyo, p. 38-45, 2000.

GREEN, W. H; AMPT, G. A. Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water Through Soils. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

GUERRA, A. J. T. **O início do processo erosivo**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, pp. 15-55, 1999.

HORTON, R. E. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460, 1933.

JHA, M.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W.; GIORGI, F.; GU, R.R. Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi River Basin streamflows using SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 4, p. 997-1016, 2006.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 1. ed. Griffin, London, 1975.

KUCZERA, G.; PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. **Journal of Hydrology**, v. 211, n. 1-4, p. 69-85, 1998.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção de estimativa de assoreamento no reservatório do lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2012. 158p.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, ANIBAL, F. da; LIMA, D. C.L. de.; ROCHA, E. O. de. Análise de Sensibilidade e calibração do modelo Swat aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 623-634, 2012.

LELIS, T.A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2011, 164p.

LOPES, V. L.; LANE, L. J. Modeling sedimentation processes in small watersheds. **IAHS Publication**, v. 174, p. 497-508, 1988.

LUBINI, A.; ADAMOWSKI, J. Assessing the Potential Impacts of Four Climate Change Scenarios on the Discharge of the Simiyu River, Tanzania Using the SWAT Model. **International Journal of Water Sciences**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2013.

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

- MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**, 2002, 154p.
- MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 245-259, 1945.
- MARSHALL, L.; NOTT, D.; SHARMA, A. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. **Water Resources Research**, v. 40: W02501, 2004.
- MCKAY, M.D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W.J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. **Technometrics**, v. 21, p. 239-245, 1979.
- MELO NETO, J. O. SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MELLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J. E; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool -Theoretical Documentation: Version 2009**. College Station, Blackland Research Center, Texas A&M University, 647 p. 2009.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005**. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 541p, 2005.
- OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S.; AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p 295-309. 2006.
- PEREIRA, D. R. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2013, 126p.
- PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. **A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais**. In: SCHIAVETTI, A; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de Bacias Hidrográficas – Teorias e Aplicações**. Ilhéus, BA: Editus, 2002. p. 17-35.
- PRUSKI, F. F. **Fatores que interferem na erosão hídrica do solo**. In: PRUSKI, F. F. (Org.) **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed., Editora: UFV, 2009.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. **Infiltration and soil water movement**. In: Handbook of Hydrology. McGRAW-HILL, 2. ed, p. 5.1-5.51, 1993.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. **Anais...** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Belo Horizonte, São José dos Campos: INPE, 2003.

SALEH, A.; DU, B. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River watershed in Central Texas. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 4, p. 1039-1049, 2004.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para determinação do excesso de chuva do método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 189p.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Modelling Blue and Green Water Availability in Africa at monthly intervals and sub-basin level. **Water Resources Research**, v. 44, W07406, 2008.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. **EPIC – Erosion productivity impact calculator: Model Documentation**. Washington: U.S: Department of Agriculture, 1990, 145p.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff–erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environment Monitoring and Assessment**, v. 185, p. 953-970, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4. ed., Porto Alegre, 2009.

SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS. **Hydrology**. National Engineering Handbook, USDA, Washington, D.C., 1972.

TAVEIRA, I. M. L. M. **Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação hidrossedimentológica da Bacia Representativa de Sumé com o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, 2012.

TIBEBE, D.; BEWKET, W. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta Watershed, Ethiopia. **Land Degradation & Development**, v. 22, p. 551-564, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 943 p. 2009.

- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: **Revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1998.
- TUNDISI, J.G. **Água no Século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, 2003, 246p.
- UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p. 2009.
- VAN GRIENSVEN, A. **Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005**. Unpublished report, 2006.
- VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. **Geomorphology**, v. 40, p. 123-144, 2001.
- WANG, S.; KANG, S.; ZHANG, LU.; LI, F. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2502-2510, 2008.
- WOOLHISER, D.A.; SMITH, R.E.; GOODRICH, D.C. **Kineros, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual**. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.
- YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.C.; YANG, H. Hydrological Modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical Model Formulation and Bayesian Inference. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 167-182, 2007.
- YOUNG, R. A.; ONSTAD C. A.; BOSCH, D. D. **AGNPS: An Agricultural NonPoint Source Model**. In: SINGH, V. P. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1995.
- ZAPPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Ph.D. Thesis (Natural Science) – Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 2002, 167p.