

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA-PPGEA

Raina Santos Ferreira

**Análise da produção de carga líquida e sólida na bacia do
ribeirão do Gama- DF através do modelo SWAT**

Orientador: Dr. Rogério Elias Soares Uagoda

Brasília
2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA-PPGEA

Raina Santos Ferreira

Análise da produção da carga líquida na bacia do Gama-DF através do modelo SWAT

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, linha de pesquisa Análise de Sistema Naturais, opção Acadêmica.

Aprovado por:

Prof. Dr. Rogério Elias Soares Uagoda
Dep. de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília-DF
(Orientador)

Prof. Dr. Éder de Souza Martins
Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, Brasília-DF

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig, Dep. de Geologia
Dep. de Geologia, Universidade de Brasília, Brasília-DF

Brasília-DF, fevereiro de 2016

SANTOS, RAINA FERREIRA

Análise da produção da carga líquida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT.

(UnB-GEA, Mestre, Geografia, 2016)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia

1. Modelagem hidrológica 2. Moledo SWAT 3. Produção da carga líquida 4. Análise de sensibilidade 5. Calibração 6. Análise espacial

I. Universidade de Brasília-Departamento de Geografia

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Raina Santos Ferreira

*"Todos os vales serão levantados, todos os montes e colinas serão aplanados;
os terrenos acidentados se tornarão planos; as escarpas, serão niveladas.*

A glória do Senhor será revelada e, juntos, todos os verão."

Isaías 40:4,5

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e à minha família por sempre estarem ao meu lado. Ao meu pai que me ajudou e sempre esteve a disposição para resolver os problemas comigo, mesmo que não soubesse, procurava saber só para me ajudar, sou extremamente grata por isso, pelo seu esforço e seu interesse nos meus estudos. A minha irmã, que desde quando entrei na universidade, lê meus trabalhos e ajuda a organizá-los, sempre me auxiliando no possível. E a minha mãe, que sempre esteve ao meu lado cuidando de mim, tentando me acalmar nos momentos difíceis e sempre orando por mim pelo o meu sucesso e felicidade. Sou extremamente grata e agradeço a Deus todos os dias pela a família maravilhosa que tenho. Por isso dedico este trabalho à vocês, muito obrigada por tudo!

Agradeço também ao meu orientador Rogério Uagoda, que também me orientou na monografia, além de outros trabalhos que fizemos juntos. Graças ao Professor Rogério, descobri uma área da geografia que eu realmente gosto de estudar e ele também foi a pessoa que mais me incentivou a entrar no mestrado, tive muita sorte de tê-lo em minha vida. Agradeço aos excelentes professores que encontrei no caminho da minha formação acadêmica. Meus sinceros agradecimentos aos Professores Roberto Gomes e Renato Fontes, sempre muito prestativos, exelentes educadores que contribuíram muito na linha de pesquisa que resolvi seguir como profissional, à Professora Selma Regina Maggiotto, que foi importante na obtenção de dados para a realização do meu mestrado, sempre à disposição para tentar me ajudar e aos Professores Henrique Llacer Roig e Éder de Souza Martins por terem aceitando estarem na minha banca de defesa de mestrado. A todos vocês, ficam os meus sinceros agradecimentos.

Gostaria de agradecer também as amizades que fiz durante a vida. Aos meus amigos de Recife, que mesmo distante, ainda os guardo no coração com um carinho muito grande por todos vocês, em especial para George Junior, Maria Silva, Janis Joplim, Heliana Nascimento, Isis Vilas Boas, Raysa Mazó, Juliana Trajano e Eveny Emidio. A todos vocês, muito obrigada! Agradeço também ao carinho sincero e a amizade verdadeira dos meus amigos do Colégio Militar de Brasília: Rafaela Alves, Bianca Dorneles, Levi Sena e Marcos Lima, que, assim como os meus familiares,

escutaram todas as minhas reclamações e meus pensamentos sobre o trabalho. Mesmo não fazendo idéia do que se tratava, estavam ao meu lado para me escutar e me acalmar. Agradeço também as amizades feitas durante o período de graduação e mestrado: Andressa Priscilla, Lucas Garcia, Lucas Lima, Luana Santos, Gabriel Araújo, Gustavo Almeida, Hygor Viana, Isabela Catarina, Renan Smith, Ana Clara e Rogério Vidal. Eles podem não saber, mais eu tenho um pedaço de cada um em minha personalidade, agradeço muito a Deus pelos amigos que conquistei e, a cada dia que passa, venho contruindo e fortalecendo esse laço de amizade.

Agradeço também à CAESB, ICEA, INMET, IBGE, EMBRAPA, TERRACAP e UnB pela disponibilização dos dados e por fazerem parte de muitas etapas desse trabalho. E por fim, mas não menos importante, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento das atividades do mestrado.

RESUMO

A degradação dos recursos naturais, dentre eles solo e água, tem crescido nas últimas décadas como resultado da ampliação da ocupação da terra pelo homem. A modelagem hídrica vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação dos processos hídricos e para compreender os impactos no meio ambiente, advindos, principalmente, das alterações feitas no uso da terra. Com base nessa premissa, esse trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na predição da vazão na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF.. O modelo SWAT foi calibrado automaticamente, com a utilização do SWATCUP, em relação à vazão média mensal e diária observada da estação fluviométrica da CAESB em um período de 9 anos (2004 a 2012) e depois validado com uma série independente de 2 anos (2013 e 2014). Foi realizada a análise de sensibilidade do modelo a 14 parâmetros escolhidos pelo grau de importância com relação a outros estudos feitos com o modelo no Distrito Federal. De acordo com os resultados da análise de sensibilidade, ESCO (fator de compensação de evaporação do solo) e GW_DELAY (intervalo de tempo para a recarga do aquífero) demonstraram ser os parâmetros mais influentes na simulação da vazão. Índices de desempenho foram aplicados aos resultados do modelo gerando os seguintes números para a avaliação da vazão mensal no período de calibração: Nash-Sutcliffe (ENS)= 0,86 e Índice de correlação(R²)= 0,90 e para os resultados diários: Nash-Sutcliffe (ENS)= 0,53 e Índice de correlação(R²)= 0,63. Esse resultados indicaram que o modelo SWAT é uma ferramenta passível de utilização para a simulação das vazões médias mensais e diárias do ribeirão do Gama após um período de calibração. Com relação a compração feita com dados de sedimento observados e os estimados pelo modelo apenas com a calibração da vazão; tem-se que o modelo SWAT subestimou os valores da produção da carga sólida tanto no período de estiagem quanto no período chuvoso, ou seja, nota-se que há a necessidade da calibração dessa variável.

ABSTRACT

The degradation of natural resources, including soil and water, has grown in recent decades as a result of the expansion of the occupation of the land by the man. The hydrological modeling is becoming an important tool for the assessment of water processes and to understand the impacts on the environment, arising mainly from changes made in land use. Based on this premise, SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) was used for simulation of streamflow yield in the Gama watershed, Federal District/Brazil. First was created a database of hydrological and physiographic data required for modeling. The SWAT model was calibrated automatically, using the SWATCUP, for monthly and daily flow comparing the results with CAESB's flow-station using a 9 years record (2004-2012) and then validated with an independent data set used to calibrate the model, using a 2 years record of historical data (2013-2014). The model sensitivity analysis was performed to 14 parameters chosen by the degree of importance in relation to other studies of the model in the Federal District. According to the results of the sensitivity analysis , ESCO and GW_DELAY proved to be the most influential parameters in the simulation of flow. Efficiency coefficients were applied to the models' results generating the following numbers for streamflow simulation during the calibration period (monthly step): Nash - Sutcliffe (ENS) = 0,86 and correlation index (R2) = 0,90 and (daily step) ENS = 0.53 and R2= 0.64 and during validation, (monthly step): ENS = 0,85 and R2 = 0,94, (daily step): ENS= 0,57 and R2=0,74 was obtained. The results indicated that the SWAT model is a capable tool of use for daily and monthly simulations of Gama's river basin flow. Regarding the comparison made with observed sediment data and estimated by the model only with the calibration of the flow; SWAT model underestimated the solid charge of production values both in the dry season and in the rainy season.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Hidrogeomorfologia	4
3.2. Bacia Hidrográfica	5
3.3. Ciclo Hidrológico	7
3.4. Processos Hidrossedimentológicos.....	9
3.5. Modelos Hidrológicos	11
3.6. Histórico de modelos hidrológicos.....	13
3.7. Modelo SWAT	15
3.8. Caracterização e equacionamento do Modelo SWAT	19
3.8.1. Ciclo Hidrológico.....	21
3.8.2. Método Curva Número (CN).....	21
3.8.3. Vazão de pico de escoamento superficial	25
3.8.4. Retardo de escoamento superficial	28
3.8.5. Percolação.....	30
3.8.6. Escoamento lateral	31
3.8.7. Água subterrânea	32
3.8.8. Evapotranspiração.....	34
3.8.9. Produção de sedimentos	36
3.8.10. Propagação do fluxo de água.....	39
3.8.11. Análise de sensibilidade	41
3.8.12. Calibração e Validação.....	43
3.8.12.1. SUFI-2 - Sequential Uncertainty Fitting	45

4. MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1. Área de Estudo	46
4.2. Materiais Utilizados	58
4.2.1. Sistema Computacional.....	58
4.2.2. Dados de entrada do modelo SWAT	58
4.2.3. Parâmetros Climáticos.....	60
4.2.3.1. Dados Mensais	60
4.2.3.2. Dados diários	63
4.2.4. Parâmetros de solo.....	63
4.2.5. Parâmetros do uso do solo.....	66
4.2.6. Dados de carga líquida e sólida da bacia	70
4.2.7. Delineamento da bacia	70
4.2.8. Criação das HRU's	71
4.2.9. Entrada de dados climáticos.....	73
4.2.10. Definição do período da simulação.....	73
4.2.11. Avaliação de qualidade da simulação.....	74
5. Resultados e Discussão	75
5.1.1. Geoprocessamento e Delineamento da bacia.....	75
5.1.2. Simulação antes da calibração do modelo SWAT	77
5.1.3. Seleção dos Parâmetros para a calibração do modelo	83
5.1.4. Análise de Sensibilidade.....	84
5.1.5. Calibração do modelo SWAT	89
5.1.6. Validação do modelo SWAT	93
5.1.7. Simulação do balanço hídrico da bacia do Gama.....	96
5.1.8. Sedimento Observado X Sedimento estimado apenas com a calibração da vazão no modelo SWAT	100
5.1.9. Espacialização dos dados na bacia do Gama	102

6. CONCLUSÃO.....	109
7. BIBLIOGRAFIA.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do conceito de Hidrogeomorfologia e do objeto de estudo proposto (Fonte: Goerl, 2012).	5
Figura 2 - Representação dos elementos da hidrologia de encostas (Fonte: Villela, 1975).	6
Figura 3 Do ciclo hidrológico, com a quantidade de água correspondente (Fonte: adaptado de Tundisi, 2003).	9
Figura 4 - Dados de entrada no SWAT e o resumo dos processos. Modificado de Carvalho (2014).	19
Figura 5 - Relação do escoamento superficial e da chuva Método CN (SCS) (adaptado de Neitsch et al., 2009).	23
Figura 6 - Influência do parâmetro Surlag e do tempo de concentração na fração de escoamento superficial que vai para os canais (Neitsch, 2005) et al.; (Salles, 2012).	29
Figura 7- Dimensões trapezoidais do canal, conforme considerado pelo SWAT (NEITSCH et al., 2005)	39
Figura 8 - Mapa de localização da bacia do Gama. No topo, carta imagem da bacia do Gama; no canto inferior direito, Bacia do Gama no contexto do Lago Paranoá e do DF; no canto inferior esquerdo, DF no contexto do estado de Goiás.	47
Figura 9 - Uso cobertura do solo da bacia do Gama.	50
Figura 10- Geologia da bacia do Gama (Campos, 2010).	51
Figura 11- Pedologia da bacia do Gama (EMBRAPA, 2004).	52
Figura 12 - a) Declividade da bacia do Gama; b) Hipsometria da bacia do Gama.	53
Figura 13 Comportamento da média mensal de precipitação dos anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada	54
Figura 14 Comportamento da média dos totais anuais de precipitação entre os anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada.	54
Figura 15 Comportamento da média mensal de temperatura máxima (linha contínua) e mínima (linha achurada) dos anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas utilizada.	55
Figura 16 Comportamento da média mensal de umidade relativa dos anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas utilizada.	56

Figura 17 Comprimento da média mensal de radiação solar entre os anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas da FAL.	57
Figura 18 Comportamento da média mensal de velocidade do vento dos anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada.	58
Figura 19 Localização nas estações meteorológicas e fluviométrica utilizadas no modelo SWAT.	60
Figura 20 - Modelo conceitual para representação das camadas de solo no SWAT (Carvalho, 2014).	66
Figura 21 Esquema de formação das HRUs.	71
Figura 22 Mapa de sub-bacias da bacia hidrográfica do Gama gerado pelo modelo SWAT.	76
Figura 23 HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica) geradas pelo modelo SWAT.	76
Figura 24 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT sem calibração e a vazão observada mensal.	77
Figura 25 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT sem calibração e a vazão observada diária.	78
Figura 26 Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 sem calibração.	79
Figura 27 Diagrama de dispersão das vazões diárias observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 sem calibração.	80
Figura 28 Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2004 a 2012 (dados não calibrados).	82
Figura 29 Resultados da análise de sensibilidade para a variável vazão.	87
Figura 30 Gráficos de dispersão, valor do parâmetro versus função objetivo (Nash-Sutcliffe).	88
Figura 31 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada mensal após a calibração.	91
Figura 32 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada diária após a calibração.	91
Figura 33 Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 após a calibração.	92

Figura 34 Diagrama de dispersão das vazões diárias observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 após a calibração.	92
Figura 35 Gráficos da validação mensal da vazão.....	93
Figura 36 Gráficos da validação diária da vazão.....	94
Figura 37 Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de validação mensal.....	95
Figura 38 Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de validação diária.	95
Figura 39 Balanço hídrico simulado pelo SWAT para a bacia do Gama, Distrito Federal.....	97
Figura 40 Gráfico comparativo da carga sedimentar estimada (Sedimento EST) pelo modelo SWAT (apenas com a calibração da vazão) e a carga sedimentar observada pelo amostrador automático (AA) e a de igual incremento e Largura (IIL) em Tons/dia do ano de 2014.....	100
Figura 41 Espacialização da precipitação média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.....	103
Figura 42 Espacialização do escoamento superficial média anual simulado no ano de 2010 na bacia do Gama.....	104
Figura 43 Mapa de uso da terra de 2010 com as subbacia geradas pelo modelo SWAT.....	105
Figura 44 Espacialização da vazão média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.....	106
Figura 45 Espacialização da produção de sedimento média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.....	107
Figura 46 Espacialização da produção de sedimento média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.....	108

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Grupo hidrológico dos solos segundo Skaggs e Khaleel (1982), (Machado 2002).	24
Tabela 2 Dados morfométrico referente a ordem dos canais, número de canais e extensão do canais da bacia do ribeirão do Gama.	48
Tabela 3: Tabela de uso da terra da bacia do ribeirão do Gama.	49
Tabela 4 Tabela da pedologia da bacia do ribeirão do Gama.	51
Tabela 5- Fonte dos dados de entrada para a simulação.	59
Tabela 6- Dados estatísticos de clima a serem informados ao modelo (Carvalho, 2014).	61
Tabela 7 Dados climáticos da estação FAL	62
Tabela 8 Dados climáticos da estação IBGE	62
Tabela 9 Dados climáticos da estação ICEA.....	63
Tabela 10- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 1 (Lima et al., 2013).	64
Tabela 11- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 2 (Lima et al., 2013).	65
Tabela 12- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 3 (Lima et al., 2013).	65
Tabela 13 Dados de entrada de solo da bacia do ribeirão do Gama para o modelo SWAT.	65
Tabela 14- Caracterização dos diferentes usos e ocupação do solo na bacia do Gama. Descrição das classes segundo Castro (2013) e Ferrigo (2014).	67
Tabela 15 - Classificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT.	69
Tabela 16- Reclassificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT.	69
Tabela 17 Períodos utilizados e sua função na modelagem.	73
Tabela 18 Classificação dos resultados da função objetivo de Nash-Sutcliffe (ENS) para modelagem com o SWAT em nível mensal (adaptado de Moriasi et al, 2007) (Carvalho, 2014).	75
Tabela 19 Resultado do Balanço hídrico anual efetuados em pequenas bacias não urbanizadas do Distrito Federal (DF). (Modificado de Lima, 2010)	81
Tabela 20 Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT feitas em Bacias do Distrito Federal, bioma Cerrado.	83
Tabela 21 Parâmetros de calibração relatados em 64 estudos da SWAT de bacias hidrográficas selecionadas. [A] Os números entre parênteses são o número de vezes que o parâmetro foi usado na calibração (modificado de Arnold et al. 2012).	84

Tabela 22 Detalhamento da alteração dos valores dos parâmetros no processo de calibração da bacia do Gama.....	85
Tabela 23 Valores de t-Stat e P-Value obtidos na análise de sensibilidade global. .	87
Tabela 24 Parâmetros, métodos e valores da melhor da calibração encontrada.....	89
Tabela 25 Valores de ENS obtidos em simulações com o SWAT em bacias do Distrito Federal, na simulação de vazão.	96

LISTA DE SIGLAS

ALPHA_BF - Fator alpha do fluxo de base
APA - Área de proteção ambiental
ARS - Agricultural Research Service
CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CH_K2 - Condutividade Hidráulica Efetiva do Canal
CH_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning
CN2 - Curva-número na condição umidade média do solo
COE - Coeficiente de Nash & Sutcliffe
COEA - Coeficiente de Nash & Sutcliffe Alterado
DEEPST - Altura inicial da água no aquífero profundo
DEM - Modelo digital de elevação
DF - Distrito Federal
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENS - Coeficiente de Nash & Sutcliffe
ESCO - Fator de compensação da evaporação so solo
ESRI - Environmental Systems Research Institute
ET - Evapotranspiração
EUA - Estados Unidos da América
FAL - Fazenda Água Limpa
FX - Plintossolo
GLUE - Generalised Likelihood Uncertainty Estimation
GO - Goiás
GW_DELAY - Retardo do escoamento subterrâneo
GW_REVAP - Coeficiente de re-evaporação da água subterrânea
GWQMN - Limite entre a profundidade da água em aquífero raso e a superfície
HBV - Hydrological Simulation Model
HMLE - Heterocedastic Maximum Likelihood Estimator
HRU - Unidade de Resposta Hidrológica
HSPF - Hydrologic Simulation Program-Fortran
ICEA - Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KINEROS - Kinematic Erosion Model
LH - Latin Hypercube
LH/OAT - Latin Hypercube One Factor at a Time
LV - Latossolo Vermelho
LVA - Latossolo Vermelho Amarelo
OAT - One Factor at a Time
PBIAS - Percentual de tendência
MUSLE - Equação Universal de Perda de Solos Modificada
PARASOL - Parameter Solutions Method
R² - Coeficiente de determinação
REVAPMN - Profundidade de água limite no aquífero raso para que ocorro "revap"
SCS - Soil Conservation Service
SHALLST - Altura inicial da água no aquífero raso
SHE - Systeme Hydrologique Europeen
SIG - Sistemas de Informações Geográficas
SOL_AWC - Capacidade de água disponível
SOL_BD - Densidade aparente do solo
SUFI-2 - Sequential Uncertainty Fitting
SURLAG - Tempo de retardo do escoamento superficial
SWAT - Soil and Water Assessment Tool
TOPMODEL - Physically Based Runoff Production Model
USDA - United States Department of Agriculture
USLE - Equação universal de Perdas do solo

1. INTRODUÇÃO

A degradação dos recursos naturais, dentre eles solo e água, tem crescido nas últimas décadas como resultado da ampliação da ocupação da terra pelo homem. A água é um dos recursos naturais que apresenta os mais variados usos nos dias atuais, podendo-se enumerar, por exemplo, seu uso no consumo industrial, na irrigação, no transporte, no abastecimento, dentre outros (BENETTI & BIDONE, 2001)

O desequilíbrio entre a demanda e a disponibilidade de água tem levado à necessidade de se desenvolver uma gestão dos recursos hídricos mais eficiente. Devido a esse desequilíbrio, começam a surgir conflitos entre os diferentes setores, tornando-se fundamental uma gestão que integre os diferentes usuários e que garanta, com vistas ao desenvolvimento sustentável, a disponibilidade do recurso para toda a sociedade (SALLES, 2012).

Uma das principais consequências do uso e manejo da terra inadequados é a erosão, que, por sua vez, gera impactos negativos nos recursos hídricos (MOTA et al., 2008). Sabe-se que o transporte e deslocamento de grandes massas de sedimento podem alterar o ciclo hidrológico da bacia. Os processos hidrológicos afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a decomposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas que, coletivamente, determinam a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (MERCURI, 2009) . Segundo Brooks et al. (1991) os sedimentos são, provavelmente, o mais significativo de todos os poluentes em termos de sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes.

Todo o conjunto de ações voltadas para um gerenciamento mais racional de recursos naturais, pode ser maximizado quando a escala de planejamento é a bacia hidrográfica, pois é possível contemplar os aspectos e processos relacionados com a calha fluvial e os relativos ao uso e ocupação da terra (UZEIKA, 2009). Neste contexto a modelagem hídrica vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação dos processos hídricos. Pode-se usar a modelagem nos estudos de avaliação ambiental, para conjecturar cenários futuros, estimar a magnitude das alterações a serem causadas pelas atividades estabelecidas ou outras a serem desenvolvidas. O uso de modelos

matemáticos permite avaliar e compreender o comportamento dos processos, podendo, assim, contribuir para o planejamento e gerenciamento dos recursos naturais, fornecendo suporte à implementação de práticas conservacionistas e sustentáveis.

No sentido de se obter um gerenciamento racional dos recursos naturais, é extremamente vantajosa a utilização de modelagens. Diversos modelos hídricos foram e vem sendo desenvolvidos no mundo, tais como: SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD et al.1998), SHE (*European Hydrological System*) (ABBOTT et al., 1986), LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*) (BESKOW, 2009), LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) (DEROO; WESSELING; RITSEMA, 1996) TOPMODEL (*Topography-based hydrological Model*) (BEVEN e KIRKBY, 1979) e MGB-IPH (Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

De acordo com Srinivasan & Arnold (1994), o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo matemático de domínio público desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, em conjunto com a Universidade A&M do Texas – TAMU. Esse modelo permite simular diferentes processos físicos na bacia hidrográfica (evaporação, Infiltração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo), com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água em uma bacia hidrográfica. O SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da bacia (DI LUIZIO et al., 2001).

Diversos trabalhos de pesquisa já foram realizados no Brasil que aplicam o modelo SWAT para simulação de bacias hidrográficas em diferentes regiões e com diferentes objetivos. Alguns exemplos são os trabalhos de Durães (2010), Rocha et al. (2010) e Lelis et al. (2012), que foram estudos feitos na região Sudeste, os trabalhos de Lino et al. (2009), Garbossa et al., (2010) e Bumuná et al. (2013), que foram pesquisas feitas na região Sul e os trabalhos Ferrigo (2014), Castro (2013), Salles (2012) e Sarmiento (2010), que foram estudos feitos na região Centro-Oeste.

Este trabalho tem por finalidade fazer a aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica Ribeirão do Gama no Distrito Federal. A escolha dessa bacia deveu-se à existência de diferentes situações de uso, como áreas de preservação (Reserva Ecológica do IBGE, Fazenda Experimental da UnB - Água Limpa e Estação Ecológica do Jardim Botânico), áreas urbanizadas (Setor de Mansões Park Way), áreas agrícolas (Núcleo Rural Vargem Bonita e Núcleo Rural do Córrego Onça), além de Áreas de Relevante Interesse Ecológico (Áreas do Capetinga e do Taquara).

A bacia tem seu exutório no lago Paranoá, representando, assim, importante área de estudo pelo fato de o canal principal estar sofrendo visível dissecação atual, sendo fonte de sedimentos para o assoreamento do lago. Diversos trabalhos já foram e vêm sendo realizados na bacia, como por exemplo, os estudos de Mesquita (2015) e Souza (2015), oferecendo, assim, bases de informações seguras referentes à mensuração plúvio-fluviosedimentométricas. Além disso, a bacia dispõe de diversas estações plúvio-fluviométricas-sedimentológicas da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb e da Agência Nacional de Águas - ANA, sendo duas operadas pelo Laboratório de Geografia Física/LAGEF/UnB, que podem fornecer subsídios para compreender os regimes hídricos e sedimentológicos locais.

2. OBJETIVOS

Avaliar o desempenho do modelo SWAT na predição da vazão na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF.

2.1. Objetivos específicos

- Construir banco de dados da bacia hidrográfica com os parâmetros necessários para a simulação no modelo SWAT.
- Identificar os principais parâmetros do modelo SWAT a serem ajustados no processo de calibração.
- Avaliar se a base de dados obtida é capaz de reproduzir adequadamente a carga líquida observada da bacia do Gama-DF.

- Verificar se a calibração feita unicamente com dados observados de vazão podem gerar bons dados estimado de carga sólida da bacia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Hidrogeomorfologia

Segundo Christofolletti (1980), a geomorfologia é a ciência que estuda as formas de relevo. As formas representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações da paisagem morfológica.

De acordo com Goerl (2012), a geomorfologia moderna subdivide-se em linhas e domínios especializados, tais como: Geomorfologia fluvial, de encosta, tectônica, glacial/periglacial, cárstica, costeira e eólica. Ao analisar as linhas citadas, nota-se que exceto a tectônica e a eólica não possuem a água como um principal elemento. Neste contexto, introduz-se o termo hidrogeomorfologia (geomorfologia+hidrologia), que segundo Scheidegger (1973) designa o estudo de formas de relevo como causada pela ação da água. Por essa definição, a quase totalidade da geomorfologia, está contida na hidrogeomorfologia, pois a água é um dos mais importantes agentes na construção das formas da superfície terrestre.

Okunishi (1991) definiu a hidrogeomorfologia como sendo o estudo das interações entre os processos hidrológicos e geomorfológicos, mais especificamente entre os sistemas fluviais e de vertente. Segundo Goel (2012), a hidrogeomorfologia é uma ciência que busca compreender como os processos hidrológicos contribuem para formação e evolução da paisagem e como as formas de relevo condicionam ou controlam os processos hidrológicos. Nesse contexto é possível ter como exemplo o processo de esculturação de uma vertente. Os processos de transporte sobre as vertentes resultam da erosão que se faz em superfície, em que a movimentação de partículas de sedimentos provocam alterações topográficas que, por sua vez, causam modificações no fluxo de água (OKUNISHI, 1994). Em suma a geomorfologia (formas do relevo) controla os processos hidrológicos; e a hidrologia, por sua vez, controlam a evolução da paisagem das formas de relevo (figura 1).

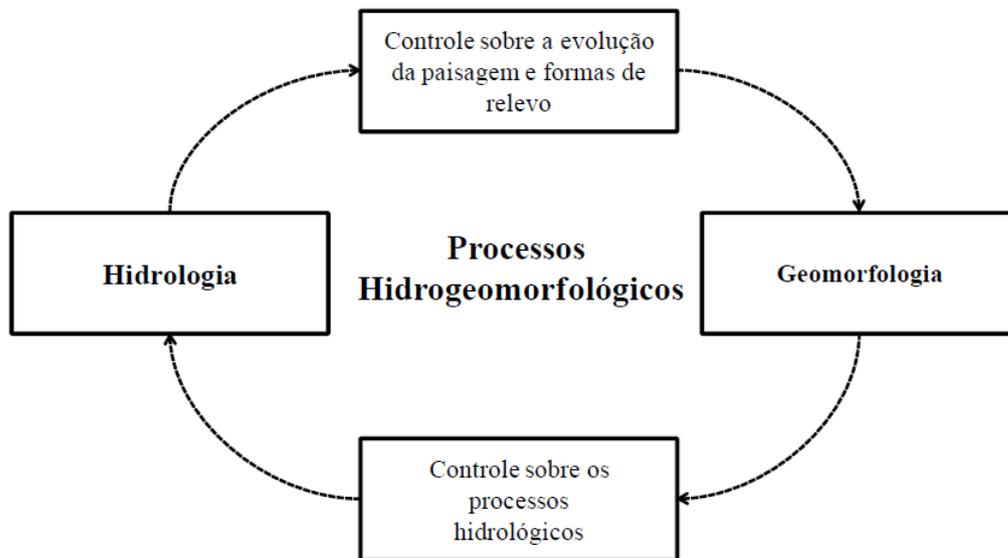


Figura 1 - Diagrama do conceito de Hidrogeomorfologia e do objeto de estudo proposto (Fonte: Goerl, 2012).

3.2. Bacia Hidrográfica

A água é um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, uma vez que existe em praticamente todo o planeta, na atmosfera, na superfície dos continentes, no subsolo, mares e oceanos. Segundo Coelho Netto et al. (1994), a água é um agente de fundamental importância no que diz respeito a modelagem do relevo, controlando tanto a formação como o comportamento mecânico de solos e rochas.

A bacia hidrográfica é uma unidade essencial de estudo da geomorfologia, pois é de fundamental importância para o entendimento dos processos que governam as transformações do relevo. De acordo com Brooks (1991), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural que transforma precipitação em fluxo de água que vai escoar para um único ponto de saída, córregos, rios e, por fim, oceanos. Segundo Silveira et al. (1993), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente. Sendo assim, o papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume d'água

concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma mais distribuída no tempo (TUCCI, 1993).

De acordo com Souza & Fernandes (2000), o termo bacia hidrográfica refere-se a uma compartimentação geográfica natural demarcada por divisores topográficos em que cada bacia se interliga com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia.

A bacia de drenagem é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial. O limite de uma bacia de drenagem é conhecido como divisor de drenagem ou divisor de águas (COELHO NETTO, 1994, p.97).

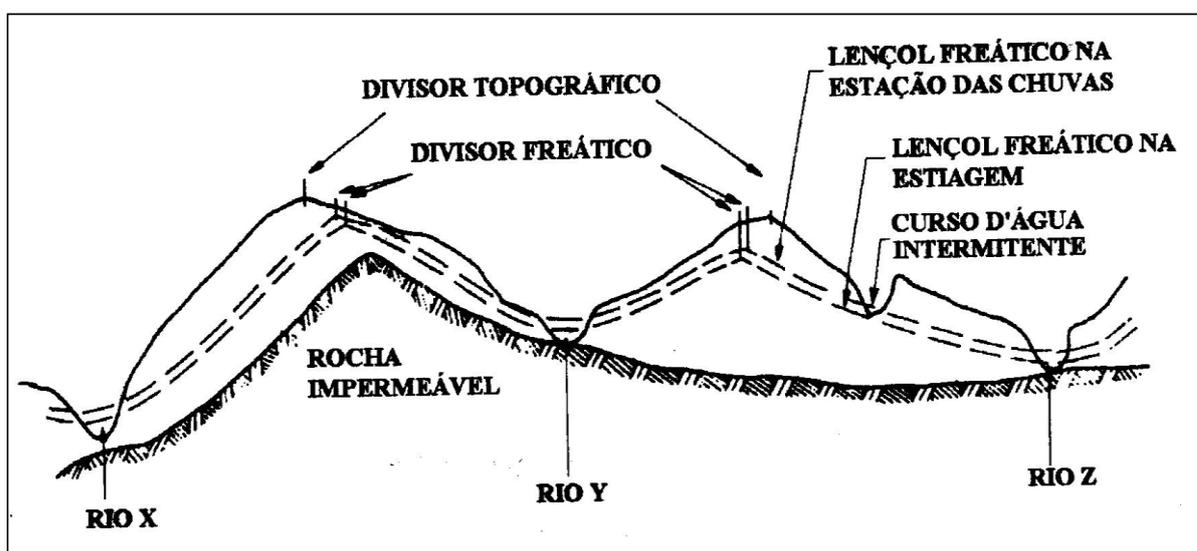


Figura 2 - Representação dos elementos da hidrologia de encostas (Fonte: Villela, 1975).

Lima e Zakia (2000) apresentam ao conceito geomorfológico da bacia hidrográfica uma concepção sistêmica. Segundo os autores a bacia hidrográfica é um sistema geomorfológico aberto. A teoria geral dos sistemas foi introduzida na geomorfologia pelos trabalhos de Strahler (1952). Os sistemas podem ser classificados de acordo com o critério funcional ou através da sua complexidade estrutural. Levando em consideração o critério funcional, Forster, Rapoport e Trucco in Christofletti (1980, p. 5), referem que os sistemas geomorfológicos são: Sistemas isolados e Sistemas não isolados, que se subdividem em fechados e abertos. A bacia hidrográfica se encaixa no

conceito do sistema aberto, ou seja, é um sistema que mantém constante permuta de matéria e energia, tanto recebendo quanto perdendo.

A bacia hidrográfica é um sistema geomorfológico não isolado, aberto, onde estão presentes as variáveis morfológicas, hidrodinâmicas e integrada dos fenômenos. Hack (1960) apresentou uma importante contribuição a geomorfologia ao criar o conceito de "equilíbrio dinâmico". Este autor considera que o relevo é um sistema aberto, no qual ocorrem constantes trocas de energia e matéria com os demais sistemas. Em linhas gerais, materiais, processos e formas de relevo compõem um conjunto autorregulador, sendo as formas o produto do ajustamento de matérias e processos.

Silveira (2000) considerou as vertentes como fontes produtoras de água e sedimentos e a rede de drenagem como transportadora dos mesmos. Segundo Santos (2010), o sistema de uma bacia hidrográfica é dinâmico, nele se dá processos referentes ao ciclo hidrológico e processos de formação de solos, assim como transformações de seus materiais de origem, como também a ação antrópica.

3.3. Ciclo Hidrológico

A água existe na atmosfera como líquido, sólido e gás. A água como líquido é de importância direta aos estudos hidrológicos, estando sob a forma de chuvas na atmosfera; como lagos, rios e oceanos, na superfície; e abaixo da superfície, como água no solo ou aquífero subterrâneo (Coelho Netto et al., 1994).

Segundo Silveira (1993), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação. O movimento da água ocorre de maneira contínua através do ciclo hidrológico. Este contempla diferentes estágios que vão desde a precipitação até águas salinas de mares e oceanos, onde todos os corpos de água são interconectados, desde a atmosfera até o mar. Este ciclo é gerado primordialmente pela ação da energia solar atrelada ao movimento gravitacional e a rotação da terra, sendo caracterizado como um sistema fechado se observado em nível global (SILVEIRA, 2009, XAVIER, 2005;

MEYBECK et al., 1996). A energia calorífica do sol, fundamental ao ciclo hidrológico, somente é aproveitada devido ao efeito estufa natural causado pelo vapor de água e pelo gás carbônico, que impede a perda total do calor emitido pela terra originado pela radiação recebida; assim a atmosfera mantém-se aquecida possibilitando a evaporação e transpirações naturais (TUCCI, 1993).

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 3) está ligado ao movimento e à troca de água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na Hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Este movimento permanente deve-se ao Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e à gravidade, que faz com que a água condensada caia (precipitação) (CARVALHO & BATISTA, 2003).

Pode-se começar a descrever o ciclo hidrológico a partir do vapor de água presente na atmosfera. Parte da água estocada na superfície terrestre é transferida para a baixa atmosfera por evaporação ou evapotranspiração (NETO, 2010). O vapor d'água contido na atmosfera até certa altitude pode ser condensada em função do próprio rebaixamento de temperaturas e também pela presença de micropartículas que funcionam como núcleos de condensação, ocorrendo assim a precipitação (LIMA, 1986).

A precipitação na sua forma mais comum é a chuva. No trajeto em direção à superfície terrestre, a precipitação já sofre evaporação. Caindo sobre um solo com cobertura vegetal e parte do volume d'água sofre interceptação em folhas e caules, de onde evapora. A água que atinge o solo segue diversos caminhos. Como o solo é um meio poroso, há infiltração (enquanto a superfície do solo não se satura); o que não infiltrar nos solos e rochas escoará, gerando, assim, o escoamento superficial. A água permeia o solo, ou rocha, pelo movimento descendente, chamado de percolação. O escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, gerando uma rede de drenagem efêmera que converge para a rede de cursos de águas mais estáveis (córregos, rios, oceanos). Quanto à água infiltrada, depois de preencher o déficit de água do solo, poderá gerar um escoamento subsuperficial (COELHO NETTO et al., 1994; CHRISTOPHERSON, 2012).

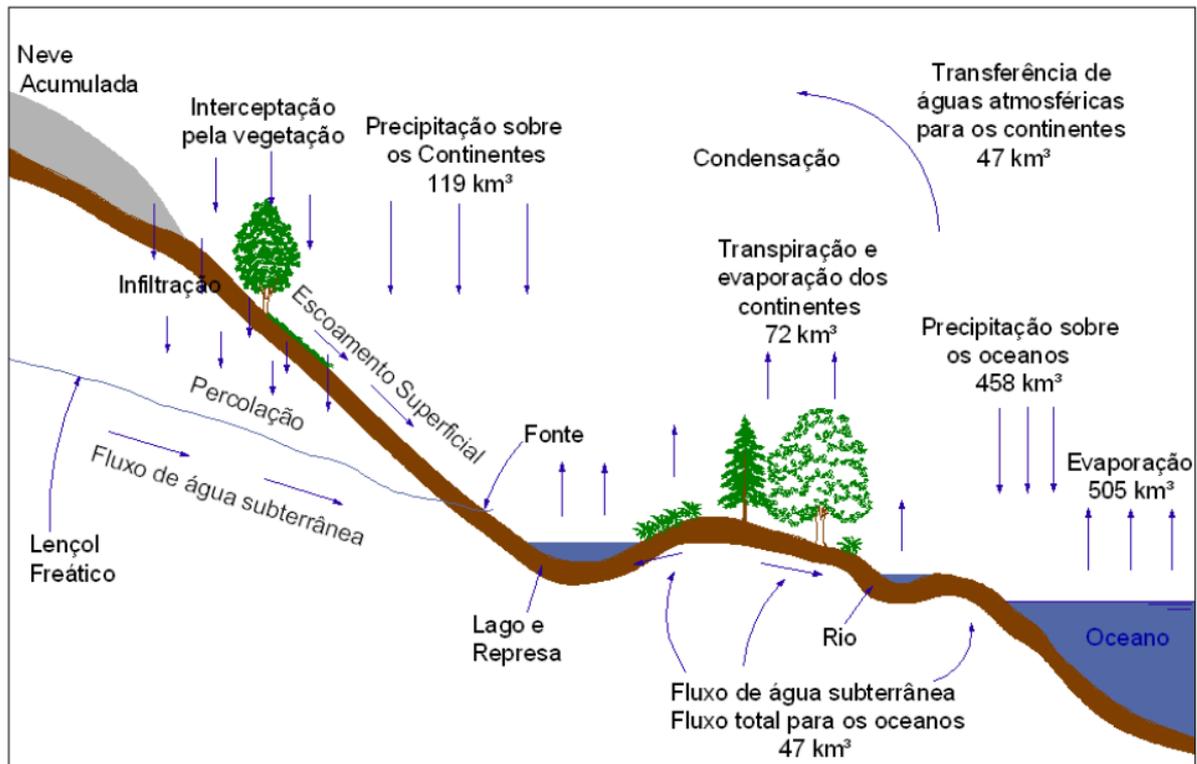


Figura 3 Do ciclo hidrológico, com a quantidade de água correspondente (Fonte: adaptado de Tundisi, 2003).

3.4. Processos Hidrossedimentológicos

A bacia hidrográfica é tomada como a unidade de controle do ciclo hidrológico. Paralelo ao ciclo da água existe o ciclo aberto, totalmente vinculado ao ciclo hidrológico e deste totalmente dependente, que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia, esse ciclo é o hidrossedimentológico (BORDAS e SEMMELMANN, 1993). Segundo Lopes (2008) os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos. O termo sedimento refere-se à partícula depositada, derivada da fragmentação das rochas ou de materiais biológicos, por processo físicos ou químicos, e que é transportada pela água, vento ou gravidade de seu lugar de origem em direção aos rios e aos locais de deposição (CARVALHO, 1994).

Assim como é possível individualizar os principais processos que compõem o ciclo hidrológico (interceptação, evaporação, infiltração, etc), é

também possível identificar os processos que controlam o deslocamento de partículas sólidas, que, em conjunto, constituem o ciclo hidrossedimentológico. Esses processos são desagregação, erosão, transporte, deposição e consolidação (CARVALHO, 1994).

Com o passar do tempo, os processos em ação no ciclo hidrossedimentológico acabam por modelar as feições das bacias hidrográficas (COSTA, 2005). Todas as feições derivam de um demorado processo de adaptação, produto da degradação lenta do relevo sob ação dos processos presentes no ciclo hidrossedimentológico. No sistema fluvial predominam a erosão no trecho superior da rede de drenagem, o transporte no trecho médio e a deposição no curso inferior (BORDAS e SEMMELMANN, 1993).

Os processos hidrossedimentológicos são processos naturais, mas podem ser intensificados devido, principalmente, aos agentes antrópicos. Segundo Mota (1995), as práticas agrícolas inadequadas, a ocupação incorreta das áreas, alterações no escoamento natural das águas, movimentos de terra e impermeabilizações de terrenos são principais causas da erosão acelerada. A erosão dos solos é um processo natural que ocorre devido ao transporte de partículas pelo escoamento da água; portanto, suas taxas podem ser diretamente relacionadas aos componentes de cobertura, uso e ocupação do solo.

A água é um dos principais geradores do desprendimento e transporte de partículas de rochas e solos que irão contribuir para a produção de sedimentos da bacia. Após um evento de chuva, as partículas erodidas das vertentes, adentram nos cursos de água onde, juntamente com os sedimentos provindos da erosão das margens e do leito, são transportadas pelo rio para o exutório da bacia (CARDOSO, 2013). A maior parte do transporte de sedimento ocorre durante o período chuvoso, principalmente durante eventos de precipitação de média e grande intensidade (WOLWAN & MILLER, 1960).

Segundo Brooks et al. (1991), o manejo de bacias hidrográficas é definido como o processo de organizar e orientar o uso da terra e de outros recursos naturais numa bacia hidrográfica, a fim de produzir bens e serviços, sem destruir ou afetar adversamente o solo e a água. A compreensão dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas, possibilita a orientação para gestão de uso e manejo dos recursos naturais.

O sedimento tem se mostrado como um importante indicador da saúde dos ecossistemas aquáticos. O estudo e entendimento dos fatores que integram o processo de erosão do solo e a quantificação das perdas de solo são fundamentais, pois servem como ponto de partida para elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis, sem os efeitos negativos decorrentes da produção, transporte e deposição de sedimentos (BRANCO, 1998).

3.5. Modelos Hidrológicos

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos. Segundo Maidment (1993), um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre.

A simulação hidrológica é influenciada pela heterogeneidade física da bacia hidrográfica e pelos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos, da escala espacial e temporal e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

Segundo Tucci (2005), os modelos hidrológicos são classificados com base em diferentes aspectos tais como: o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Quando se tem a consideração de conceitos de probabilidade na formulação dos modelos devido à aleatoriedade de alguma variável, ou seja, quando a probabilidade de ocorrência de uma variável é considerada, o modelo é dito estocástico; caso contrário, determinístico (RENNÓ e SOARES, 2000).

Os modelos são empíricos, quando utilizam relações baseadas apenas em observações, ou conceituais, quando descrevem todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado (TUCCI, 1998). Os modelos

conceituais procuram retratar os processos físicos, apesar das dificuldades, mas evidentemente apresentam deficiência neste processo. Enquanto isto, um modelo empírico tem seus parâmetros corrigidos para compensar o erro. Ficando consistente para o evento, porém fraco para a simulação de outros eventos. A principal vantagem é permitir melhor extrapolar os eventos, tendo mais consistência metodológica. As desvantagens são de apresentar maiores dificuldades para correções de erros tendenciosos dos dados e da atualização em tempo real (TUCCI, 2005).

Em relação à forma de representação dos dados no tempo, modelos são ditos contínuos quando os fenômenos são contínuos no tempo; quando correm em intervalos determinados são denominados discretos. Variáveis de entrada frequente em modelos, como a precipitação e evapotranspiração, geralmente são registradas discretamente, ou seja, em intervalos de tempo pré-definidos, de maneira que sua variação ao longo do intervalo não é conhecida, o que implica na aceitação de uma discretização temporal relacionada a precisão desejada e à disponibilidade de dados (VIOLA, 2008).

Quanto à forma de representação dos dados no espaço, os modelos podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. Modelos concentrados são aqueles em que os parâmetros variam somente em função do tempo; distribuídos são aqueles que também variam segundo o espaço geográfico. Em modelos concentrados considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada, o que limita a representação da variabilidade espacial das características da bacia, dada a sua heterogeneidade (HARTMANN et al., 1999). Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo, proporcionando, assim, uma melhor descrição da variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada (COLLISCHONN, 2001).

Por fim, os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. Os modelos são estáticos quando um conjunto de dados de entrada produz um único resultado e de saída, oriundo da solução das equações do modelo, e dinâmicos quando utilizam o resultado de uma interação como entrada para a próxima iteração (RENNÓ, 2003)

3.6. Histórico de modelos hidrológicos

De acordo com Tucci (2005), os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos. A modelagem hidrológica surgiu há mais de um século a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos, como, por exemplo, os estudos da relação chuva-vazão que foram iniciados com o desenvolvimento do método racional por Mulvany em 1850.

Segundo Fayal (2008), a partir de 1930, pode-se observar grandes avanços quando agências governamentais de países desenvolvidos começaram a elaborar seus próprios programas de pesquisas hidrológicas. Em 1932 Sherman desenvolveu o hidrograma unitário; em 1933 Horton desenvolveu a teoria da infiltração e em 1941 Gumbel propôs a distribuição de valores extremos para análise de frequência de dados hidrológicos. Os modelos desenvolvidos nesses estudos tinham por objetivo descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico. Em 1939, MacCarthy, baseado no modelo Muskingum Puls sobre o escoamento em reservatório, desenvolveu um modelo de escoamento em rios. Em 1943, correlacionaram os níveis de água subterrânea com a precipitação. Em 1948, Thornthwaite e Penman contribuíram com estudo sobre modelos de evapotranspiração. De acordo com Tucci (2005), até a década de 1950, os métodos utilizados em Hidrologia se limitavam quase sempre a indicadores estatísticos dos processos, com uma tendência geral de desenvolvimento dos modelos ditos empíricos, os quais representam os processos hidrológicos sem levar em conta os fenômenos físicos envolvidos.

A integração de diferentes componentes do ciclo hidrológico e a simulação de praticamente toda a bacia hidrográfica foram possíveis somente com o início da revolução digital na década de 1960 (FERRIGO, 2013). Com o aumento da disponibilidade de computadores, a partir do final da década de 1950, criaram-se condições que propiciaram um acelerado processo de desenvolvimento de modelos hidrológicos baseados em conceitos físicos,

sendo uma alternativa em relação aos modelos até então existentes e que utilizavam somente métodos estocásticos (TUCCI, 1998). Desde então, a modelagem hidrológica tem sido desenvolvida e tem originado modelos diversos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas.

O modelo SWM (*Stanford Watershed Model*), hoje HSPF, desenvolvido por Crawford e Linsley (1966) foi, provavelmente, a primeira tentativa de modelar praticamente todo o ciclo hidrológico, o qual introduziu a avaliação da distribuição espacial da infiltração. Entre os primeiros modelos hidrológicos desenvolvidos também estão o *Stream flow Simulation and Reservoir Regulation Model* – SSARR (ROCKWOOD, 1958), o *Stanford Watershed Model* (CRAWFORD e LINSLEY, 1966) e o *National Weather Service River Forecast System* – NWSRFS (NOAA, 1972). Em 1973, o Centro de Engenharia Hidrológica do *U.S. Army Corps of Engineers* – ACOE desenvolveu o HEC-1 (do inglês *Hydrology Engineering Center*), modelo que simula as cheias a partir de dados de precipitação (BEDIENT & HUBER, 2002).

Desde a década de 1970, tem aumentado gradualmente o desenvolvimento de modelos hidrológicos e a complexidade dos sistemas modelados, paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas computacionais (Ferrigo, 2013). Diversos modelos hídricos foram e vem sendo elaborados no mundo, tais como: SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD et al., 1998); SHE (*European Hydrological System*) (ABBOTT et al., 1986); LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*) (BESKOW, 2009); LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) (ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996); TOPMODEL (*Topography-based hydrological Model*) (BEVEN e KIRKBY, 1979) e MGB-IPH (Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

Um modelo hidrológico abarca um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso da terra e para prever alterações futuras nos ecossistemas (SILVA, 2007). Nesse sentido, os modelos têm sido utilizados para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade relacionados

com o regime hídrico, também têm sido utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas.

3.7. Modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), é um modelo em escala de bacia hidrográfica desenvolvido no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Serviço de Pesquisas Agrícolas (ARS), criado para prever o impacto de práticas de manejo da terra e água, produção de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas complexas com variados solos e condições de uso da terra (NEITSH et al., 2005).

O SWAT incorpora as características de vários modelos do *Agricultural Research Service* (ARS). O modelo SWAT atual é resultado direto do modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) (WILLIAMS et al., 1985; ARNOLD et al., 1990), juntamente com o ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) (ARNOLD et al., 1995 apud GASSMAN et al., 2007), QUAL2E (*River and Stream Water Quality Model*) (BROMNAND E BARNELL, 1987) e CFARM (*Carbon Cycling Routing*) (KEMANIAN, 2011) além de um gerador de clima, uma rotina de transporte de sedimento e um submodelo de água subterrânea (FERRIGO, 2013).

O SWAT foi desenvolvido para prever o impacto das alterações no uso, tipo e manejo do solo. O modelo possui capacidade de desenvolver simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e bactérias, práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água (DHAR, 2009). Graças aos diversos tipos de simulação que o modelo permite realizar, é possível verificar os efeitos resultantes das modificações do uso e da ocupação do solo sobre a produção/contribuição de sedimentos da bacia hidrográfica para o sistema (SRINIVASAN et al., 2002). A eficácia do SWAT na representação da distribuição espacial do uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade e sua diversidade de parâmetros responsáveis pelo controle dos processos do

ciclo hidrológico, torna o modelo um dos mais utilizados no mundo (SILVA et al., 2013).

Desde sua criação no começo da década de 90, o modelo vem sofrendo contínuas revisões e expansões de suas capacidades. Entre as versões já testadas e aprovadas destacam-se: SWAT 94.2, SWAT 96.2, SWAT 98.1, SWAT 99.2, SWAT 2000, SWAT 2005, SWAT 2009 e SWAT 2012. Diferentes versões do ArcSWAT são disponibilizadas gratuitamente compatibilizando-as com as versões do ArcGis adotadas pelo usuário.

O SWAT tem mostrado ser uma ferramenta eficiente para a avaliação dos recursos hídricos. No Brasil o modelo vem sendo amplamente empregado como observado nos trabalhos de Oliveira e Medeiros (1999), Machado (2002), Santos et al., (2006), Lopes (2008), Uzeika (2009), Bonumá (2011), Marchioro (2011), Neto (2011) e Pinto (2013),

O trabalho de Oliveira e Medeiros (1999) foi um dos primeiros registrados no Brasil. O principal objetivo do estudo foi o de testar o potencial da utilização SWAT para a avaliação da bacia hidrográfica do rio Joanes (totalmente inserida no estado da Bahia) em função das alterações no uso do solo. Desde então, o modelo tem sido utilizado em vários estudos nas diversas regiões brasileiras.

Com o modelo SWAT é possível trabalhar com a simulação de cenários fictícios de uso do solo nas bacias hidrográficas. Foi o que propôs Machado (2002), que simulou cenários alternativos de uso e ocupação da terra na microbacia hidrográfica do ribeirão do Marins (Piracicaba, SP) e analisou-os quanto à produção de sedimentos. Foi testado resultados para dois cenários de uso distintos. No cenário 1 foi considerado o uso da terra atual, mas atendendo a duas determinações do código florestal, Leis nº 7803/89 e 7875/89, que estabelece legalmente uma faixa de área que deve ser protegida ao redor de corpos d'água, nascentes e com matas ciliares. No cenário 2 simulou-se a bacia com cobertura alterada de pastagens e florestais. A produção de sedimentos nos dois cenários também foi simulada e os resultados comparados.

No contexto de simulação da produção de sedimentos pelo modelo SWAT, temos também o trabalho de Marchioro (2011), que teve como objetivo analisar a distribuição espacial da produção de sedimentos na bacia do córrego

Santa Maria no município de São José de Ubá (SP) e comparar os resultados de Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) – gerados pelo modelo SWAT com os mensurados na bacia de drenagem durante o período entre dezembro de 2006 e dezembro de 2007. Bonumá (2011) utilizou o modelo SWAT para os processos sedimentológicos e de transferência de fósforo. O principal objetivo desse estudo foi o de avaliar a precisão do modelo SWAT para simular o impacto do manejo agrícola no balanço hídrico, produção de sedimentos e quantidade de fósforo na bacia hidrográfica do Arroio Lino localizado no Sul do Brasil. O diferencial desse trabalho foi uma adaptação feita pela autora no método de cálculo de erosão pelo SWAT, com o objetivo de conseguir uma melhor representação nos processos de deposição de sedimentos nas encostas.

Neto (2011) fez uma simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDEs, de duas pequenas sub-bacias no Cariri Paraibano utilizando o modelo SWAT. O principal objetivo do estudo foi o de avaliar a influência do modelo digital de elevação com diferentes resoluções. Nos últimos cinco anos, estudos começaram a ser realizados no Distrito Federal utilizando o modelo SWAT para diversas aplicações e em diferentes localidades (nas bacias do ribeirão Pípiripau, Rio do Descoberto, Riacho Fundo, Gama, Córrego Capetinga e Rio Jardim).

Carvalho (2010) aplicou o modelo SWAT para estimar a produção de sedimento na sub-bacia do ribeirão Rodear-DF. O modelo sem calibração demonstrou que os resultados não foram capazes de reproduzir a produção de sedimento de forma satisfatória. Com relação aos fatores de produção de água, escoamento superficial e evapotranspiração o modelo apresentou melhores resultados.

Ferrigo (2011) analisou os processos hidrossedimentológicos no córrego Capão Comprido- DF com base na aplicação do modelo SWAT. A Simulação da produção de sedimentos foi feita em três cenários fictícios: (1) sem ação antrópica; (2) atual da bacia; e (3) com a bacia inteiramente ocupada por agricultura e urbanização. Os resultados mostraram que o escoamento superficial apresentou um aumento de 278% e 638% para os cenários 2 e 3 em relação ao 1. A produção de sedimentos apresentou um aumento de 2.514% no cenário 2 e 6.471% no cenário 3, quando comparadas ao 1.

Minoti (2011) avaliou a utilização do modelo SWAT na simulação de processos de poluição difusa nas bacias do Gama e do Bananal. Nas duas bacias o modelo superestimou as vazões nos períodos de cheia e subestimou-as nos períodos de seca. Com relação aos resultados de concentração de fósforo e nitrogênio, o modelo demonstrou acentuada discrepância entre os resultados médios calculados pelo modelo e as concentrações observadas. Como os valores calculados referentes ao escoamento superficial foram mais elevados que os observados, é provável que os valores de cargas de sedimentos tenham sido, também, superestimados. Em função dos dados de escoamento superficial e de vazão terem sido superestimados pelos modelos gerados, não foi possível, em uma primeira aplicação do SWAT, obter resultados que pudessem representar de maneira eficaz as condições qualitativas observadas nas bacias hidrográficas.

Salles (2012) aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau-DF para realizar simulações de vazão. O modelo foi calibrado manualmente em relação à vazão média mensal observada da estação fluviométrica FRINOCAP em um período de dez anos, no período de 1989 a 1998, e depois validado em uma série independente (1999 a 2008). Após a calibração do modelo os resultados obtidos indicaram um bom ajuste entre a vazão média mensal da bacia hidrográfica simulada pelo modelo SWAT em relação aos dados observados. A simulação da vazão média mensal também foi satisfatória no período selecionado para validação do modelo.

Castro (2013) testou a estimativa de vazão na bacia do Alto Rio Jardim-DF utilizando modelo SWAT. A simulação foi elaborada com uma série histórica de dois anos (01/07/2006 a 30/06/2008). Os resultados não foram satisfatórios sem a calibração. A calibração do modelo foi realizada para a vazão diária e de forma manual e, após a calibração, o modelo apresentou boa representatividade da vazão diária da bacia.

Carvalho (2014) utilizou o modelo SWAT para avaliar a simulação da vazão e da descarga sólida em suspensão da bacia do Alto Rio Jardim-DF. A calibração do modelo foi feita utilizando dados obtidos de um linígrafo e de uma curva-chave de sedimentos gerada para essa bacia e os valores de concentração de sedimentos para a construção da curva-chave foram obtidos com uso de um turbidímetro associado a coletas pontuais de água. A

simulação foi feita para um período de quatro anos (2006/2007, 2007/2008, 2011/2012 e 2012/2013). Os resultados mostraram que, apesar do modelo ter simulado bem as vazões, o mesmo não aconteceu com a produção de sedimentos.

3.8. Caracterização e equacionamento do Modelo SWAT

O modelo SWAT é um modelo de parâmetros distribuídos espacialmente e contínuo em um intervalo de tempo que simula os fenômenos físicos do ciclo hidrológico. O SWAT exige informações físicas sobre a bacia e os principais dados de entrada do modelo incluem propriedades do clima, hidrologia, temperatura, nutrientes, sedimentos, pesticidas e manejo solo. Tais especificidades permitem a simulação em bacias sem dados de vazão, erosão e evaporação (NEITSCH et al., 2005). A figura 4 demonstra os dados necessários e o resumo dos processos do modelo SWAT.

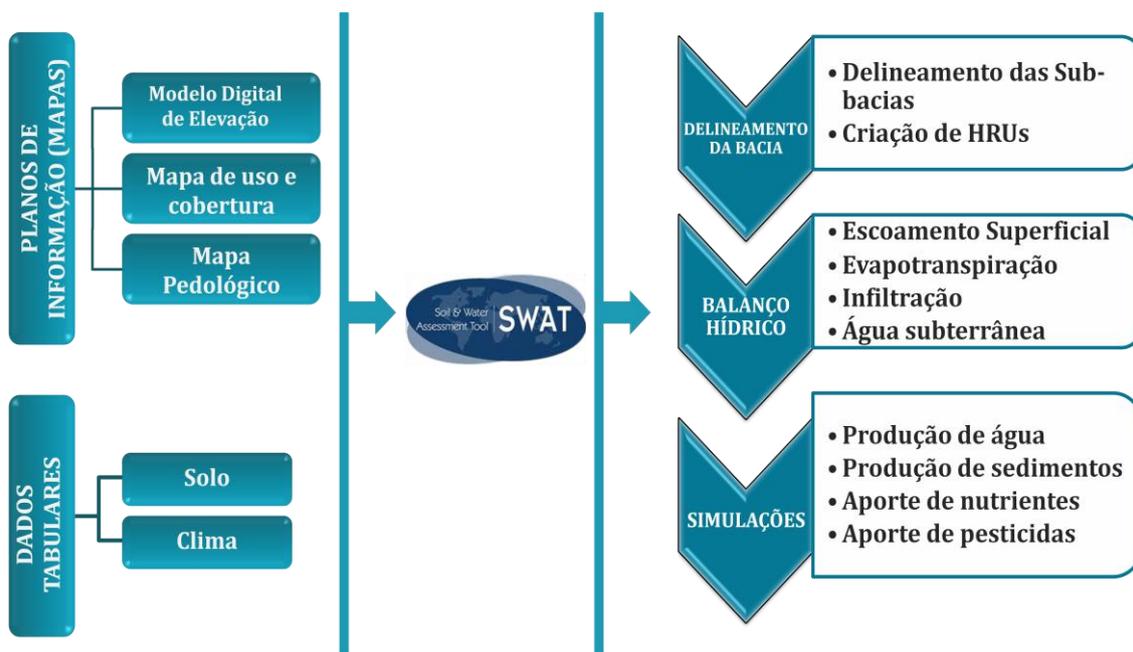


Figura 4 - Dados de entrada no SWAT e o resumo dos processos. Modificado de Carvalho (2014).

A interface ArcSWAT permite que o SWAT funcione acoplado ao ArcGis, constituindo-se em um SIG (CARVALHO, 2014). A união dessas duas tecnologias (modelos hidrológicos e SIGs) é fundamental para o manejo de bacias hidrográficas, visto que com a utilização dos SIGs torna-se possível a

manipulação com maior facilidade dos dados espaciais (MACHADO et al., 2003). A interface SWAT e ArcView traduz os dados geoespaciais com as informações requisitadas pelo modelo para sua correta execução, como também promove a leitura e armazenamento de dados referentes ao clima, solo e uso do solo (CARVALHO, 2014). O SIG apresenta a vantagem de realizar, por meio de sucessivas análises dos dados espaciais, a divisão de grandes áreas heterogêneas em pequenas unidades hidrológicamente homogêneas (PEREIRA, 2013).

No SWAT a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, que podem ser subdivididas em unidades de resposta hidrológica (*Hydrologic Response Units - HRUs*). As HRUs correspondem a uma única combinação de uso do solo, classes de declividade e tipo de solo. As cargas (escoamento, sedimento, nutrientes, etc) transportadas pelo escoamento, são calculadas separadamente para cada HRU e depois somadas para determinar as cargas totais da sub-bacia. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas, possibilita ao modelo refletir diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes usos e solos (MACHADO, 2002).

A concepção utilizada pelo SWAT distingue os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica em duas partes. A primeira é a fase terrestre do ciclo hidrológico e a segunda é a fase aquática. Segundo Neitsch et al. (2005) a fase terrestre do ciclo hidrológico é baseada na equação do balanço hídrico, que é a força responsável por tudo que ocorre na bacia hidrográfica. Nessa fase são definidas as quantidades de água, sedimento, nutrientes e cargas de pesticidas. De acordo com Arnold et al. (1998) na fase aquática estão os processos que se referem ao movimento da água e sedimentos através da rede hídrica, do ponto de lançamento até o exutório da bacia. Para o cálculo de estimativa do escoamento superficial o SWAT fornece os métodos do CN (Curva Número) e o método de infiltração de Green e Ampt, e para o cálculo da evapotranspiração o modelo disponibiliza os métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor e o método de Hargreaves (CASTRO, 2013).

3.8.1. Ciclo Hidrológico

A concepção da fase terrestre utilizada pelo modelo SWAT para a simulação do ciclo hidrológico tem como base a equação do balanço hídrico dada por (Eq.1):

Equação 1

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

Onde:

SW_t é a quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo t (mm);

SW_0 é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm);

t é a duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

R_{day} é a quantidade de água precipitada no dia i (mm);

Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm);

E_a é a quantidade de água evapotranspirada no dia i (mm);

W_{seep} é a quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia i (mm);

Q é a quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento sub-superficial (mm).

3.8.2. Método Curva Número (CN)

O modelo SWAT possui dois métodos para simular o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica: o de infiltração de Green & Ampt (1911) e o SCS Curva Número (1972), que será usada neste trabalho. O método Green & Ampt exige informação de dados sub-diários de precipitação, o que restringe sua utilização.

O método da curva-número (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*), foi objeto de estudo de mais de vinte anos de observação entre as relações de chuva e escoamento

superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais nos Estados Unidos, sendo elaborado para se estimar, de forma consistente, o escoamento superficial em diferentes tipos de solo e de usos do solo (NEITSCH et al., 2005). Ao longo dos anos o método da CN se difundiu, foi objeto de inúmeras contribuições de aperfeiçoamento e passou a ser aplicada também em áreas urbanas (MACHADO, 2002).

A CN é um método baseado em dados da relação entre a intensidade de chuva, condições da superfície da terra e volume do escoamento superficial, sendo o valor de CN uma função da permeabilidade do solo, uso da terra, grupo hidrológico do solo e condições antecedentes da água no solo (BALDISSERA, 2005). Segundo Menezes (2009), o método permite estimar o valor da distribuição e o volume do escoamento superficial. O modelo matemático utilizado possui dois módulos, onde primeiramente é realizada a separação do escoamento superficial e posteriormente a propagação do mesmo. A equação para o escoamento superficial é representada por (Eq.2):

Equação 2

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Para $P > I_a$

Onde:

Q é o volume do escoamento superficial ou chuva excedente em mm;

P é a precipitação em mm;

S é a capacidade máxima de retenção de água dos solos e;

I_a são as intercepções iniciais que incluem armazenamento superficial, intercepção e infiltração anterior ao escoamento em mm.

De acordo com Carvalho (2013), o parâmetro S indica a capacidade máxima de retenção de água no solo e varia de acordo com as mudanças nos solos, uso da terra, declividade, manejo e, temporariamente, devido a mudanças no conteúdo de água no solo.

A equação Q (Eq.2) é fisicamente submetida à restrição $P \geq I_a$, ou seja, o escoamento superficial potencial mínimo não pode ser negativo. Conforme as recomendações do próprio SCS, as abstrações iniciais (I_a), podem ser aproximadas para o 0,2.

O método CN não é linear, variando entre 0 e 100. Segundo Gonçalves (2007), citado por Castro (2013), os valores de CN retratam as condições do solo, variando desde uma cobertura muito permeável (limite inferior, valor=0) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior, valor=100) (figura 5).

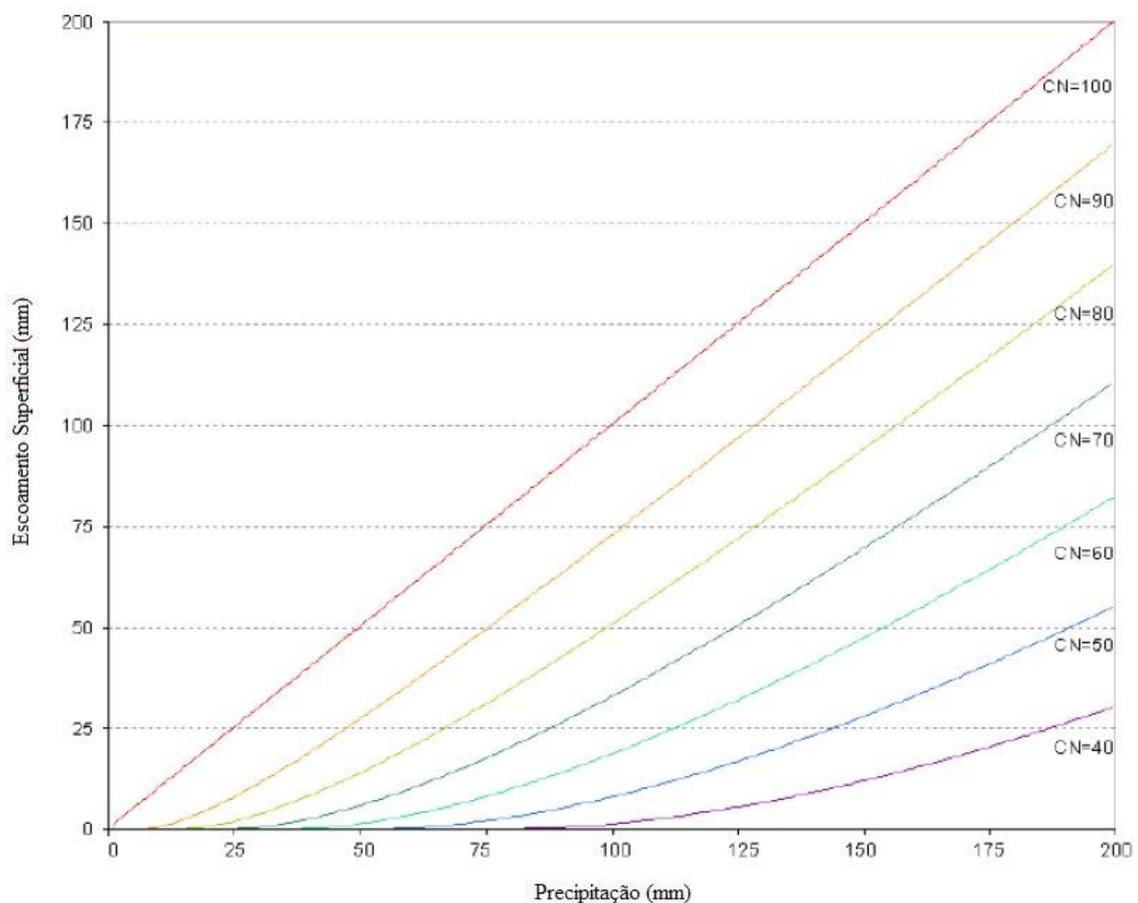


Figura 5 - Relação do escoamento superficial e da chuva Método CN (SCS) (adaptado de Neitsch et al., 2009).

O método CN define três condições de umidade nos solos: CN1 o qual representa a umidade do solo no ponto de murcha permanente; CN2 representa a umidade média de um solo; e CN3 é considerada como sendo a capacidade de campo do solo.

Segundo *Natural Resource Conservation Service* NRCS (1997) solos com características físicas semelhantes tenderão a se comportar de maneira similar em relação ao escoamento superficial quando expostos a precipitação. O NRCS classificou os solos em 4 grupos hidrológicos segundo características de infiltração, levando em conta a taxa de transmissão de água, quantidade de matéria orgânica, textura, grau de inchamento quando saturados e estrutura (Tabela 1).

Tabela 1- Grupo hidrológico dos solos segundo Skaggs e Khaleel (1982), (Machado 2002).

Grupos	Caracterização
A	Solos arenosos, profundos, com pouca argila e silte. Bem drenados. Apresentam altas taxas de infiltração, mesmo quando úmidos. Apresentam altas taxas de transmissão da água. Produzem baixo escoamento superficial. Taxa de infiltração: 7,6 - 11,4 mm/hora*.
B	Solos com textura fina a moderadamente grosseira. Moderadamente profundos a profundos. Bem drenados a moderadamente drenados. Apresentam taxas de infiltração moderada quando úmidos. Apresentam taxas moderadas de transmissão da água. Taxa de infiltração: 3,8 - 7,6 mm/hora*.
C	Solos com texturas moderadamente finas a finas. Solos com baixa infiltração quando úmidos. Solos com camada de impedimento ao movimento da água. Apresentam baixas taxas de transmissão da água. Taxa de infiltração: 1,3 - 3,8 mm/hora*.
D	Solos com argilas expansivas e pouco profundos. Solos com camadas de argila próximas à superfície ou na superfície. Solos superficiais sobre materiais impermeáveis ou quase impermeáveis. Apresentam taxas muito baixas de infiltração quando úmidos. Apresentam taxas moderadas de transmissão da água. Alto potencial de produção de escoamento superficial. Taxa de infiltração: 0 - 1,3 mm/hora*.

3.8.3. Vazão de pico de escoamento superficial

A vazão de pico do escoamento superficial representa a vazão máxima que o escoamento pode ter em um evento chuvoso qualquer, sendo, assim, um indicador do potencial erosivo de uma chuva (SALLES, 2012).

O modelo SWAT calcula a vazão de pico a partir do método racional modificado. O método racional é baseado na premissa de que se uma chuva com intensidade de precipitação (i) inicia no tempo $t=0$ e continua de forma indefinida, a taxa de escoamento superficial irá aumentar até que seja atingido o tempo de concentração (t_{conc}), quando a bacia como um todo estará contribuindo para o fluxo de saída. O método racional é dado por (Eq.3):

Equação 3

$$q_{peak} = \frac{C * i * A}{3,6}$$

Onde:

q_{peak} é a vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$);

C é o coeficiente de escoamento superficial;

i é a intensidade de precipitação ($mm \cdot h^{-1}$);

A é a área da sub-bacia (Km^2);

3,6 é o fator de correção de unidades.

O coeficiente de escoamento superficial é dado pela seguinte equação (Eq. 4):

Equação 4

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}}$$

Onde:

C é Coeficiente de escoamento superficial;

Q_{surf} é o volume de escoamento superficial descarregado no canal principal em um dado dia (mm);

R_{day} é a precipitação em um dado dia (mm).

O tempo de concentração (t_{conc}) é o tempo desde o início do evento de uma chuva até que toda a bacia esteja contribuindo para fluxo de saída. O t_{conc} é calculado a partir da soma do tempo necessário para a água percorrer do ponto mais remoto da bacia até o canal (t_{ov}) com o tempo necessário para a água se deslocar do ponto mais elevado do canal até o exutório (t_{ch}).

O tempo de concentração é calculado pela expressão equação (Eq5):

Equação 5

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch}$$

Onde:

t_{conc} é o tempo de concentração.

t_{ov} é o tempo de escoamento na superfície (h)

t_{ch} é o tempo de escoamento no canal

O tempo de escoamento na superfície é calculado por (Eq.6):

Equação 6

$$t_{ov} = \frac{L_{spl}^{0,6} * n^{0,6}}{18 * spl^{0,3}}$$

Onde:

t_{ov} é o tempo de escoamento na superfície (h);

L_{spl} é o comprimento de rampa (m);

n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal;

spl é a declividade média ($m.m^{-1}$).

Para o cálculo do tempo de escoamento no canal, o modelo utiliza a equação (Eq.7):

Equação 7

$$t_{ch} = \frac{0,62 * L * n^{0,75}}{A^{0,125} * slp_{ch}^{0,375}}$$

Onde:

T_{ch} é o tempo de escoamento no canal (h);

L é o comprimento do canal, desde a nascente até o exutório (Km);

n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal;

A é a área (km²);

slp_{ch} é a declividade média do canal ($m.m^{-1}$).

A intensidade da chuva é a chuva média que cai durante o tempo de concentração. Com base nesta definição o modelo calcula a intensidade de precipitação pela equação (Eq.8)

Equação 8

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}}$$

Onde:

i é a intensidade da precipitação ($mm.h^{-1}$);

R_{tc} é a taxa de precipitação durante o tempo de concentração (mm);

t_{conc} tem pode concentração (h).

A fração que represente o quanto choveu durante o período de concentração, α_{tc} , pode ser calculada a partir da relação entre R_{tc} e R_{day} (Eq.9):

$$R_{ct} = \alpha_{tc} * R_{day}$$

Onde:

R_{ct} é a lâmina de precipitação durante o tempo de concentração (mm);

α_{tc} é a fração de precipitação que ocorre durante o tempo de concentração;

R_{day} é a precipitação em um dado dia (mm).

A fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração (α_{tc}) é estimada como a função da fração de chuva que cai no evento de 30 minutos de maior intensidade, conforme descrito na equação (Eq.10):

Equação 10

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp\left[2 * t_{conc} * \ln(1 - \alpha_{0,5})\right]$$

Onde:

t_{conc} é o tempo de concentração(h);

$\alpha_{0,5}$ é a fração da chuva intensa de 30 minutos.

3.8.4. Retardo de escoamento superficial

Segundo Carvalho (2013), em grandes bacias, quando o tempo de concentração é superior a um dia, somente uma porção do escoamento superficial alcançará o canal principal no dia em que é gerado. Desse modo, o SWAT possui um componente para geração de um atraso ou retardo em parte do escoamento. O escoamento superficial é calculado, seja pelo método SCS Curva Número ou pelo Green & Ampt, a quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal é dado por (Eq.11):

$$Q_{sup} = (Q'_{sup} + Q_{stor,i-1}) * \left[1 - \exp\left(\frac{-surlag}{t_{conc}}\right) \right]$$

Onde:

Q_{sup} é a quantidade de escoamento superficial descarregada no canal principal em um dia qualquer (mmH_2O);

Q'_{sup} é a quantidade de escoamento superficial gerado neste dia (mmH_2O);

$Q_{stor,i-1}$ é o escoamento superficial armazenada devido ao *lag* do dia anterior (mmH_2O);

$Surl$ é o coeficiente de retardo ();

T_{conc} é o tempo de concentração (h).

A expressão $\left[1 - \exp\left(\frac{-surlag}{t_{conc}}\right) \right]$ na equação 11 representa a fração de água disponível que alcançará o canal num dado dia. A relação do valor do parâmetro $Surlag$, o tempo de concentração e a fração do escoamento superficial que chega nos canais é mostrado na figura 6. É possível perceber que quando o valor de $Surlag$ diminui, aumenta a quantidade de água armazenada.

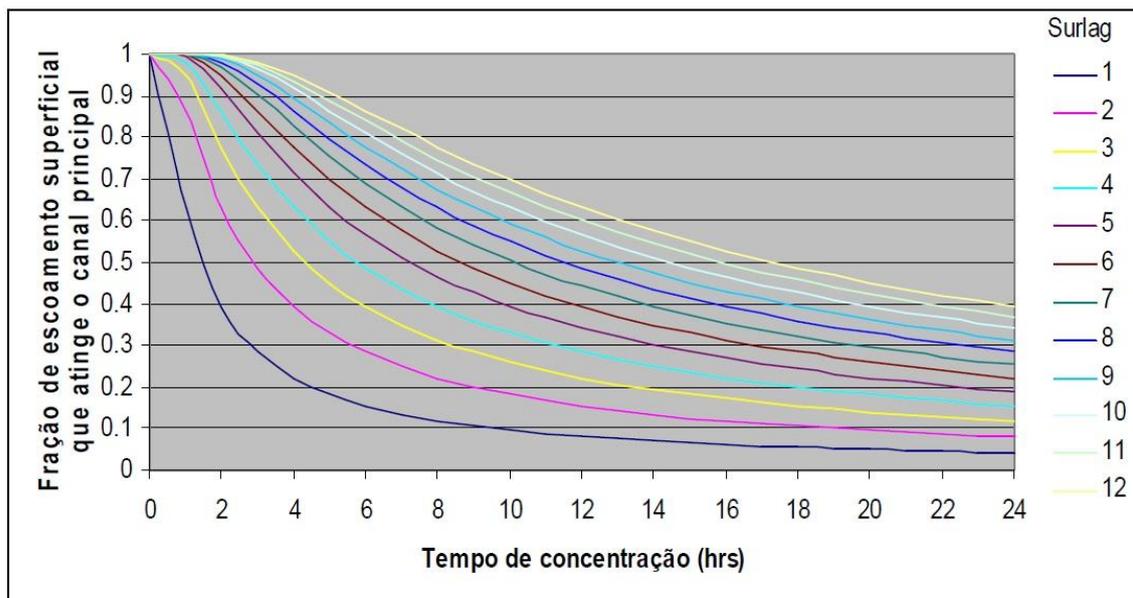


Figura 6 - Influência do parâmetro $Surlag$ e do tempo de concentração na fração de escoamento superficial que vai para os canais (Neitsch, 2005) et al.; (Salles, 2012).

3.8.5. Percolação

A percolação é calculada para cada perfil do solo. O SWAT utiliza uma técnica de propagação do armazenamento, combinando com o modelo de fluxo de fendas no solo para simular o escoamento através de cada camada de solo (PINTO, 2011). A quantidade de água percolada de uma camada para a camada inferior é calculada usando a metodologia de propagação do armazenamento, que é dada por (Eq.12):

Equação 12

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

Onde:

w_{perc} , é a quantidade de água que percola para a próxima camada de solo (mm);

$SW_{ly, excess}$ é o volume de água drenável na camada de solo (mm).

Δt é a duração do passo de tempo (h);

TT_{perc} é o tempo de propagação através da camada de solo (h).

O volume disponível para percolação na camada de solo ($SW_{ly, excess}$) é calculado pelas seguintes equações (Eq.13 e Eq.14):

Equação 13

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se} \quad SW_{ly} > FC_{ly}$$

Equação 14

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se} \quad SW_{ly} < FC_{ly}$$

Onde:

SW_{ly} é o conteúdo de água na camada de solo (mm);

FC_{ly} é o conteúdo na camada de solo na capacidade de campo (mm).

O tempo de percolação (TT_{perc}) é único para cada camada do solo e é calculada a partir da expressão (Eq.15):

Equação 15

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}}$$

Onde:

SAT_{ly} é o volume de água na camada de solo quando completamente saturado (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado ($mm.h^{-1}$).

3.8.6. Escoamento lateral

O escoamento lateral pode ser significativo em áreas onde os solos possuem alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e uma base impermeável ou semipermeável. Neste caso, a precipitação irá percolar verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água que fica compreendida acima da camada impermeável forma uma zona saturada. Esta zona é fonte de água para o escoamento lateral (sub-superficial) (LINO,2009).

A água empoçada nas camadas subsuperficiais é sujeita ao fluxo lateral, o qual é representado pelo modelo SWAT através do modelo cinemático para escoamento subsuperficial desenvolvido por Sloan et al., (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984), sendo baseado na equação do balanço de massa (balanço de massa líquida) onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle (SALLES, 2012).O modelo leva em conta a variação na condutividade, declividade e conteúdo de água no solo (Eq.16)

Equação 16

$$Q_{lat} = 0,024 * \left(\frac{2 * SW_{ly,excess} * K_{sat} * slp}{\phi_d * L_{hill}} \right)$$

Onde:

Q_{lat} é a descarga líquida no exutório da rampa em questão ($mm.dia^{-1}$);

0,024 é o fator de conversão de unidades;

$SWly_{,ecess}$ é a quantidade de água que pode ser drenada da camada saturada da respectiva rampa por unidade de área (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada ($mm.dia^{-1}$);

L_{hill} é o comprimento da rampa (m);

slp é a declividade da rampa;

Φ_d é a porosidade do solo a qual está sujeita a drenagem ($mm.mm^{-1}$).

O movimento ascendente da água, isto é, de uma camada inferior para uma camada superior, também é previsto no modelo e pode ocorrer quando o conteúdo de água de camada mais baixa excede a capacidade de campo (CASTRO, 2013).

3.8.7. Água subterrânea

O modelo SWAT considera dois tipos de aquíferos em cada sub-bacia: o raso e o profundo. O primeiro tipo é um aquífero não confinado (lençol freático), o qual possui como limite superior o nível de água do próprio lençol e que contribui para o fluxo do canal principal. Já o segundo tipo de aquífero é profundo e confinado, tanto por cima quanto por baixo, e a água que entra nele é assumida como contribuinte para a vazão de um canal em uma bacia hidrográfica diferente da estudada. O volume que percola do reservatório subsuperficial, através do perfil do solo, representa a recarga do aquífero raso. A água que percola para o aquífero profundo não retorna para o sistema (MACHADO, 2002).

O balanço hídrico de aquíferos rasos é representado pela equação (Eq.17):

Equação 17

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrq,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}$$

Onde:

$aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm);

$aqsh, i - 1$ é a quantidade de água armazenada no aquífero no dia $i-1$ (mm);
 $Wrchrg, sh$ é a quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm);
 $Qgwé$ o fluxo subterrâneo (fluxo de retorno ou fluxode base) para dentro do canal principal no dia i (mm);
 $Wrevap$ é a quantidade de água que se move para dentro da zona de solo (fluxo ascendente) em resposta às deficiências de água no dia i (mm);
 $Wpump, sh$ é a quantidade de água removida do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm). Já para o aquífero profundo, o balanço hídrico é dado por (Eq.18):

Equação 18

$$aqdp, i = aqdp, i-1 + wdeep - wpump, dp$$

Onde:

$aqdp, i$ é a quantidade de água armazenada no aquífero profundo num dia i (mm);
 $aqdp, i - 1$ é a quantidade de água armazenada no aquífero profundo num dia $i - 1$ (mm);
 $wdeep$ é a quantidade de água que percola do aquífero raso para o profundo num dia i (mm);
 $wpump, sh$ é a quantidade de água removida do aquífero profundo por bombeamento no dia i (mm).

O fluxo de base é definido como o volume de fluxo fluvial originado da água subterrânea. O modelo SWAT permite que a água proveniente fluxo de base contribua no canal principal, mas somente quando a água armazenada no aquífero raso excede um valor limite especificado pelo usuário, qual seja, $aqshthn, q$. O fluxo de água subterrânea pode ser descrito pela equação (Eq.19):

$$Q_{gw} = \frac{8000 * K_{sat}}{L_{gw}^2} * h_{wtbl}$$

Onde:

Q_{gw} é o fluxo de água subterrânea, ou fluxo de base para dentro do canal principal no dia i (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm.dia⁻¹);

L_{gw} é a distância a partir da divisão do talvegue ou sub-bacia para o sistema aquífero em relação ao canal principal (m);

h_{wtbl} é a profundidade do lençol freático (m).

3.8.8. Evapotranspiração

A evapotranspiração é um termo que inclui todos os processos onde a água na superfície do solo é convertida em vapor de água. Inclui a evaporação do dossel das árvores, a transpiração, a sublimação e a evaporação do solo. Cerca de 62% da precipitação que ocorre na superfície terrestre é evapotranspirada (NEITSCH et al., 2005). A evapotranspiração é o principal mecanismo pelo qual a água é removida de uma bacia e excede o escoamento na maioria das bacias hidrográficas e em todos os continentes, exceto na Antártida (DINGMAN, 1994).

A contribuição da evapotranspiração no SWAT é de suma importância na modelagem, uma vez que se trata de um grande percentual de precipitação que será "extraído" da bacia, não contribuindo, assim, para a vazão em seu exutório. O modelo SWAT oferece três opções para a estimativa da evapotranspiração potencial: Pernnam & Monteith (MONTEITH, 1965; ALLEN 1986; ALLEN et al., 1989), Priestley & Taylot (PRIESTLEY & TAYLOR, 1972), e Hargreaves & Samani (HARGREAVES et al., 1985).

Segundo Pinto (2011), o método mais utilizado no SWAT é o de Pernnam & Monteith, que requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A equação de Pernman & Monteith, recomendada pela FAO/ONU, combina componentes que levam em

consideração a energia necessária para sustentar a evaporação, a força do mecanismo requerido para remover o vapor d' água e termos aerodinâmicos e de resistência da superfície (NEITSCH et al., 2012).

A primeira etapa do processo de evapotranspiração no SWAT é a contabilização da água interceptada pela vegetação. O dossel das plantas pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração (FERRIGO,2014). Quando a chuva cai, a interceptação pelas plantas reduz a energia erosiva das gotas e armazena uma parte da precipitação no dossel. Conforme Tucci (2004), a interceptação vegetal depende de vários fatores: das condições climáticas, das características da precipitação, da formação e da estrutura da vegetação, assim como dos aspectos fenológicos das espécies que a compõem, da densidade da cobertura vegetal e da morfologia das espécies de plantas.

O modelo permite que o usuário entre com a quantidade máxima de água que pode ser interceptada pela vegetação, dado um índice de superfície foliar máxima e para uma dada cobertura do solo. O SWAT calcula a quantidade de água interceptada em função do Índice de área foliar, a partir da seguinte equação (Eq.20):

Equação 20

$$can_{dia} = can_{mx} * \frac{LAI}{LAI_{mx}}$$

Onde:

can_{dia} é o máximo de água que pode ser armazenada em um determinado dia (mmH_2O);

can_{mx} é a quantidade de água que pode ser interceptada quando a copa está completamente desenvolvida;

LAI é o índice de área foliar em um determinado dia;

LAI_{mx} é o valor máximo do índice de área foliar para a respectiva planta.

A equação utilizada para calcular a evapotranspiração potencial pelo método de Penman & Monteith é a seguinte (Eq.21):

$$\lambda E = \frac{\Delta^*(H_{net} - G) + \rho_{ar} * c_p * [(e_z^0 - e_z) / r_a]}{\Delta + \gamma * (1 + r_c / r_a)}$$

Onde:

λE é o fluxo de calor latente ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$)

E é a profundidade da taxa de evaporação ($mm.dia^{-1}$)

Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor pela temperatura, $\partial e / \partial T$;

H_{liq} é a radiação líquida ($MJ.m^{-2}$);

G é a densidade do fluxo de calor para o solo ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$);

ρ_{ar} é densidade do ar ($kg.m^{-3}$);

c_p é o calor específico a temperatura constante ($MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$);

e_z^0 é a pressão de saturação de vapor do ar na altura z (kPa);

e_z é a pressão de vapor da água na altura z (kPa);

γ é a constante psicrométrica ($Kpa.^{\circ}C^{-1}$);

r_a é a resistência da difusão da camada de ar.

A interceptação é levada em conta nos cálculos para a utilização do método do Curva Número para o cômputo do escoamento superficial. Nesse caso é estimado como 20% do parâmetro de retenção para um determinado dia. Essa variável inclui, também, a retenção na superfície e a infiltração antecedente ao escoamento superficial.

3.8.9. Produção de sedimentos

Na década de 30, surgiu nos Estados Unidos um intenso interesse pela compreensão da dinâmica dos processos erosivos e desenvolvimento de práticas conservacionistas e de controle de erosão. Por volta de 1940, começaram a surgir pesquisas utilizando as equações para calcular a quantidade de perda de solo. Em 1960, as agências de pesquisa e extensão dos Estados Unidos propuseram a equação empírica mais utilizada para predição

de erosão até os dias atuais, a *Universal Soil Loss Equation* - USLE (WISHMEIER AND SMITH, 1960 e 1978).

A USLE foi desenvolvida pela *National Runoff and Soil Loss Data Center* criada em 1954 pela *Science and Education Administration* (Anteriormente *Agricultura Research Service*) em cooperação com a Universidade de Purdue. Cooperações estaduais e federais de pesquisa contribuíram em 49 locais com mais de 10.000 parcelas experimentais (submetidas a condições naturais e artificiais) de dados básicos de escoamento e perda de solo para resumir e fazer análises estatísticas globais. Depois de 1960, foram utilizados simuladores de chuva que operam em Indiana, Geórgia, Minnesota e Nebraska em parcelas de terreno e em mais 16 estados para preencher algumas das lacunas nos dados (WISHMEIER AND SMITH, 1978).

O objetivo da USLE é o de fazer previsões de erosão do solo com base em séries de longos períodos de coleta de dados, para, assim, promover o planejamento de práticas de prevenção para minimizar as perdas de solos em níveis aceitáveis (LARSON et al., 1997). A equação da USLE é definida como (Eq.22):

Equação 22

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Onde:

A é a perda de solo (t. ha.h⁻¹.ano⁻¹);

R é o fator erosividade da chuva em MJ.mm/(ha.h⁻¹.ano⁻¹);

K é o fator erodibilidade do solo em t. ha.h⁻¹.ano⁻¹ / (ha.MJ⁻¹.mm⁻¹);

L é o fator comprimento de rampa, baseado nos valores, em metros, do comprimento de rampa (adimensional);

S é o fator declividade, baseado nos valores, em porcentagem, da declividade (adimensional);

C é o fator de uso e manejo (adimensional);

P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

A USLE estima a erosão bruta em determinada área, e não a produção de sedimentos, ou seja, uma parte do sedimento erodido dentro da bacia

encontrará seu caminho no exutório e será representado como produção de sedimento e outra parte do sedimento erodido poderá ser depositado e armazenado, temporariamente ou permanentemente, nas encostas ou nos próprios canais (CARVALHO, 2014).

A equação utilizada pelo modelo SWAT é a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), que é a Equação Universal de perdas de Solo Modificada. A USLE estima a erosão bruta anual média em função da energia da precipitação, do manejo, dos usos do solo, do tipo do solo e do relevo. Já a MUSLE utiliza a quantidade de escoamento para simular a erosão bruta e a produção de sedimentos, representando a energia utilizada na desagregação e transporte de sedimentos (LINO, 2009). Vale ressaltar que a MUSLE tem uma taxa de transferência de sedimentos (SDR) implícita que foi originalmente desenvolvida com base em dados de pequenas bacias hidrográficas americanas (WILLIAMS, 1975).

A principal diferença da modificação é que enquanto a USLE estima erosão para um período, a MUSLE calcula o aporte de sedimento gerado por eventos chuvosos isolados. A diferença entre as equações se dá na ausência do termo erosividade da chuva (R), que foi substituído por fatores relacionados à energia erosiva do escoamento superficial. A equação MUSLE é dada por (Eq. 23)

Equação 23

$$SED = 11,8(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{usle} \cdot C_{usle} \cdot P_{usle} \cdot L_{susle} \cdot CFRG$$

Onde:

SED é a produção de sedimento em um dia (ton^3);

Q_{surf} é a lâmina de escoamento superficial ($mm \cdot ha^{-1}$);

q_{peak} é a vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$);

$area_{hru}$ é a área da unidade de Resposta Hidrológica (HRU) (ha);

K_{USLE} é o fator erodibilidade do solo;

C_{USLE} é o fator cobertura e manejo;

P_{USLE} é o fator de práticas conservacionistas;

L_{USLE} é o fator topografia

$CFRG$ é o fator de fragmentação esparsa.

3.8.10. Propagação do fluxo de água

No modelo SWAT o cálculo da vazão e da velocidade do escoamento nos rios é feito com a utilização da equação de Manning, enquanto que a propagação da água pelos canais é calculada pelo o método de Williams (método de acumulação variada) ou Muskingum, os quais se baseiam no modelo da onda cinemática e na equação da continuidade. Nesta pesquisa será utilizado o método de acumulação variada proposto por Williams (1969).

O modelo assume que os canais possuem formato trapezoidal com taludes cuja inclinação ocorre na proporção 2:1 (horizontal:vertical), ou seja, igual a 0,5 (figura 7). O usuário pode informar ao modelo o comprimento, a largura e a profundidade do canal quando preenchido até o nível mais alto quando ainda não ocorre inundação para fora do canal, assim como o coeficiente de Manning e a declividade do canal ao longo do seu comprimento. No caso do usuário não informar essas características ao modelo, este utiliza o MDE para a estimativa desses dados (CARVALHO, 2014).

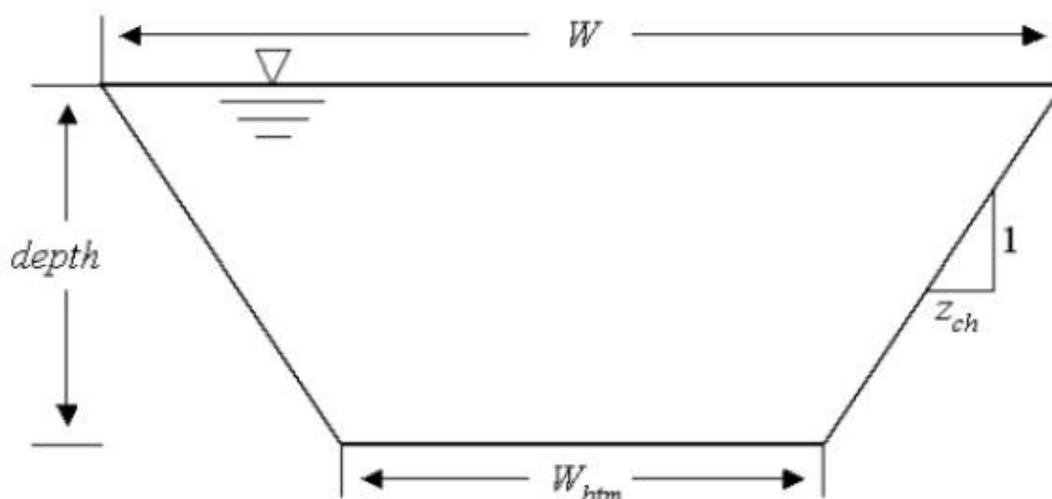


Figura 7- Dimensões trapezoidais do canal, conforme considerado pelo SWAT (NEITSCH et al., 2005)

A equação de Manning para o fluxo uniforme no canal é usada para calcular a vazão e velocidade da vazão no seguimento do canal para um período de tempo. Por meio dos cálculos de área seccional de vazão no canal, o modelo calcula o raio hidráulico do canal para uma dada profundidade (Eq. 24 e 25).

Equação 24

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} * R_{ch}^{2/3} * slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

Equação 25

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} * slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

Onde:

q_{ch} é a vazão no canal ($m^3.s^{-1}$);

A_{ch} é a área seccional em que ocorre a vazão no canal (m^2);

R_{ch} é o raio hidráulico do canal para uma determinada profundidade (m);

slp_{ch} a declividade ao longo do comprimento do canal ($m.m^{-1}$);

n é o coeficiente “n” de Manning para o canal;

v_c é a velocidade do fluxo no canal ($m.s^{-1}$).

O método de acumulação variada é baseado na equação da continuidade, para expressar a propagação de água pelo canal. A equação é dada por (Eq.26):

Equação 26

$$V_{out,2} = SC * (V_{in} + V_{stored,1})$$

Onde:

$V_{out,2}$ é o volume de água que sai do trecho em questão (m^3);

SC é o coeficiente de armazenamento;

V_{in} é o volume que entra no período em questão (m^3);

$V_{stored,1}$ é o volume acumulado no início do período (m^3).

O coeficiente de armazenamento é calculado pela equação (Eq.27):

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t}$$

Onde:

Δt é o período de tempo (s);

TT é o tempo de viagem.

3.8.11. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é o estudo de como o modelo responde. É um método que permite avaliar quanto os resultados dos modelos hidrológicos são sensíveis às suas variáveis ou parâmetros, permitindo a validação da relação de dependência entre os resultados simulados (SILVA, 2010 e MCCUEN & SNYDER, 1986).

O principal objetivo da análise de sensibilidade é investigar como o modelo responde às variações nos valores de seus parâmetros, possibilitando identificar aqueles que influem mais fortemente nos resultados. Conseqüentemente, permite que a etapa posterior, a de calibração, seja conduzida mais facilmente, pois será possível perceber que muitos parâmetros não têm peso significativo na geração dos resultados e, portanto, não serão calibrados, evitando-se, assim, perder tempo com aqueles aos quais o modelo não é tão sensível (CARVALHO, 2014).

Os métodos de análise de sensibilidade podem ser de análise local e global. Os métodos que utilizam a análise local dispõem a tendência do modelo em um dado ponto do espaço amostral, ou seja, para um determinado cenário de controle (SALTELLI et al., 2000). A desvantagem neste tipo de procedimento é que, alterando-se apenas um parâmetro de cada vez, nunca se sabe se os valores dos outros parâmetros, que estão fixos, estariam ou não corretos (ARNOLD et al., 2012). Os modelos que utilizam o método global, por sua vez, avaliam de modo aleatório ou sistemático todo o intervalo de valores que podem ser atribuídos a um parâmetro e as combinações que podem existir entre os diferentes parâmetros (SALLES, 2012). O problema desse tipo de

análise é o longo tempo de execução, pois necessita de várias simulações, sendo muito exigente computacionalmente.

O SWAT-CUP apresenta dois resultados em relação a análise de sensibilidade global: *t-stat* e o *P-value*. Uma análise de regressão múltipla é utilizado para obter a estatística da sensibilidade do parâmetro. O *t-stat* é o coeficiente de um parâmetro dividido por seu erro padrão. É uma medida da precisão com a qual o coeficiente de regressão é medido. Se um coeficiente for maior em comparação com o seu erro padrão, então, ele é provavelmente diferente de zero e o parâmetro é sensível (Abbaspour, 2015). O *t-stat* fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor absoluto, mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

Já o *P-value*, para cada termo, testa a hipótese nula de o coeficiente ser igual a zero (nenhum efeito). Um *p*-valor baixo ($<0,05$) indica que a hipótese nula pode ser rejeitada. Em outras palavras, quando um indicador possui um *P-value* baixo, poderá ser uma adição significativa para o modelo, porque as mudanças nos valores das previsões estão relacionadas a mudanças na variável resposta. O *P-value* determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo à zero indica maior significância (ABBASPOUR, 2015).

Para a análise de sensibilidade, o modelo SWAT utiliza a combinação do *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor-At-a-Time* (OAT), formando o método LH-OAT (NEITSCH et al., 2005a). O método LH é uma forma refinada de se realizar uma amostragem aleatória como o método de Monte Carlo, possibilitando uma análise mais robusta na sensibilidade, que requer um grande número de variáveis associadas, e, conseqüentemente uma elevada exigência computacional (VAN GRIENSVEN, 2003). Neste método, cada parâmetro tem sua distribuição de probabilidades dividida em n intervalos, cada qual com a probabilidade de ocorrência igual a $1/n$. Os valores aleatórios dos parâmetros são gerados sendo que cada série é amostrada somente uma vez (VAN GRIENSVEN, 2006).

O método *One-Factor-At-a-Time* (MORRI, 1991) é um exemplo de método de integração de sensibilidade do local para o global. No *design* OAT, somente um dos parâmetros tem seu valor alterado a cada simulação. Os outros ficam constantes. Percebe-se, portanto, tratar-se de uma análise de sensibilidade local que, por se repetir várias vezes e com todos os parâmetros,

torna-se global (CARVALHO, 2014). No OAT, somente os parâmetros de entrada são alterados durante os *loopings* que o modelo efetua na análise (VEIGA, 2015). Em cada rodada, apenas um parâmetro é alterado por vez, assim, com as mudanças no resultado em cada rodada, o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado (BONUMÁ et al., 2013).

A combinação dos métodos LH-OAT na análise de sensibilidade do modelo SWAT assegura que toda gama de parâmetros seja analisada, enquanto cada variação na saída é atribuída a uma variação específica na entrada (VAN GRIENSVEN et al., 2006).

3.8.12. Calibração e Validação

Segundo Tucci et al., (2007) a calibração é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou por meio de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída (por exemplo, a vazão nos rios). Ou seja, a calibração é o ajuste dos parâmetros de um modelo para que obtenha uma aceitável concordância entre os dados observados e simulados (ARNOLD et al., 2000).

A calibração pode ser feita tanto de forma automática quanto de forma manual e pode ser realizada para o balanço de água (vazão), sedimentos, nutrientes e pesticidas. A calibração manual consiste em alterar os valores dos parâmetros de *input* para produzir valores simulados que se aproximem dos dados mensurados (SALLES, 2012). Os parâmetros são alterados individualmente, então se executa o modelo para verificar as mudanças nos valores de saída, o processo é repetido até se chegar a um valor aceitável que se aproxime dos valores medidos (NEITSCH et al., 2005). Já a calibração automática produz resultados de maneira mais rápida utilizando grande número de parâmetros, embora nem sempre o ajuste ideal seja alcançado (Beltrão, 2014). Na calibração automática estima-se os valores dos parâmetros com base na técnica da modelagem inversa, que ajustam os valores simulados aos valores observados dos fenômenos em análise (SARMENTO, 2010).

As versões mais recentes do modelo SWAT eliminaram os dispositivos automáticos de pós-processamento, tendo mantido somente as formas manuais. Caso o usuário queira efetuar as etapas de pós-processamento de forma automática, deverá lançar mão de programas específicos, como é o caso do SWAT-CUP (CARVALHO, 2014).

O SWAT-CUP foi desenvolvido por Abbaspour et al., (2007)., e é um programa de domínio público utilizado especificamente para a calibração dos modelos desenvolvidos com o uso do SWAT. O programa possui rápido processamento e faz a junção dos algoritmos de *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (ParaSol), *Sequential Uncertainty Fitting algorithm* (SUFI-2), *Markov chain e Monte Carlo* (MCMC) e *Particle Swarm Optimization* (PSO), possibilitando, assim, a análise de sensibilidade, calibração, verificação e análise de incerteza dos modelos para um desses cinco algoritmos (FERRIGO, 2014). O algoritmo SUFI-2, de maior uso para a calibração do SWAT, foi utilizado para a calibração neste trabalho.

Segundo Arnold et al., (2000) o primeiro passo de uma calibração é dividir os valores observados em duas séries temporais, sendo uma para calibração e outra para a validação.

Para avaliar a eficiência do SWAT, utiliza-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) (ARNOLD et al., 2005). Esse coeficiente pode variar desde menos infinito até 1, sendo 1, indicativo de um perfeito ajuste. Gotschalk & Motoviloc (2000) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente: COE = 1 corresponde a um ajuste perfeito; COE >0.75 modelo é considerado adequado e bom; 0.36 < COE < 0.75 o modelo é considerado aceitável. Segundo Moriasi et al., (2007) valores menores que 0 indicam um desempenho inaceitável do modelo. O COE é calculado pela equação (Eq.28):

Equação 28

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \bar{E})^2}$$

Onde:

Em é o evento observado;
Es é o evento simulado pelo modelo;
 \bar{E} é a média do evento observado no período de simulação;
n é p número de eventos.

3.8.12.1. SUFI-2 - Sequential Uncertainty Fitting

Na análise SUFI-2, a incerteza nos parâmetros é expressada em intervalos (distribuição uniforme) e é responsável por todas as fontes de incertezas, como a incerteza nas variáveis de condução (por exemplo, precipitação), modelo conceitual, parâmetros e dados medidos.

O SUFI-2 tem como objetivo atingir a maior similitude entre o resultado do modelo (95PPU) e os dados observados (os dados observados são aqueles medidos no sistema natural). Para quantificar o ajuste entre resultado da simulação, expressa em 95PPU, e os dados observados, utiliza-se duas estatísticas: *P-factor* e *R-factor*. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas, é quantificado por uma medida referida como o *P-factor*, que é a percentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95% (95PPU) (ABBASPOUR, 2015). O 95PPU é calculado em 2,5% e de 97,5% dos níveis de distribuição cumulativa de uma variável de saída obtida pela amostragem *Latin hypercube*, não permitindo que 5% das simulações sejam ruins. É importante perceber que não existe um único sinal que representa a saída do modelo, mas sim um envelope de boas soluções expressas pelo 95PPU, gerado por determinadas faixas de parâmetro. O *R-factor* é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos.

A confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo *P-factor* e *R-factor*. Teoricamente, o valor de *P-factor* varia entre 0 e 100%, enquanto que a do *R-factor* varia entre 0 e infinito. O *P-factor* de 1 e o *R-factor* de 0 é uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos (ABBASPOUR, 2015).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é a bacia hidrográfica do ribeirão do Gama, que ocupa aproximadamente 146,52 km². Localizada a sudoeste do centro de Brasília, estando situada entre os paralelos 15°50'16" latitude S e os meridianos 47° 50'48" longitude WGr. A bacia do Gama está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Gama e Cabeça do Veado. As APAs são “áreas de uso múltiplo onde tem como objetivo preservar a diversidade da paisagem e seus atributos físicos e culturais, controlando a ocupação e estimulando atividades ecológicas, através do zoneamento, fiscalização e educação ambiental” (CODEPLAN, 1984). Parte da bacia do Gama também é ocupada por unidades de conservação, sendo elas a Reserva Ecológica e Científica da Fazenda Água Limpa - Universidade de Brasília; a Estação Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE; e a Reserva Biológica do Jardim Botânico.

Além das Áreas de Proteção Ambiental, a bacia dispõe de áreas de ocupação urbana: Núcleo Bandeirante, Lago Sul e Park Way, quadras 15,16,18,19,20,21 e 23, com diferentes graus de consolidação urbana; áreas agrícolas: Núcleo Rural Vargem Bonita e Núcleo Rural Córrego Onça.

A APA do Gama foi criada através do Decreto Distrital nº. 9.417 de 21 de abril de 1986, com o objetivo de proteger as cabeceiras do ribeirão do Gama e do córrego Cabeça de Veado, de forma a garantir a integridade dessas drenagens, responsáveis por um terço das águas do Lago Paranoá e pelo abastecimento de água potável para parte da população do Distrito Federal (PINHEIRO, 2006).

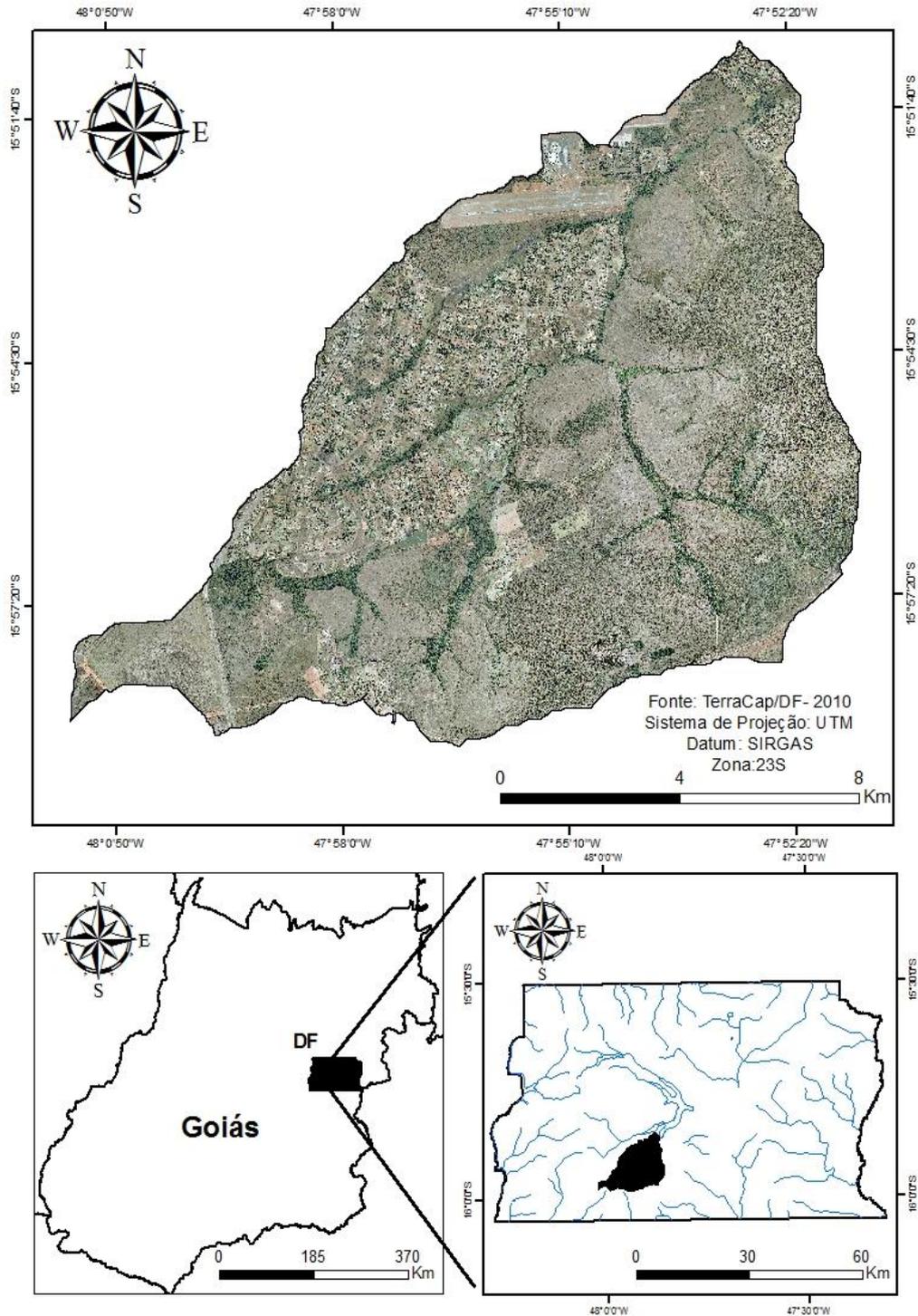


Figura 8 - Mapa de localização da bacia do Gama. No topo, carta imagem da bacia do Gama; no canto inferior direito, Bacia do Gama no contexto do Lago Paranoá e do DF; no canto inferior esquerdo, DF no contexto do estado de Goiás.

O clima predominante na região, segundo o sistema de classificação da Koopen, é o Tropical de Savana (CWA), com índices pluviométricos variando em torno de 1500 mm.ano¹ (Nimer, 1989). Com relação ao clima, o DF possui dois períodos climáticos bem distintos (típicos da região de Cerrado),

evidenciados pela alta taxa de precipitação no verão (média de 250 mm em dezembro) com temperatura média de 22 °C e um período extremamente seco no inverno (média de 9 mm em junho) com temperatura média de 18 °C (MOURA, 2008). A existência de duas estações bem definidas: chuvosa e quente (de outubro a abril) e outra fria e seca (de maio a setembro) caracterizam esse clima. No período de maio a setembro a umidade relativa do ar não ultrapassa os 70%, com a mínima ocorrendo no mês de agosto entorno de 47%. Em relação à bacia do Gama, a média anual da temperatura é de 22,2 °C e a da precipitação é de 1.281 mm, segundo os dados obtidos da Estação Climatológica da Reserva Ecológica do IBGE no período de 1985 a 2005.

Como relação a alguns dados morfométricos, a bacia do Gama ocupa aproximadamente 146,52 km², com extensão 22,60 Km (segundo o método da menor cota (1000) até a maior cota (1270) da bacia). A bacia estudada é de sexta ordem (segundo a classificação de Strahler), possuindo uma densidade de drenagem de 1km/km² (baixa densidade de drenagem, segundo Lima, 2008) e dispõe de uma densidade de canais de 3,39 km com 497 canais (tabela 2), sendo a extensão do seu canal principal de 22,32 km com um índice de sinuosidade de 1,25, ou seja, tem uma tendência mais retilínea. O índice de circunaridade da bacia é de 0,34, o que caracteriza a forma de uma bacia alongada, com nível moderado de escoamento, não contribuindo, assim, na concentração de águas que possibilitem cheias rápidas.

Tabela 2 Dados morfométrico referente a ordem dos canais, número de canais e extensão do canais da bacia do ribeirão do Gama.

Ordem dos Canais	Número de Canais	Extensão dos Canais (km)
1 ^a	358	56,01
2 ^a	104	46,06
3 ^a	22	13,74
4 ^a	8	8,93
5 ^a	4	7,69
6 ^a	1	15,41
Total	358	147,84

O uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama (figura 9) foi digitalizado manualmente por meio do software ArcGis 10.2.2 na escala de 1:10.000. A confecção dos polígonos foi realizada sobre a ortofoto de 2010 com resolução espacial de 1 metro disponibilizada pela Terracap. O mapa de

uso do solo foi classificado em 12 classes: Cerrado, Campo, Mata Galeria, Murundus/Áreas Alagáveis, Pasto, Hortifruti, Solo Exposto/Vias não Pavimentadas, Vias Pavimentadas, Área de Baixa Densidade Urbana, Área de Média Densidade Urbana, Área de Alta Densidade Urbana e Água (tabela 3). Quanto à cobertura vegetal, a bacia está localizada no Bioma Cerrado e ocorrem seis fitofisionomias: Mata de Galeria, Cerradão, Cerrado, Vereda, Campo Sujo e Campo Limpo (MOURA, 2010).

Tabela 3: Tabela de uso da terra da bacia do ribeirão do Gama.

Classe de Uso	Área (km²)	Porcentagem (%)
Cerrado	56,19	38,35%
Campo	45,53	31,08%
Mata Galeria	7,97	5,44%
Área Alagável/Murundus	3,79	2,59%
Pasto	6,42	4,38%
Hortifruti	6,30	4,30%
Área de Baixa Densidade Urbana	2,92	1,99%
Área de Média Densidade Urbana	9,94	6,78%
Área de Alta Densidade Urbana	1,52	1,04%
Solo Exposto/ Via Não Pavimentada	2,11	1,44%
Via Pavimentada	3,59	2,45%
Água	0,23	0,16%

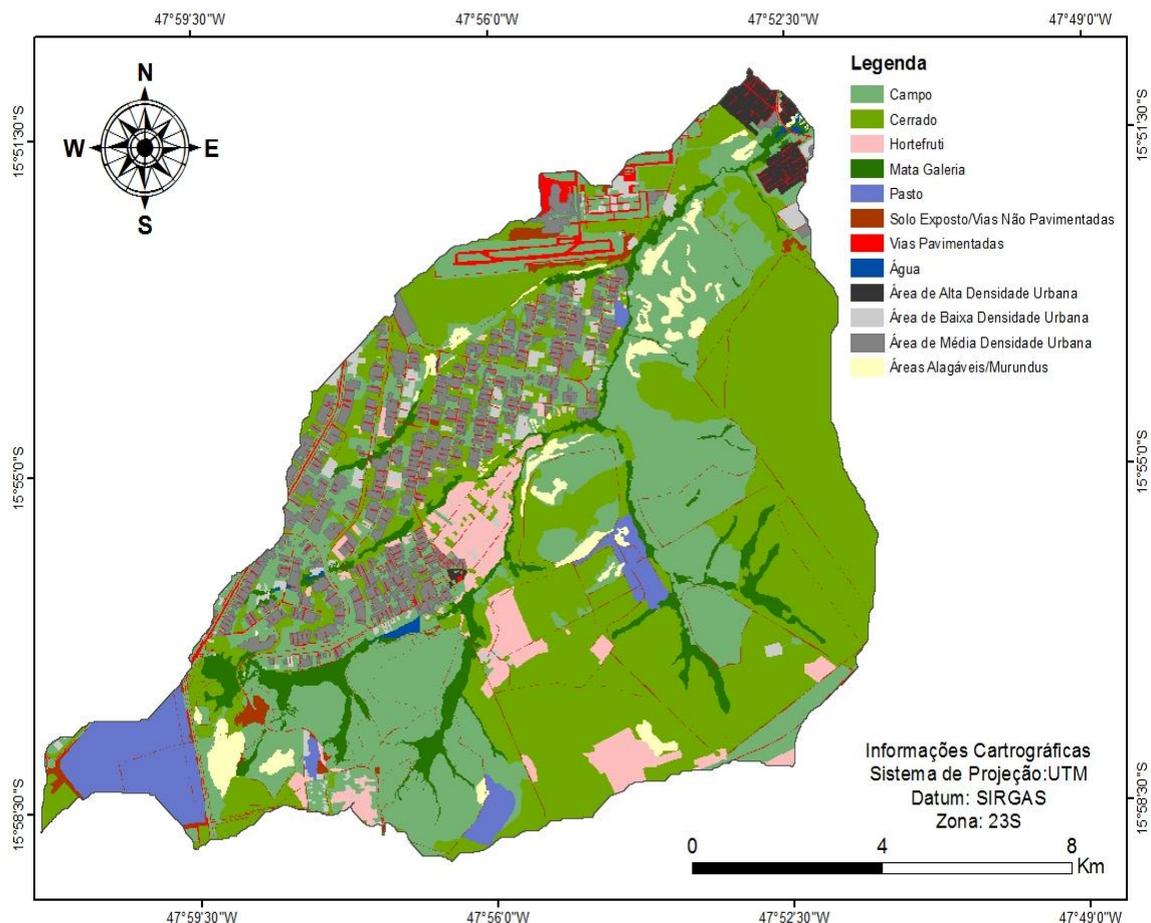


Figura 9 - Uso cobertura do solo da bacia do Gama.

Em termos litoestratigráfico (figura 10), essa área é caracterizada pela presença de rochas do Grupo Paranoá (Idade Meso/Neoproterozóica) especificamente pelas unidades Ardósia (concentrada na porção noroeste da bacia) e Metarritmito Arenoso (concentrado na porção sudeste da bacia, e em todas as cabeceiras) e por uma pequena parte composta por Quartzito Médio, que se concentra no extremo sudeste da bacia (CAMPOS, 2010). Em campo ainda é possível perceber lentes de quartzito nas porções de cabeceira, o que possivelmente sustentam as áreas com maiores declividades.

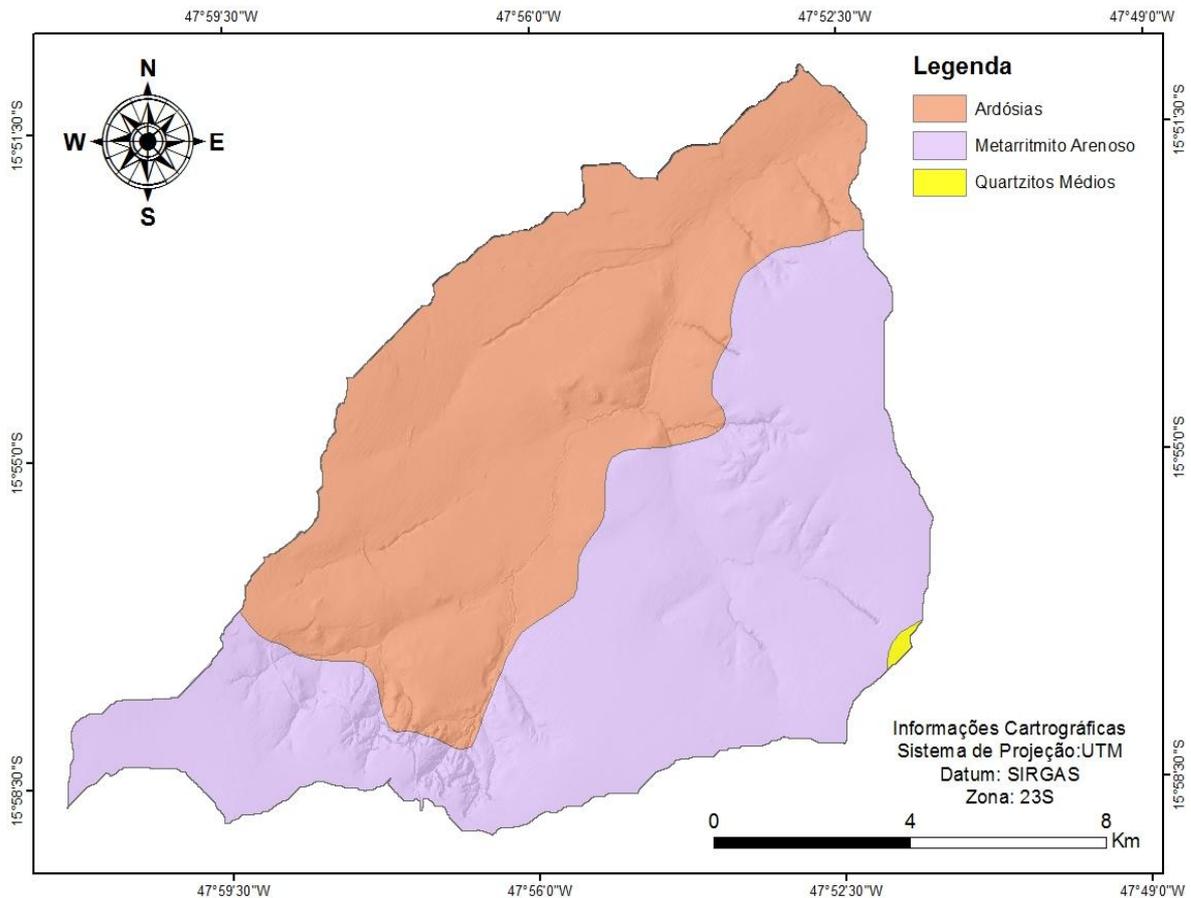


Figura 10- Geologia da bacia do Gama (Campos, 2010).

O mapa de solos (figura 11) é representada por Latossolo Vermelho (46,19%) e Latossolo Vermelho-Amarelo (19,63%), Cambissolo (19,24%), solo Hidromórfico (14,63%) e o Plintossolo (0,31%) (tabela 4).

Tabela 4 Tabela da pedologia da bacia do ribeirão do Gama.

Classe do Solo	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Latossolo Vermelho	67,68	46,19%
Latossolo Vermelho-Amarelo	28,76	19,63%
Cambissolo	28,19	19,24%
Hidromórfico	21,44	14,63%
Plintossolo	0,45	0,31%

A bacia encontra-se inserida em dois compartimentos geomorfológicos distintos, assim designadas por Novaes Pinto (1993): Encostas das chapadas da contagem e de Brasília e depressão do Paranoá. A Depressão do Paranoá é caracterizada com inclinações e dissecções vindo do alto das Chapadas da Contagem e de Brasília, indo em direção dos vales, com declividades variando

de 20% a 50%, próximas a algumas nascentes, como por exemplo, o córrego Capetinga. Ao sul e sudoeste da bacia estão áreas localizadas nas chapadas que tem o relevo plano com suaves ondulações e declividades de 10% a 20% (NOVAES PINTO, 1987). Nas áreas de relevo plano a suavemente ondulado, a densidade de drenagem é baixa em função da menor dissecação, onde predominam os Latossolos. Por outro lado, as bordas das chapadas apresentam dissecações pronunciadas, o que caracteriza uma situação de instabilidade devido à baixa relação pedogênese/erosão dos solos (RESENDE et al., 1995).

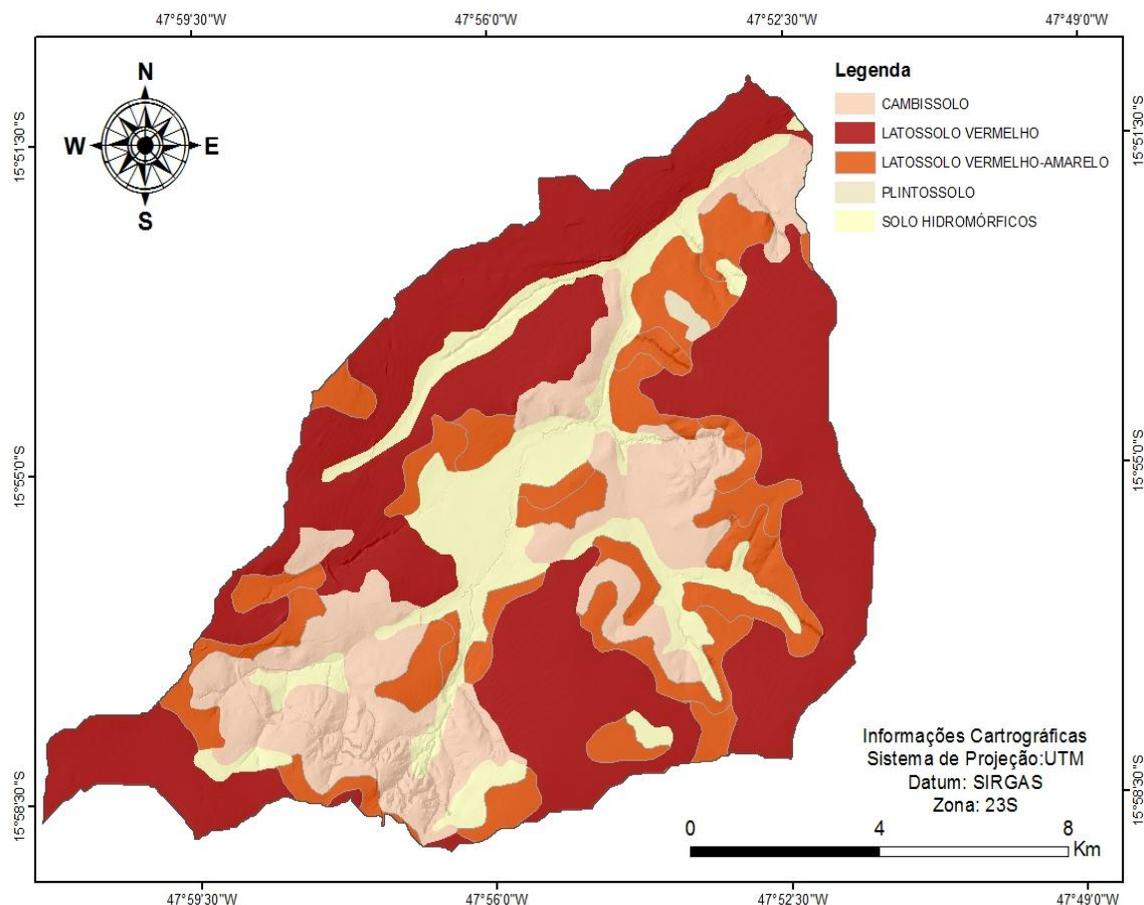


Figura 11- Pedologia da bacia do Gama (EMBRAPA, 2004).

O modelo digital de elevação gerado (figura 12 B), representa a altimetria da bacia, onde a altitude máxima é de 1271 metros e a mínima de 1000 metros. Esse MDE foi elaborado a partir dos pontos cotados e das curvas de nível da Terracap de 2010 na escala de 1:10.000. O modelo de elevação foi feito através da ferramenta *Topo To Raster* e também foi utilizado a ferramenta *Fill Sink* do *ArchoHydro* para o preenchimento das depressões e retirado os picos

do MDE. Com o mesmo MDE foi gerado o mapa de declividade, onde é possível observar que é uma bacia pouco declivosa, sendo a sua declividade máxima de 50° (figura 12 A).

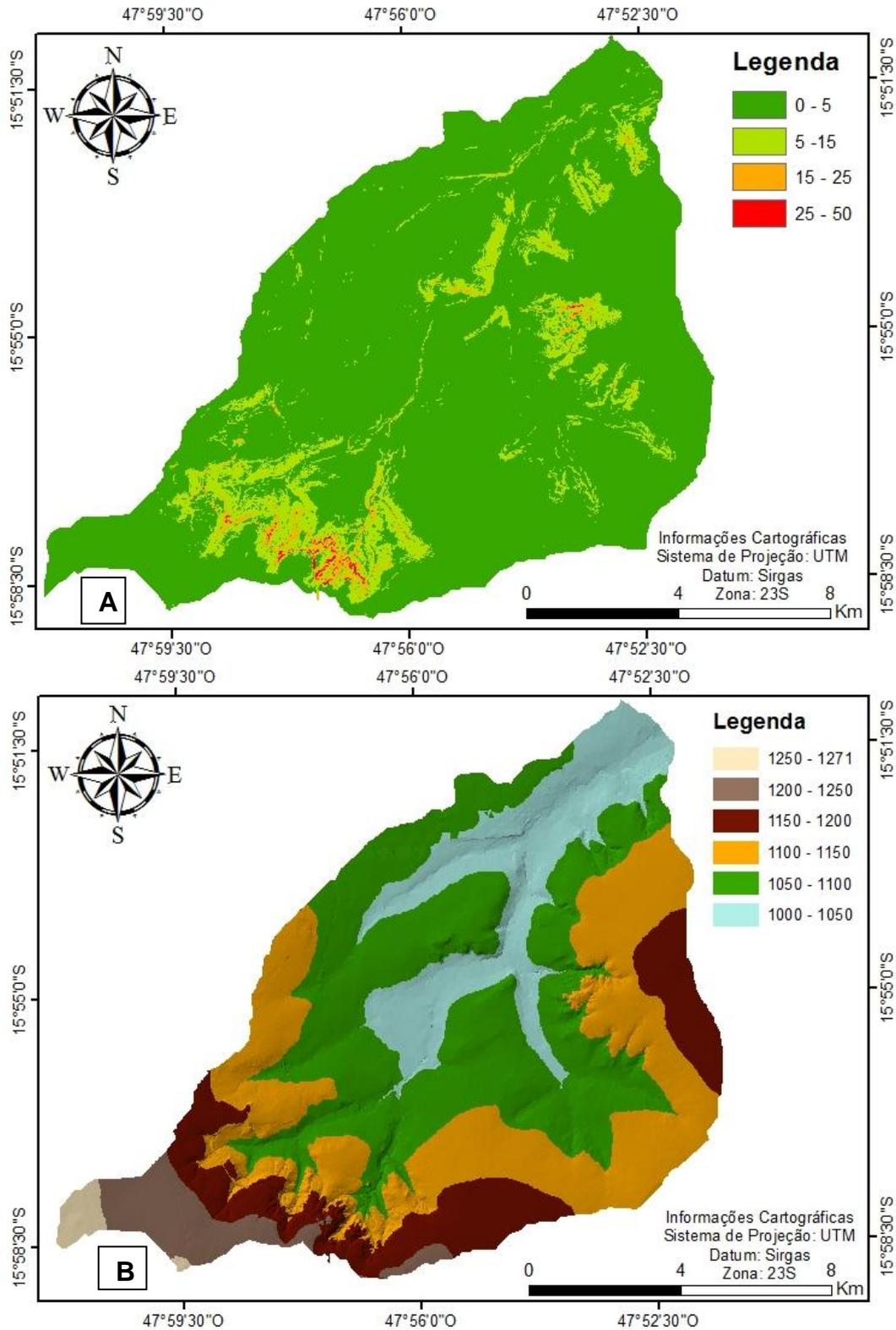


Figura 12 - a) Declividade da bacia do Gama; b) Hipsometria da bacia do Gama.

Os gráficos abaixo mostram o comportamento de cada dado climático utilizados neste trabalho. Os dados de precipitação, apresentados na figura 13, demonstram o comportamento da carga total de chuva por médias mensais do ano de 2001 ao ano de 2014 das quadro estações pluviométricas usadas neste trabalho. Enquanto na figura 14, representa a precipitação total de cada estação entre os 14 anos utilizados.

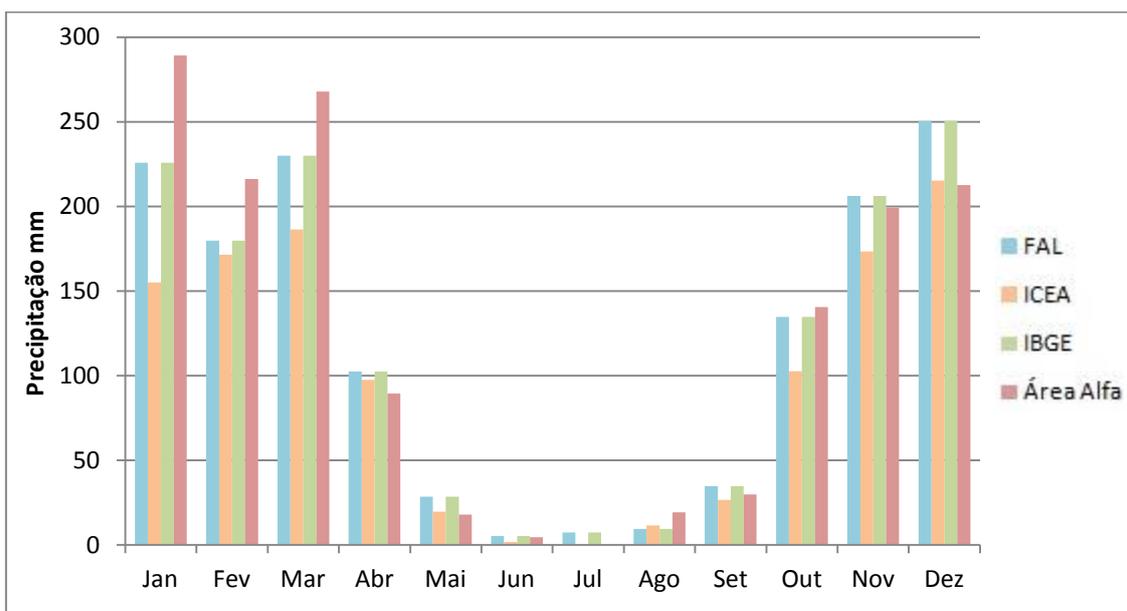


Figura 13 Comportamento da média mensal de precipitação dos anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada

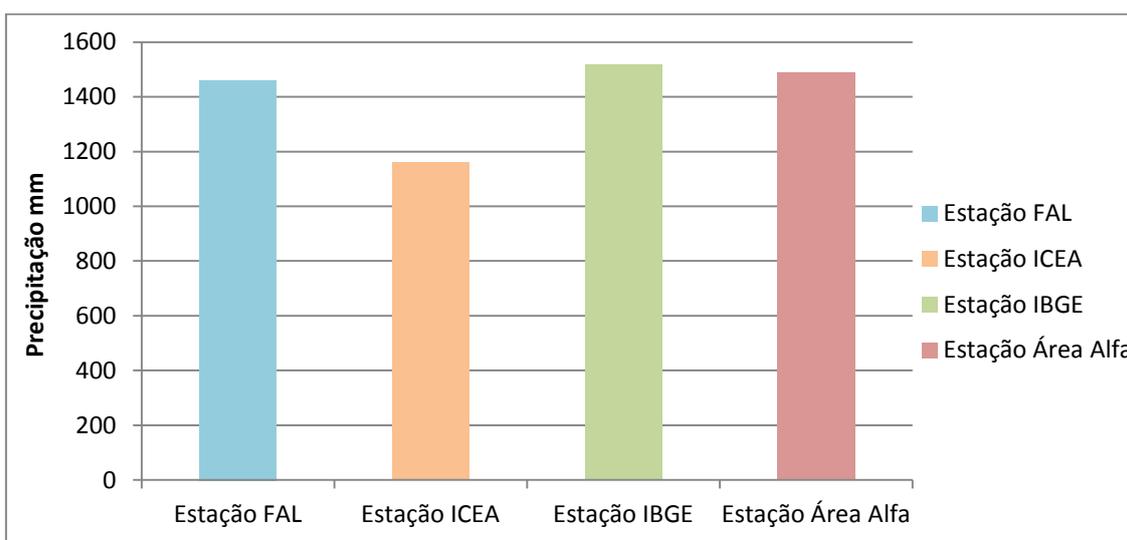


Figura 14 Comportamento da média dos totais anuais de precipitação entre os anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada.

É possível observar, a partir do gráficos acima, que há duas estações bem definidas: uma estação de seca, se estendendo entre maio e setembro com precipitações mensais totais variando de aproximadamente 3 mm no mês de julho a 30 mm no mês de setembro, e outra chuvosa, de outubro a abril com maior concentração das chuvas entre os meses de dezembro, janeiro e março, em torno de 200mm mensais.

O volume de chuva anual na bacia do ribeirão do Gama é em média 1400 mm, sendo a Estação Área Alfa com o maior volume registado (1516 mm) e a Estação ICEA com o menor volume medido (1161 mm). Também é possível reparar que as estações FAL, IBGE e Área Alfa possuem comportamento mais semelhante em relação as medições de precipitação Cabe lembrar que as estações Alfa e IBGE estão nas cabeceiras da bacia, em áreas em torno de 1200m de altitude, enquanto a estação FAL, está na porção média da bacia e a estação aeronáutica em sua foz, próximo a 1000metros de altitude.

O comportamento durante o ano das temperaturas máximas e mínimas pode ser observado na figura 15.

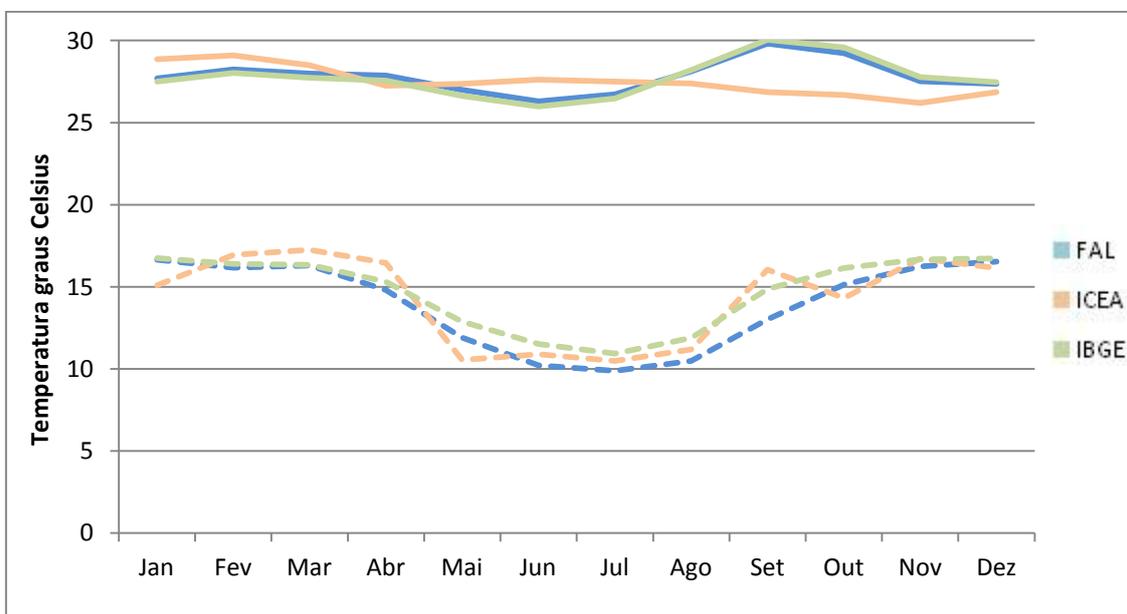


Figura 15 Comportamento da média mensal de temperatura máxima (linha contínua) e mínima (linha achurada) dos anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas utilizada.

Observa-se que as temperaturas mínimas durante o ano, segundo a análise dos dados acima, podem variar de 9,89°C a 17,26°C, respectivamente

nos meses de março (estação ICEA e FAL) e outubro (estação ICEA). As temperaturas máximas possuem um comportamento mais constantes ao longo dos meses, podendo variar de 30°C e 26°C, nos meses de setembro (estação IBGE) e novembro (estação ICEA). É importante notar que, mesmo no inverno, ocorrem temperaturas altas, em torno de 27°C.

A umidade relativa média do ar (UR) na bacia estudada é de aproximadamente 70% e não supera 80% em nenhum dos meses do ano, podendo chegar nos períodos de estiagem aos 15% ou menos. A umidade relativa apresenta média máxima de 78% nos meses de fevereiro e março (estação ICEA), e chega à média mínima de 49% no mês de agosto (estação IBGE). Nota-se que agosto e setembro apresentam as menores médias mensais, 53% e 54% respectivamente, e também são nos meses que se registram os dias mais secos do ano (figura 16).

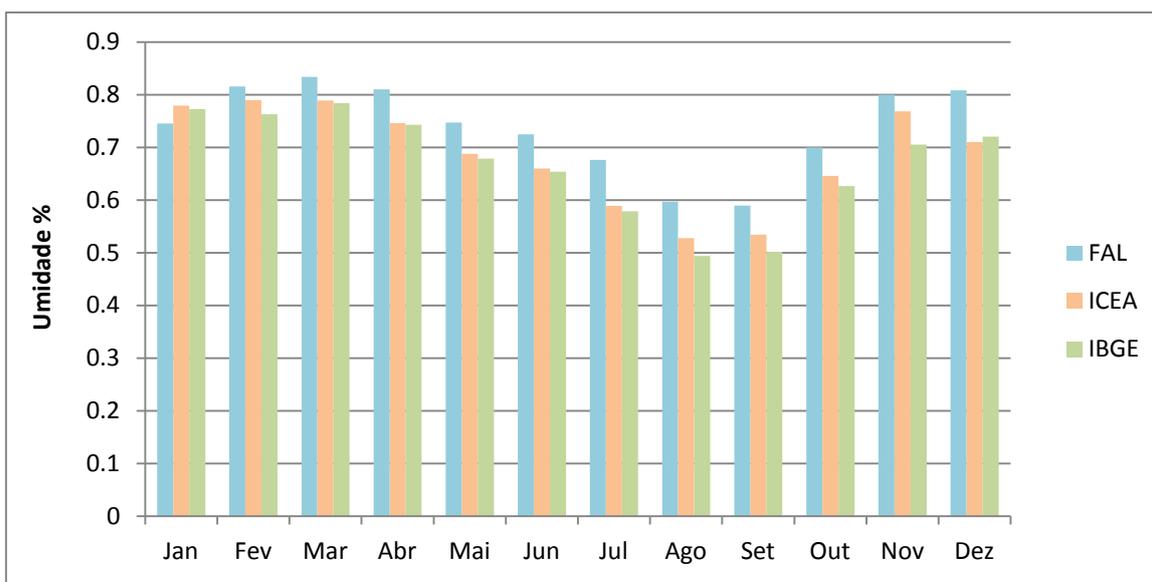


Figura 16 Comportamento da média mensal de umidade relativa dos anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas utilizada.

O cenário apresentado pela radiação solar incidente está apresentado na figura 17, onde mostra o comportamento da radiação solar ao longo dos meses do ano. É importante lembrar que a radiação solar é apenas a registrada na estação meteorológica da estação da FAL, como já foi dito antes. Nota-se uma pequena variação entre os valores de radiação ao longo dos meses, isso possivelmente se deve a inclinação do eixo de rotação da Terra. Observa-se

que o meses com maior radiação solar são agosto e setembro com 18 J/m², que também são os que possuem menor umidade relativa, e o meses com menor radiação solar são maio e junho com 14 J/m².

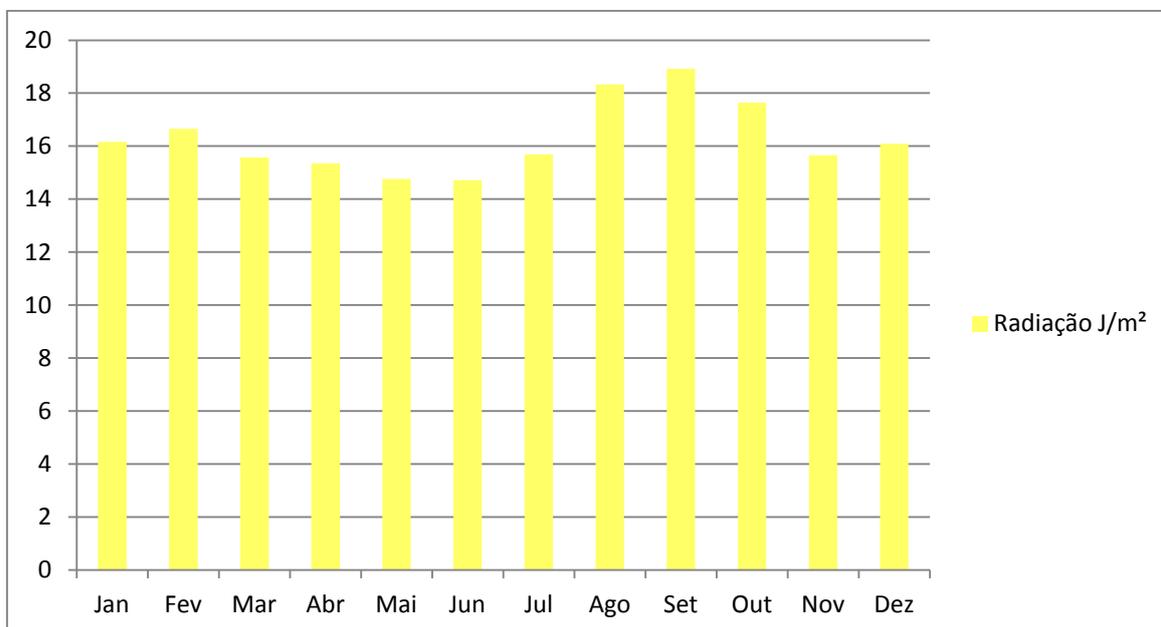


Figura 17 Comprimento da média mensal de radiação solar entre os anos de 2001 a 2014 de cada estação meteorológicas da FAL.

A velocidade do vento durante os meses do ano está representada na figura 18. É possível perceber claramente uma discrepância com relação a estação meteorológica da aeronáutica (ICEA) em comparação com as outras utilizadas (FAL e IBGE). As estações da FAL (1080 metros de altimetria) e IBGE (1100 metros de altimetria) estão mais próximas entre si (5 km de distância) e a estação do ICEA (1060 metros de altimetria) está localizada a uma distância de apenas 7,6 km da estação da FAL e a 9,2 km da estação do IBGE. A estação da aeronáutica apresenta o dobro do valor em relação a média dos dados das outras duas estações. As estações da FAL e IBGE possuem como média anual desses 14 anos de estudo 1,2 m/s² de velocidade do vento, enquanto a estação ICEA possui como média anual 2,2 m/s² e o seu comportamento ao longo do ano é o oposto das outras estações. Por esse motivo não foram utilizados os dados de velocidade do vento dessa estação neste estudo.

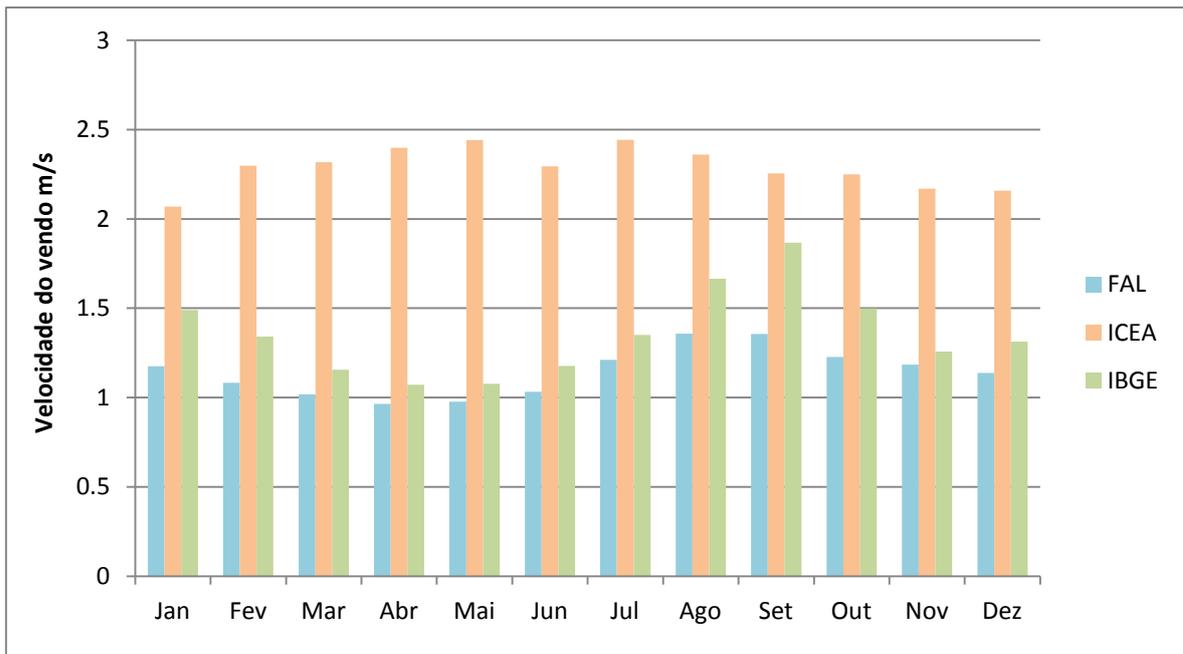


Figura 18 Comportamento da média mensal de velocidade do vento dos anos de 2001 a 2014 de cada estação utilizada.

4.2. Materiais Utilizados

4.2.1. Sistema Computacional

Para a realização da modelagem, foram utilizados os seguintes programas:

- ArcGIS 10.2.2 com a extensão ArcGIS *Spatial Analyst* desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, Redlands, CA, EUA;
- ArcSWAT 2012.10.15, desenvolvido pela *Environmental Stone* em colaboração com *Texas A&M Spatial Sciences Laboratory, Blackl and Research e Extension Center*;
- SWAT-CUP 5.1.6.2, o *SWAT Calibration and Uncertainty Programs*, que está relacionado com o *software ArcSWAT*.

4.2.2. Dados de entrada do modelo SWAT

O modelo SWAT requer uma série de informações sobre a bacia estudada para o seu funcionamento, tais como: mapa de classe de solo, uso do solo, Modelo Digital de Elevação (MDE), séries temporais de precipitação,

radiação solar, velocidade do vento, evaporação, temperatura máxima e mínima do ar, entre outros (tabela 5).

Tabela 5- Fonte dos dados de entrada para a simulação.

DADOS DE ENTRADA	DETALHE DOS DADOS DE ENTRADA	FONTE DOS DADOS
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Pontos cotados e curvas de nível (distância vertical 5m), escala 1:10.000	Terracap (2010)
Rede Hidrográfica	Mapa de rede hidrográfica, escala 1:10.000	Terracap (2010)
Uso e Cobertura da Terra	Mapa e Tabela com características dos usos da terra. Escala 1:10.000	Produção manual por meio do ArcGIS 10.2, com base na ortofoto de 2010 com resolução espacial de 2 metros disponibilizada pela Terracap
Classes de Solos da bacia	Mapa e Tabela com características do solo. Escala 1:100.000	EMBRAPA (2004)
Precipitação Diária	Código, nome e coordenadas e altitude das estações. Dados diários de precipitação	Estação Área Alfa (código CAESB Nº 01547014) Estação EMS (código DCEA Nº 83378) Estação Meteorológica da Fazenda Água Limpa-DF Estação IBGE RECOR
Dados Meteorológicos	Código, nome e coordenadas das estações. Dados de temperatura máxima e mínima do ar, precipitação, radiação solar e velocidade do vento.	Estação Meteorológica da Fazenda Água Limpa-DF, Estação Meteorológica EMS (código DCEA Nº 83378), Estação Meteorológica IBGE RECOR
Dados Fluviométricos	Coordenadas e dados diários	Estação Fluviométrica Gama-Base Aérea (Caesb)

A figura abaixo mostra a localização das estações utilizadas no modelo SWAT (figura 19):

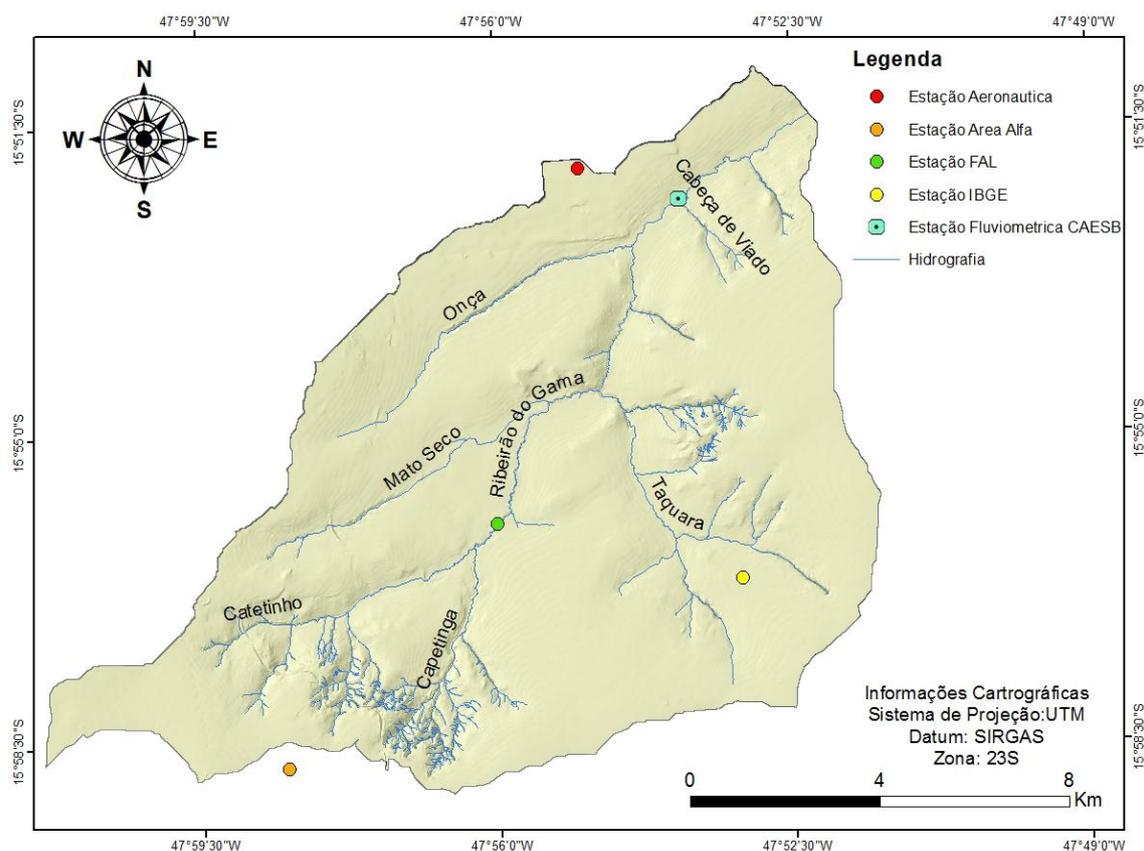


Figura 19 Localização nas estações meteorológicas e fluviométrica utilizadas no modelo SWAT.

4.2.3. Parâmetros Climáticos

4.2.3.1. Dados Mensais

A série histórica de dados climáticos utilizada para realizar a simulação hidrológica na bacia do Gama abrange o período de 01/01/2001 a 31/12/2014. Os dados climáticos necessários ao modelo são dados diários referentes a precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento.

Esses dados são provenientes das estações meteorológicas da Fazenda Água Limpa, IBGE e ICEA (já citada na tabela 4), que se encontram dentro da bacia estudada. Como as estações meteorológica do ICEA e do IBGE não trabalham com dados de radiação solar, foi usado a série da estação da FAL

para completar os dados. Para a estação ICEA não foram utilizados os dados de velocidade do vento, por apresentar um comportamento discrepante em relação as outras estações.

O processamento do modelo SWAT requer que sejam definidos valores estatisticamente representativos das séries temporais das estações meteorológicas utilizadas (SALLES, 2012). Algumas informações básicas devem ser informadas ao modelo, tais como (Tabela 6):

Tabela 6- Dados estatísticos de clima a serem informados ao modelo (Carvalho, 2014).

NOME DO CAMPO	DESCRIÇÃO
Temperatura	
TMPMX	Média máxima da temperatura do ar
TMPMN	Média mínima da temperatura do ar
TMPSTDMX	Desvio padrão máximo da temperatura máxima do ar
TMPSTDMN	Desvio padrão máximo da temperatura mínima do ar
Precipitação	
PCPMM	Precipitação média
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação diária
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia seco
PR_W2	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia úmido
PCPD	Número médio com dias de chuva em 1 mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de 30 minutos
RAIN_YRS	Número de anos utilizados para determinação de RAINHHMX
Outros	
SOLARAV	Radiação solar média por mês
DEWPT	Umidade ou Temperatura média do ponto de orvalho.
WNDVAV	Velocidade média do vento

A maior parte dessas estatísticas podem ser obtidas a partir de uma *macro* do programa *Microsoft Excel* chamado *WSN Excel Macro*, disponibilizada no próprio site do SWAT. Todos os parâmetros citados na tabela podem ser calculados pela *macro* exceto o RAINHHMX. O parâmetro RAINHHMX foi calculado de acordo com o descrito por Taborga-Torrico (1974).

O *WSN macro*, requer dados diários de precipitação, radiação, temperatura (máxima e mínima), velocidade do vento, precipitação máxima de 30 minutos e umidade ou temperatura do ponto de orvalho. Todas as unidades dos dados de entrada da macro são iguais as unidades utilizadas pelo ArcSWAT. É também preciso informar o nome, latitude, longitude e a altitude de cada estação utilizada. A macro disponibiliza exemplos para organização dos dados de entrada e o manual para melhores informações.

Os dados de entrada para a estação FAL (tabela 7) IBGE (tabela 8) e ICEA (tabela 9) são:

Tabela 7 Dados climáticos da estação FAL

Nome do campo	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
TMPMX	27.70	28.24	27.99	27.87	27.00	26.29	26.72	28.13	29.82	29.23	27.52	27.36
TMPMN	16.66	16.17	16.29	14.80	11.91	10.22	9.89	10.48	13.02	15.13	16.23	16.54
TMPSTDMX	2.29	1.89	1.72	1.61	1.75	1.35	1.84	2.01	2.51	3.27	2.56	2.61
TMPSTDMN	1.60	1.59	1.65	2.12	2.32	2.36	3.13	3.10	2.97	2.33	1.95	2.20
PCPMM	211.62	195.21	234.35	111.44	29.49	5.25	1.49	20.78	35.75	148.72	224.12	241.77
PCPSTD	10.90	13.65	13.16	8.71	4.84	1.06	0.67	3.97	4.78	10.24	13.49	12.50
PCPSKW	2.32	3.71	2.71	3.26	7.86	8.20	19.43	8.70	7.36	3.40	2.93	2.75
PR_W1	0.38	0.40	0.38	0.24	0.10	0.06	0.02	0.04	0.10	0.25	0.45	0.46
PR_W2	0.84	0.73	0.84	0.68	0.44	0.30	0.33	0.53	0.62	0.74	0.81	0.85
PCPD	22.07	17.14	21.50	13.29	5.14	2.36	0.86	2.29	5.43	15.36	20.57	23.50
RAINHMN	36.076	67.338	48.894	35.67	35.38	7.54	7.946	31.204	36.25	47.27	46.632	49.648
SOLARAV	16.1572054	16.6570313	15.5696792	15.348633	14.765889	14.713782	15.687142	18.334249	18.9167197	17.642573	15.65778617	16.0876102
DEWPT	0.82275861	0.81537658	0.83336273	0.80995476	0.7709752	0.724546	0.676157	0.5964111	0.58914524	0.6997749	0.799722708	0.80793353
WNDVAV	1.17488999	1.08309291	1.0178529	0.96392593	0.9771034	1.0321564	1.2120622	1.3578017	1.35569792	1.2279522	1.183734375	1.13882056
RAIN_YRS	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabela 8 Dados climáticos da estação IBGE

Nome do campo	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
TMPMX	27.50	28.02	27.73	27.56	26.62	25.98	26.46	28.19	30.05	29.58	27.77	27.46
TMPMN	16.75	16.39	16.35	15.31	12.87	11.51	10.94	11.89	14.86	16.14	16.67	16.73
TMPSTDMX	2.23	1.88	1.64	1.46	1.80	1.45	1.97	2.06	2.36	3.13	2.33	2.34
TMPSTDMN	1.63	1.64	1.68	2.01	2.38	2.45	2.25	2.38	2.34	1.83	1.45	1.56
PCPMM	225.80	179.68	229.93	102.41	28.51	5.30	0.52	9.36	34.75	134.59	206.09	250.56
PCPSTD	13.14	12.53	12.99	8.39	4.31	1.54	0.20	1.99	5.12	10.83	13.29	13.63
PCPSKW	2.83	3.34	2.63	3.50	6.30	11.03	14.79	9.09	6.61	4.62	3.50	2.78
PR_W1	0.40	0.34	0.43	0.20	0.09	0.02	0.01	0.03	0.10	0.25	0.49	0.44
PR_W2	0.75	0.68	0.69	0.59	0.30	0.23	0.40	0.56	0.41	0.66	0.67	0.76
PCPD	18.79	14.86	18.21	10.00	3.36	0.93	0.36	1.79	3.86	12.79	17.71	20.07
RAINHMN	49.648	58.232	56.492	37.932	24.186	12.528	2.03	14.268	32.596	56.55	68.614	62.524
SOLARAV	16.1572054	16.6570313	15.5696792	15.348633	14.765889	14.713782	15.687142	18.334249	18.9167197	17.642573	15.65778617	16.0876102
DEWPT	0.77228111	0.76296203	0.78382488	0.74290476	0.6785023	0.6536905	0.5782949	0.4936636	0.50147619	0.6263364	0.762190476	0.78009217
WNDVAV	1.48986175	1.34227848	1.15506912	1.07166667	1.0778341	1.1778571	1.3502304	1.6647458	1.86695238	1.4983871	1.258571429	1.31306452
RAIN_YRS	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabela 9 Dados climáticos da estação ICEA

Nome do campo	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
TMPMX	28.87	29.09	28.50	27.25	27.37	27.61	27.50	27.38	26.85	26.69	26.20	26.85
TMPMN	15.09	16.94	17.26	16.45	10.55	10.90	10.49	11.18	16.05	14.32	16.23	16.14
TMPSTDMX	2.38	2.76	2.91	2.33	2.67	2.07	1.96	1.68	1.96	2.23	1.97	2.04
TMPSTDMN	2.66	2.38	1.70	1.30	2.34	2.26	3.06	2.90	2.43	2.44	1.95	2.20
PCPMM	155.05	171.44	186.27	97.41	19.64	1.65	0.25	11.45	26.66	102.64	173.29	215.28
PCPSTD	9.27	13.05	10.76	7.66	2.97	0.60	0.10	2.72	3.25	9.60	10.54	13.20
PCPSKW	3.04	4.19	2.76	3.56	6.31	16.66	17.60	10.64	4.73	5.87	4.32	4.29
PR_W1	0.40	0.37	0.38	0.19	0.09	0.03	0.02	0.03	0.10	0.29	0.49	0.46
PR_W2	0.76	0.73	0.76	0.66	0.42	0.20	0.00	0.59	0.59	0.69	0.78	0.79
PCPD	19.71	16.14	19.21	11.21	4.29	1.07	0.50	2.07	5.29	14.79	20.50	21.36
RAINHMX	34.394	75.052	42.746	35.67	16.008	6.554	1.102	22.62	16.646	61.48	67.628	80.62
SOLARAV	16.1572054	16.6570313	15.569679	15.348633	14.765889	14.71378	15.687142	18.334249	18.9167197	17.642573	15.65778617	16.0876102
DEWPT	0.77905	0.78948	0.78890	0.7455443	0.68775	0.65995	0.58866	0.52779	0.53446	0.6576466	0.76839	0.71999
RAIN_YRS	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

4.2.3.2. Dados diários

Esses dados são de informações opcionais, pois o SWAT pode, a partir dos dados mensais, simular essas informações através do "gerador de clima" existente no programa. No entanto é recomendado que pelo menos os dados de pluviosidade sejam informados ao modelo (STRAUCH et al., 2010). Os dados de precipitação pertencem às quatro estações distintas distribuídas dentro da bacia: a estação Área Alfa (apenas a pluviometria), IBGE, ICEA e FAL (citadas na tabela 4).

4.2.4. Parâmetros de solo

O mapa de solos utilizado, foi elaborado pela EMBRAPA no ano de 2004 na escala 1:100.000. O SWAT requer uma série de dados acerca das características físicas dos solos, tais como: classificação do solo ou nome dado a cada classe; número de horizontes a serem considerados por classe de solo; grupo hidrológico do solo (A, B, C e D); profundidade máxima das raízes (mm); profundidade de cada horizonte (mm); densidade do solo (g/cm³); capacidade de armazenamento de água do solo (mm/mm); condutividade hidráulica saturada (mm/hr); conteúdo de carbono orgânico do solo (%); porcentagem de argila no solo (%); porcentagem de silte no solo (%); porcentagem de areia no solo (%); porcentagem de cascalho no solo (%) e erodibilidade do solo (t.m².hr/m³.t.cm) (Neitsch et al., 2005). Todos esses parâmetros foram retirados

do estudo feito por Lima et al., (2013) para a realização deste trabalho, exceto os dados de porcentagem de silte, argila, areia e cascalho do solo. Esses dados foram extraídos dos trabalhos de Rodolfo Junior (2015) e Barbosa (2009) realizados na bacia do ribeirão do Gama.

O objetivo do estudo feito por Lima et al., (2013), foi de apresentar uma base de dados de solo de referência para aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas do Cerrado. Com dados coletados em 66 locais e abrangendo sete classes de solo: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Cambissolo, Gleissolo, Plintossolo, Afloramento de Rocha. Os autores mediram as seguintes características: densidade do solo, curva de retenção, condutividade hidráulica, matéria orgânica e textura.

Com esses dados foram geradas três tabelas (tabela 10, 11 e 12), uma com valores médios (referência para os valores iniciais da modelagem) e outras duas tabelas com seus possíveis intervalos de variação (útil para a etapa de calibração).

Tabela 10- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 1 (Lima et al., 2013).

	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOLZ1	SOLBD1	SOLAWC 1	SOLK1	SOL_CB N1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	USLE_K1
Latossolo Vermelho	LV	3	A	300,00	300,00	0,90	0,12	612,20	1,67	53,93	28,37	12,94	0,00	0,018
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	300,00	300,00	0,94	0,11	1112,85	1,69	57,36	24,61	18,03	0,00	0,019
Latossolo Amarelo	LA	3	A	300,00	300,00	0,86	0,15	2602,59	1,65	58,81	21,75	19,44	0,00	0,017
Neossolo Quartzarênico	RQ	3	A	300,00	300,00	1,30	0,08	281,26	0,60	30,10	9,65	60,25	0,00	0,031
Cambissolo	CX	2	C	300,00	300,00	0,99	0,11	874,33	1,58	49,84	32,95	17,20	0,00	0,023
Gleissolo	GX	2	D	300,00	300,00	0,87	0,13	494,44	2,56	51,59	28,54	19,86	0,00	0,021
Plintossolo	FX	2	D	300,00	300,00	1,09	0,14	553,78	1,14	37,97	21,91	40,13	0,00	0,030
Afloramento de Rocha	AFLR	1	D	300,00	300,00	2,62	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	99,99	0,001

Tabela 11- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 2 (Lima et al., 2013).

	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOLZ2	SOLBD2	SOLAWC 2	SOLK2	SOL_CB N2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	USLE_K2
Latossolo Vermelho	LV	3	A	1000,00	1000,00	0,94	0,14	461,07	1,01	66,28	22,93	10,79	0,00	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	1000,00	1000,00	0,96	0,13	401,26	0,95	64,37	20,54	15,09	0,00	0,017
Latossolo Amarelo	LA	3	A	1000,00	1000,00	0,94	0,12	505,50	0,87	62,28	19,89	17,83	0,00	0,015
Neossolo Quartzarênico	RQ	3	A	1000,00	1000,00	1,38	0,08	102,85	0,40	34,35	9,58	42,90	0,00	0,030
Cambissolo	CX	2	C	1000,00	1000,00	1,00	0,16	262,52	0,72	49,16	34,31	16,53	0,00	0,023
Gleissolo	GX	2	D	1000,00	1000,00	0,87	0,13	494,44	2,56	51,59	28,54	19,86	0,00	0,021
Plintossolo	FX	2	D	1000,00	1000,00	1,09	0,14	553,78	1,14	37,97	21,91	40,13	0,00	0,030

Tabela 12- Dados utilizados de perfis dos solos. Horizonte 3 (Lima et al., 2013).

	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOLZ3	SOLBD3	SOLAWC 3	SOLK3	SOL_CB N3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	USLE_K3
Latossolo Vermelho	LV	3	A	2000,00	3500,00	0,94	0,14	142,32	1,01	66,28	22,93	10,79	0,00	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	2000,00	3500,00	0,96	0,13	230,05	0,95	64,37	20,54	15,09	0,00	0,017
Latossolo Amarelo	LA	3	A	2000,00	3500,00	0,94	0,12	186,92	0,87	62,28	19,89	17,83	0,00	0,015
Neossolo Quartzarênico	RQ	3	A	2000,00	3500,00	1,38	0,08	102,85	0,40	34,35	9,58	42,90	0,00	0,032

Os dados de entrada utilizados no modelo SWAT neste estudo foram (tabela 13):

Nome do solo	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	USLE_K1
Latossolo Vermelho	LV	3	A	300,00	300	0,90	0,12	612,20	1,67	54,36	31,63	14,01	00,00	0,018
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	300,00	300	0,94	0,11	1112,85	1,69	57,76	30,49	14,75	00,00	0,019
Cambissolo	CX	2	C	300,00	300	0,99	0,11	874,33	1,58	43,55	28,03	28,42	00,00	0,023
Gleissolo	GX	2	D	300,00	300	0,87	0,13	494,44	2,56	42,72	34,53	22,75	00,00	0,021
Plintossolo	FX	2	D	300,00	300	1,09	0,14	553,78	1,14	37,97	21,91	40,12	00,00	0,030
Nome do solo	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z2	SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	USLE_K2
Latossolo Vermelho	LV	3	A	1000,00	1000	0,94	0,14	461,07	1,01	66,36	24,8	8,84	00,00	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	1100,00	1000	0,96	0,13	401,26	0,95	58,73	26,88	14,39	00,00	0,017
Cambissolo	CX	2	C	1000,00	1000	1,00	0,16	262,52	0,72	49,16	34,31	26,53	00,00	0,023
Gleissolo	GX	2	D	1000,00	1000	0,87	1,13	494,44	2,56	62,6	26,30	11,1	00,00	0,021
Plintossolo	FX	2	D	1000,00	1000	1,09	0,14	553,78	1,14	37,97	21,91	40,13	00,00	0,030
Nome do solo	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z3	SOL_BD3	SOL_AWC3	SOL_K3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	USLE_K3
Latossolo Vermelho	LV	3	A	3000,00	3000	0,94	0,14	142,32	1,01	66,28	22,93	10,79	00,00	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	3	A	3000,00	3000	0,96	0,13	230,05	0,95	64,37	20,54	15,09	00,00	0,017

Tabela 13 Dados de entrada de solo da bacia do ribeirão do Gama para o modelo SWAT.

Foi adotada a configuração elaborada por Lima et al, (2013) para as profundidades das camadas de solo (figura 20):

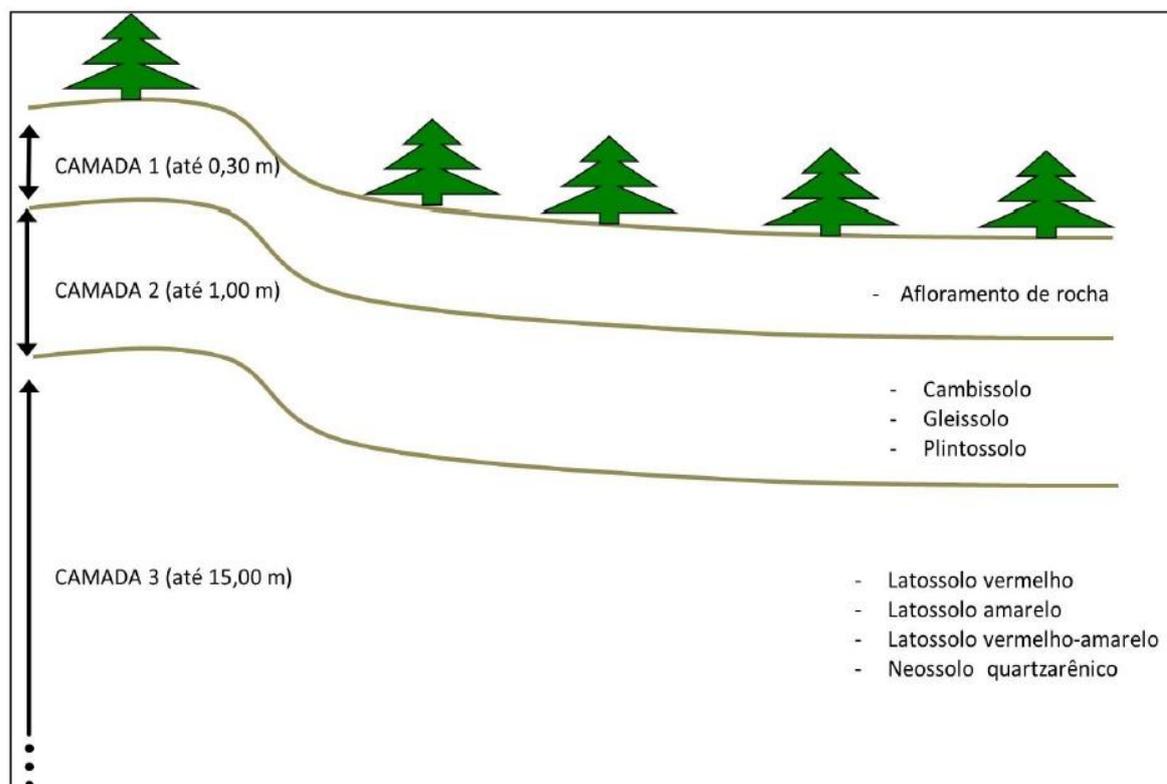


Figura 20 - Modelo conceitual para representação das camadas de solo no SWAT (Carvalho, 2014).

4.2.5. Parâmetros do uso do solo

O mapa de uso do solo foi classificado em 11 classes (tabela 14): Cerrado, Campo, Mata Galeria, Murundus/Áreas Alagáveis, Água, Pasto, Hortefruti, Solo Exposto/Vias não Pavimentadas, Vias Pavimentadas, Área de Baixa Densidade Urbana, Área de Média Densidade Urbana e Área de Alta Densidade Urbana. Assim como foi preciso determinar os parâmetros de cada classe de solo existente na bacia, também foi necessário procedimento de preparo da base de dados para cada classe do uso de solo.

Tabela 14- Caracterização dos diferentes usos e ocupação do solo na bacia do Gama. Descrição das classes segundo Castro (2013), Ferrigo (2014) e Neitsch (2009).

Imagem do uso	Classe do uso	Descrição de classe
	Área com alta densidade urbana	Áreas de urbanização que apresentam mais de 70% de impermeabilização.
	Área com média densidade urbana	Áreas de urbanização que apresentam entre 50 e 70% de impermeabilização.
	Área com baixa densidade urbana	Áreas de urbanização que apresentam menos que 30% de impermeabilização.
	Estrada pavimentada	Rodovias e vias urbanas que apresentam sua superfície de rolamento com pavimento asfáltico ou de concreto.
	Estrada não pavimentada	Rodovias, vias urbanas e vias rurais que não apresentam pavimento asfáltico ou de concreto.
	Solo Exposto	Áreas com retirada total da cobertura vegetal, incluindo solos em pousio.
	Pasto	Áreas com vegetação predominantemente herbáceo e algumas árvores esparsas,

		Hortefruti	Áreas com cultivo de produtos provenientes de hortas, geralmente, frutas, legumes, hortaliças.
		Campo	Áreas com vegetação herbáceo-arbustiva, com arbustos e subarbustos esparsos e algumas árvores.
		Cerrado	Áreas de vegetação nativa com predomínio de espécies arbustivas e herbáceas.
		Mata Galeria	Áreas de vegetação típica ao longo das linhas de drenagem, localizando-se geralmente nos fundos dos vales.
		Campo de murundus/ Área úmida	Áreas predominadas por murundus e a porção rebaixada topograficamente, predominada por uma vegetação graminóide.
		Água	Áreas que contém permanentemente uma quantidade variável de água.

O modelo SWAT possui uma base de dados própria para diferentes classes de uso da terra, porém os dados são referentes às bacias estudadas nos Estados Unidos, que em grande parte dos casos, não se adequam a outras realidades. Como o modelo SWAT exige um grande número de informações acerca das classes de uso e não existe a disponibilidade de todos esses dados para a grande maioria das bacias brasileiras, foi necessário realizar uma adaptação dos tipos de usos empregados na bacia com as classes presentes no banco de dados do SWAT. Abaixo segue a tabela com a reclassificação das

classes de uso para a modelagem de acordo com os dados próprios do SWAT (tabela 15):

Tabela 15 - Classificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT.

Classes (mapa de uso)	Classes (SWAT)
Campo	Rangegrass
Cerrado	Forest deciduous
Mata Galeria	Forest-Evergreen
Murundus/Áreas Alagáveis	Wetland-Non-Forested
Pasto	Pasture
Hortefruti	Agricultural Land-Row Crop
Solo Exposto/Vias não Pavimentadas	Transportation
Vias Pavimentadas	Transportation
Área de Baixa Densidade Urbana	Residential-Low-Density
Área de Média Densidade Urbana	Residential-Medium-Density
Alta Densidade Urbana	Residential-High-Density

As principais adaptações foram realizadas nos valores de CN2 (tabela 16), em que foi feito uma análise dos valores disponíveis na própria base de dados do SWAT e os encontrados nos estudos de Satori (2004), Menezes (2013), Salles (2012), Castro (2013). As classes de Campo e Cerrado tiveram alguns outros dados modificadores, além do valor de CN2, para melhor se adequar a realidade do cerrado brasileiro. Também é importante informar que o modelo SWAT não permite que a mesma classe seja usada duas vezes, então no caso de Solo exposto/Vias não pavimentadas e Vias pavimentadas (onde foi usada a mesma classe no modelo, apenas modificando o valor de CN2), foi preciso criar classes distintas dentro do banco de dados do SWAT.

Tabela 16- Reclassificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT.

Classe Uso	A	B	C	D
Campo	49	69	79	84
Cerrado	39	61	74	80
Mata Galeria	20	40	45	50
Pastagem	49	69	79	84
Estrada Pavimentada	72	82	87	89
Estrada não pavimentada	59	74	82	86
Urbanização de baixa densidade	64	75	83	87
Urbanização de média densidade	68	79	86	89
Agricultura uso genérico	67	77	83	87
Água	92	92	92	92

4.2.6. Dados de carga líquida e sólida da bacia

Os dados de vazão foram obtidos junto a CAESB e são dados diários do período de 2001 a 2014. Já os dados de sedimento da CAESB são mensais do período 2012 a 2014. Com uma série histórica tão pequena e diferente da utilizada na de vazão, acaba sendo inviável fazer o processo de aquecimento, calibração e validação da produção de sedimento no modelo SWAT. Além do problema da pequena série histórica, os dados de sedimento começaram a ser colhidos pela CAESB em julho de 2012, apenas uma vez por mês e com alguns meses sem nenhum registro, por isso não foi usado neste trabalho. Cabe lembrar que as medições da CAESB, não acontecem durante os eventos e, portanto, não há uma curva chave adequada para esses dados.

Tendo em vista esses problemas, foram utilizados os dados do trabalho da Souza (2015) do ano de 2014 para apenas fazer uma comparação dos dados de sedimento observados e estimados pelo modelo SWAT, ou seja, a comparação foi feita apenas com o objetivo de verificar se uma boa qualificação da vazão, pode gerar, no modelo SWAT, bons resultados de produção de sedimento da bacia estuda em questão.

4.2.7. Delineamento da bacia

O primeiro processamento do modelo SWAT é referentes ao delineamento da bacia hidrográfica estudada. A bacia hidrográfica e as sub-bacias são delimitadas de acordo com o relevo e os divisores de água, e essa delimitação tem como base o modelo digital de elevação (MDE).

Para a delimitação da bacia e subbacias foi utilizado o SWAT *Watershed Delineator*, na qual se calcula, de acordo com o MDE, a direção do fluxo de drenagem, definição dos limites da bacia hidrográfica, rede de drenagem e as sub-bacias com os seus respectivos exutórios. Foram também definidas nessa etapa a presença do reservatório presente na bacia do Gama (Córrego Catetinho), no qual foram incluídos dados referentes ao ano que o reservatório começou a ser operacional, número da sub-bacia em que o reservatório está associado, volume d'água do reservatório e a sua área.

4.2.8. Criação das HRU's

Após o delineamento da bacia hidrográfica, com suas sub-bacias e rede de drenagem foram definidas as unidades de resposta hidrológica (HRU's). As HRU's são unidades que representam combinações de características comuns de solo, uso de solo e declividade dentro de cada subbacia (Neitsch et al., 2005). Abaixo segue o esquema de formação das HRUs (figura 21).

Vale lembrar que as cargas (de escoamento, sedimento, nutriente e pespicitas) não são transmitidas de uma HRU para outra dentro de cada subbacia, pois não há interações entre as HRUs, apenas entre as subbacias. Portanto, as cargas por HRUs são calculadas individualmente e depois somadas para, assim, definir as cargas totais da subbacia, que, a partir dessa, são transportadas à subbacia seguinte.

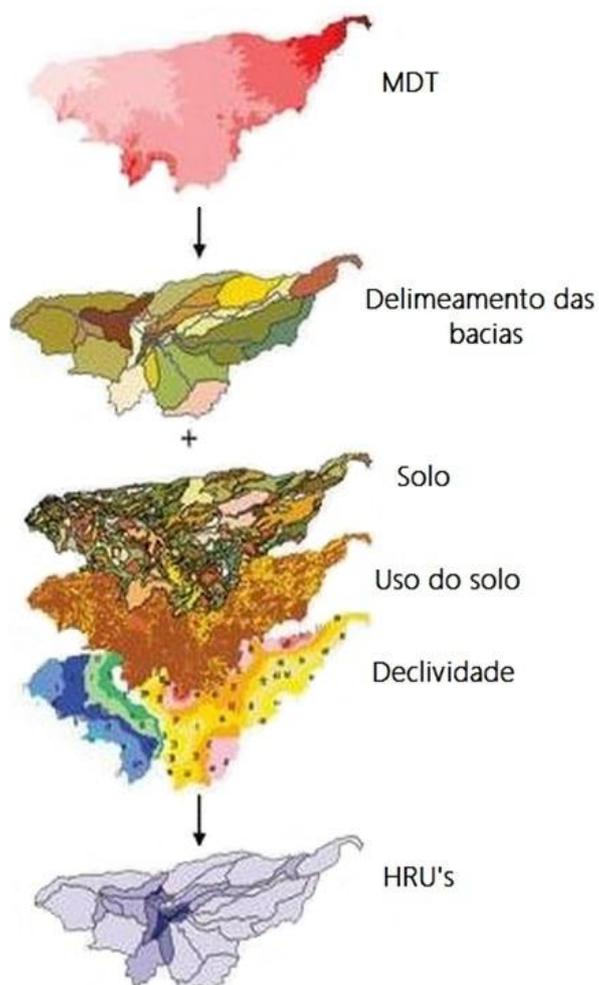


Figura 21 Esquema de formação das HRUs. Modificado de Pierluigi Cau (2012).

O mapa de declividade, juntamente com o mapa de solos e uso e cobertura, fornecem as características necessárias para que o modelo delimite as HRU's (WINCHELL et al., 2010). Antes de entrar com os mapas no modelo, primeiramente foi preciso fazer a compatibilização entre os mapas temáticos de solo e uso e cobertura com o banco de dados do ArcSWAT. Assim, o mapa pedológico e o de uso de solo foram classificados de acordo com a base de dados do modelo SWAT. Antes da criação das HRU's, o usuário pode definir a quantidade de classes (no máximo cinco classes) de declividade e o valor de intervalo de cada classe. Para a bacia do Gama foram adotadas três classes de declividade.

As classes definidas foram: 0% a 8%, de 8% a 20% e de 20% até o valor limite (999%). Foram escolhidas essas classes com base no trabalho feito pela Ferrigo (2014), na qual foi utilizada a classificação de Uberti et al., (1991). Foram estabelecidas três classes de declividade: (1) de 0 a 8 %, incluindo as classes de relevo plano e suavemente ondulado; (2) de 8 a 20%, representando a classe de relevo ondulado; e (3) acima de 20%. Essa classificação adotada foi também a que apresentou melhores resultados com relação a base de dado existente.

Depois de terem sido obtidos os mapas de declividade, solo e uso e ocupação de acordo com a base de dados do modelo, foi possível realizar a sobreposição desses mapas, criando, assim, o mapa de HRU's. Este mapa de HRU's pode ser alterado retirando-se as combinações de uso do solo, tipo de solo e declividade que representam frações insignificantes da bacia, e subbacias dividindo as classes de uso em outras classes (SALLES, 2012).

O modelo também possui três opções para a geração das HRU's, a primeira leva em consideração a combinação entre os tipos de solos, usos e declividades dominantes, a segunda utiliza a HRU dominante e a terceira opção considera múltiplas HRU's (WINCHELL et al., 2010). Para este estudo, optou-se pela definição de múltiplas HRU's, porém sem eliminar nenhuma combinação possível em nenhum dos níveis de sensibilidade.

4.2.9. Entrada de dados climáticos.

Nessa etapa é preciso que o usuário defina a localização do gerador do clima e das estações meteorológicas. Neste estudo, o gerador de clima foi preparado com os dados das estações meteorológicas da FAL, do IBGE e do ICEA, todas elas localizadas dentro da bacia hidrográfica do ribeirão do Gama, no período entre 01/01/2001 a 31/12/2014, onde foram fornecidos ao modelo os dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade, radiação solar e velocidade do vento. Quanto apenas à precipitação, utilizou-se os dados da estação Área Alfa, que está localizada a 0,5 km da bacia estudada.

Após terem sido realizadas as etapas do processamento da delimitação da bacia e subbacias, definição das HRU's e a definição dos parâmetros meteorológicos, o modelo SWAT encontra-se pronto para iniciar o processo de parametrização, na qual envolve a análise de sensibilidade, calibração (manual e/ou automática), análise de incerteza e, por fim, a validação.

4.2.10. Definição do período da simulação

No presente trabalho, só foi possível obter dados climatológicos diários registrados dentro da bacia para um período de quatorze anos, de 01/01/2001 a 31/12/2014, das quatro estações selecionadas para o estudo. Também há dados de vazão registrados diariamente para esses anos, o que permitiu a calibração e a validação dos resultados.

O quadro abaixo (tabela 17) explica de que forma foram utilizados os períodos com os dados disponíveis para a modelagem:

Tabela 17 Períodos utilizados e sua função na modelagem.

Período	Utilização
01/01/2001 a 31/12/2003	Aquecimento do modelo
01/01/2004 a 31/12/2012	Calibração
01/01/2013 a 31/12/2014	Validação

4.2.11. Avaliação de qualidade da simulação

Para avaliar a eficiência das simulações neste estudo, foram utilizados o índice de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação (R^2) (equações 29 e 30) (ABBASPOUR, 2015). Há diversos outros teste estatísticos que pode ser usado para mensurar a qualidade das simulações hidrológicas, como a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR), percentual de tendência (PBIAS) e o índice de Nash e Sutcliffe alterado, que considera a vazão média mensal inter-anual (COEA), etc. Estes testes não foram utilizados neste trabalho, pois não há um valor de referência que aponte um valor satisfatório para a calibração com dados diários.

Equação 29

$$ENS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})^2} \right]$$

Equação 30

$$R^2 = \left[\frac{(\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})(y_i^{sim} - y_i^{med,sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y^{med,sim})^2} \right]$$

Onde:

y_i^{obs} é a vazão observada

y_i^{sim} é a vazão simulada

$y^{med,obs}$ é a média da vazão observada

$y^{med,sim}$ é a média da vazão simulada

O índice de Nash e Sutcliffe é largamente utilizado na análise de modelos hidrológicos. O índice varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores próximos a um indicam um ajuste ótimo e, quanto menor o ENS, pior é a simulação (tabela 18). Green e Van Griensven (2008) consideraram que para uma calibração com dados diários, valores de ENS superiores a 0,4 e R^2 superiores a 0,5 são considerados satisfatórios para a simulação.

Tabela 18 Classificação dos resultados da função objetivo de Nash-Sutcliffe (ENS) para modelagem com o SWAT em nível mensal (adaptado de Moriasi et al, 2007) (Carvalho, 2014).

Classificação	ENS
Muito Bom	$0,75 < \text{ENS} \leq 1$
Bom	$0,65 < \text{ENS} \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < \text{ENS} \leq 0,60$
Instisfatório	$\text{ENS} \leq 0,50$

5. Resultados e Discussão

5.1.1. Geoprocessamento e Delineamento da bacia

A partir do delineamento automático baseado no MDE, foram definidas 23 sub-bacias (tendo como área mínima 300 hectáres), as quais podem ser visualizadas na figura 22. Após o delineamento da bacia e a definição das sub-bacias, o modelo gera um relatório com os valores de área, declividade média, elevação (média, máxima e mínima), para cada sub-bacia.

Para fins de análise comparativa, outro delineamento da bacia foi feito, com maior detalhamento da rede hídrica, onde foram geradas 33 sub-bacias, no entanto, o maior número de sub-bacias, não apresentou alterações significativas nos resultados da simulação da vazão. Apenas diminui um pouco o número de HRUs geradas.

Após o delineamento das subbacias, o modelo parte para a criação das HRUs. No total foram criadas 1095 HRUs (figura 23) na bacia hidrográfica estudada (divididos nas 23 sub-bacias), derivadas da sobreposição entre os doze tipos de uso da terra, cinco tipos de solo e de três classes de declividade.

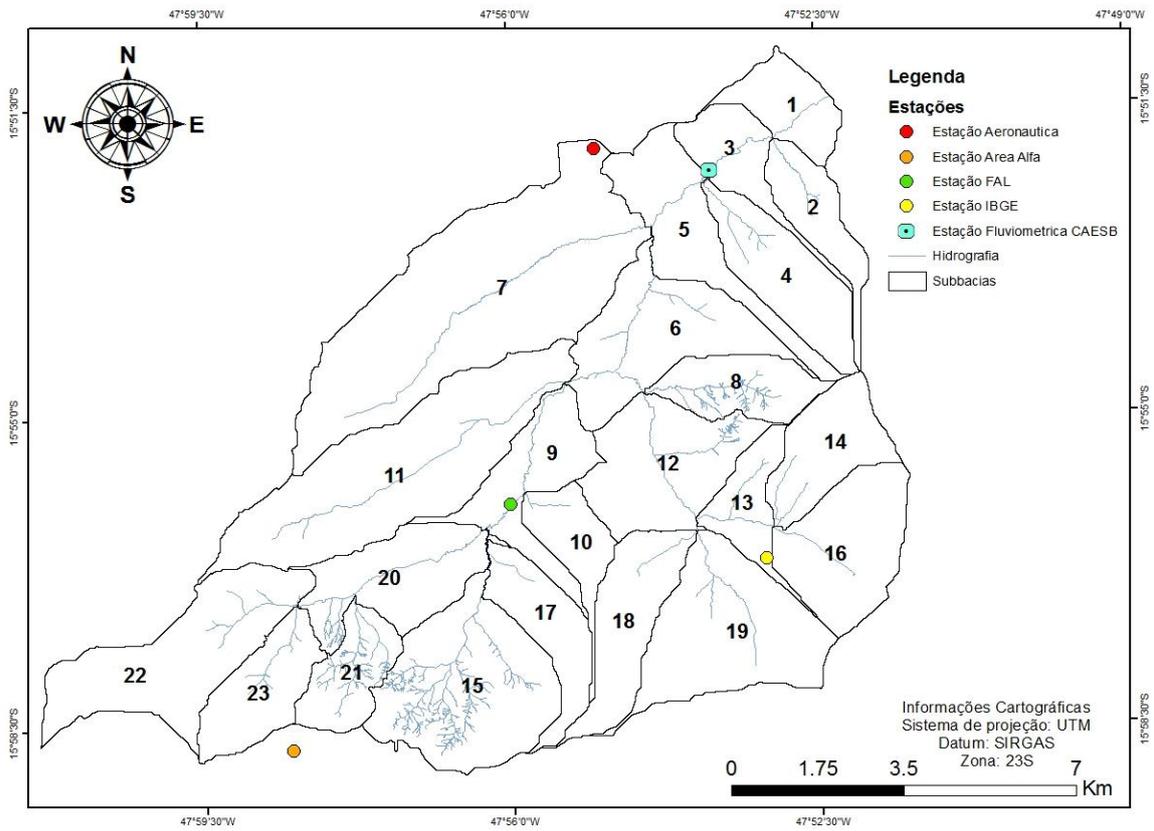


Figura 22 Mapa de sub-bacias da bacia hidrográfica do Gama gerado pelo modelo SWAT.

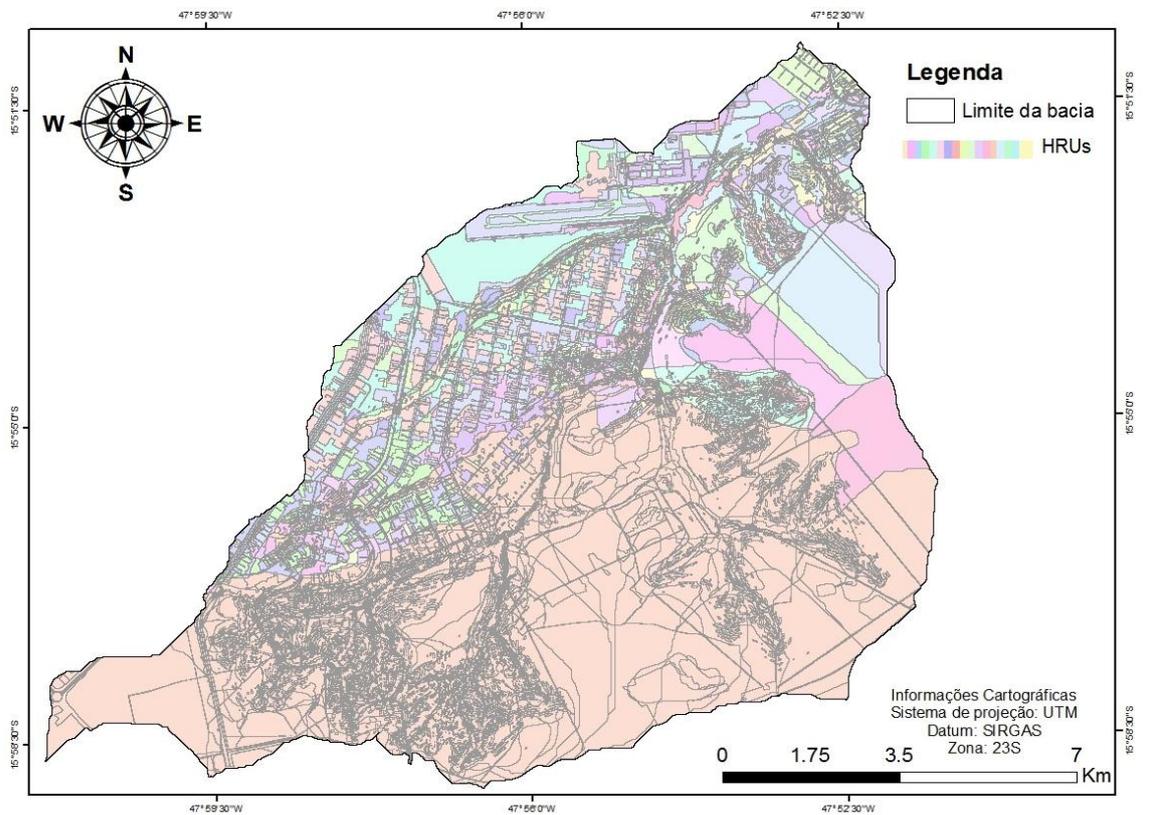


Figura 23 HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica) geradas pelo modelo SWAT.

5.1.2. Simulação antes da calibração do modelo SWAT

As figuras 24 e 25 mostram a comparação da vazão média mensal e diária, respectivamente, observada na estação fluviométrica da CAESB e a vazão média mensal e diária simulada no modelo SWAT, no período de 01/01/2004 e 31/12/2012 sem calibração.

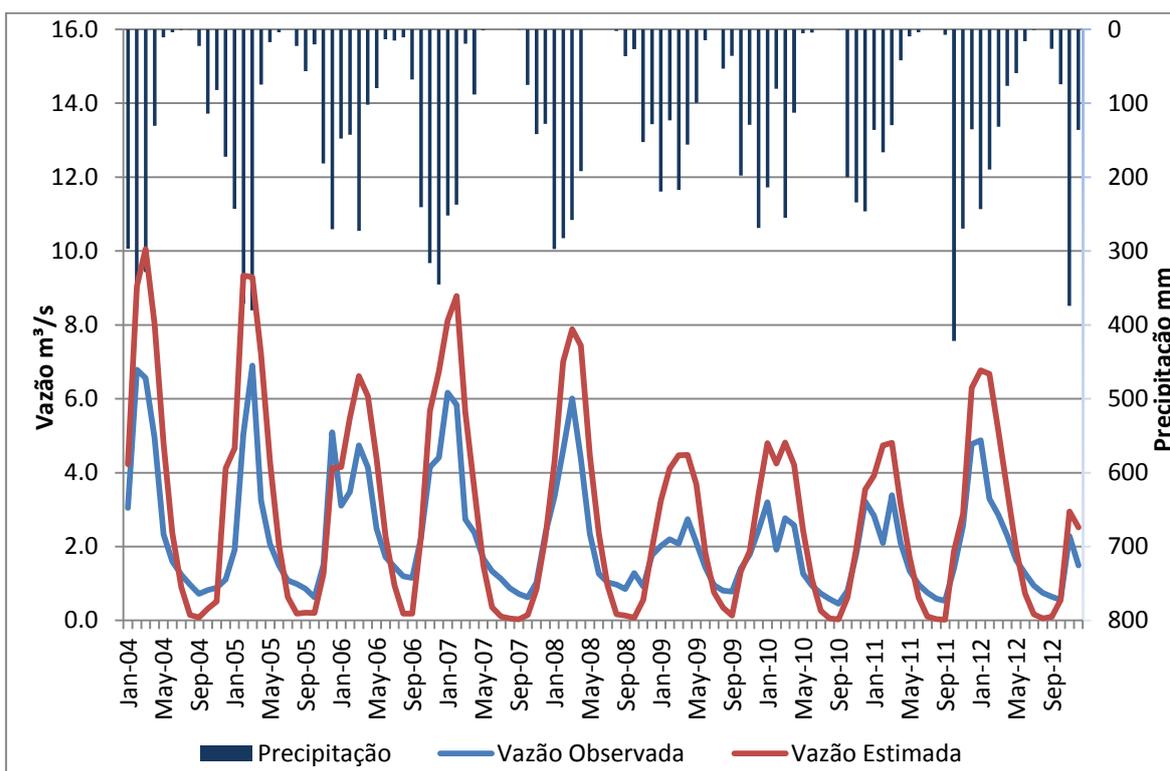


Figura 24 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT sem calibração e a vazão observada mensal.

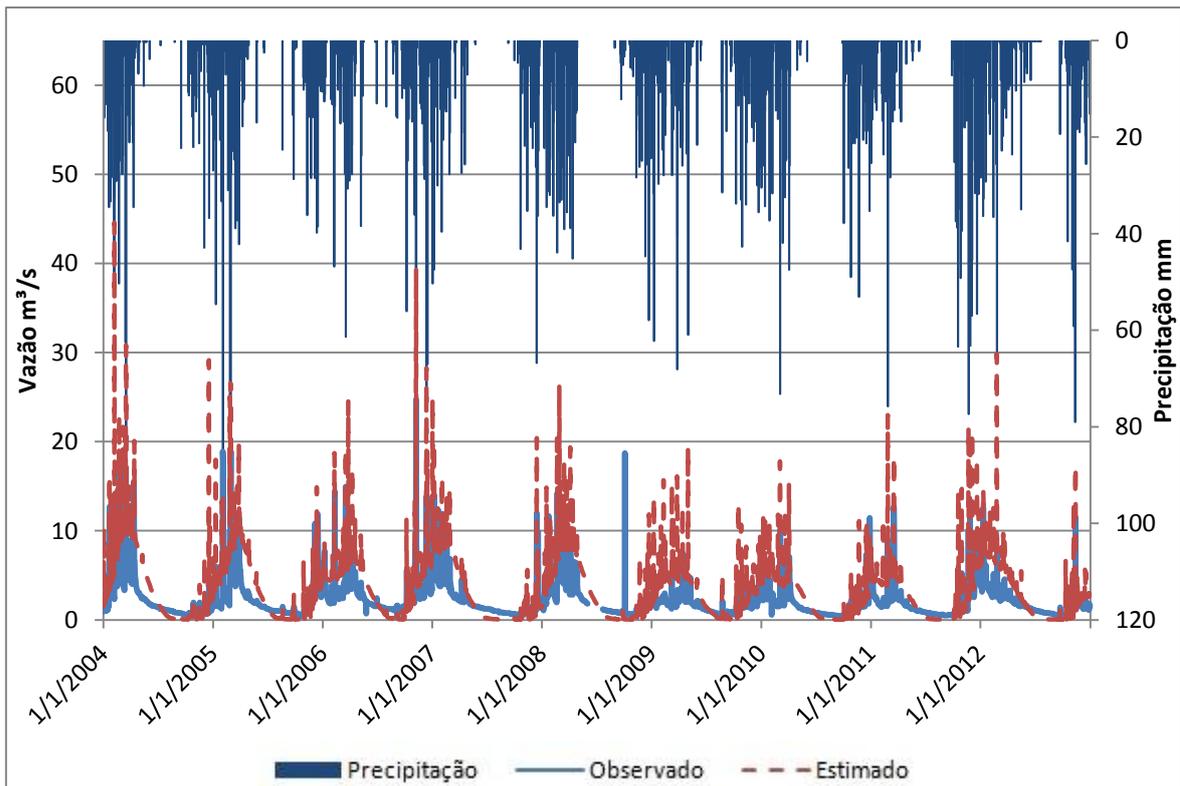


Figura 25 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT sem calibração e a vazão observada diária.

Visualmente já é possível observar que o modelo SWAT não conseguiu simular a vazão da bacia estudada de forma satisfatória. Percebe-se, pela a análise das figuras acima, que há uma tendência do modelo superestimar as vazões nos períodos de chuva e subestimar na época de estiagem. Esse comportamento foi relatado em outros estudos feitos no Cerrado com o SWAT, como os trabalhos de Salles (2012), Castro (2013), Carvalho (2014) e Ferrigo (2014).

Na figura 24, os picos de vazão média mensal foram superestimados pelo modelo em quase duas vezes, apresentando valores máximos de até $10.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, onde os picos máximos observados não ultrapassam $6.89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Já o escoamento de base apresenta em seu menor valor $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto a vazão mínima observada no mesmo período apresenta um valor de $0,45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou seja, quase vinte e cinco vezes maior. Nota-se, assim, um erro mais expressivo nas vazões mais baixas (nos períodos de estiagem), o que evidencia a dificuldade do modelo de simular o movimento da água subterrânea.

Já na figura 25, tratando-se dos dados diários, os picos de vazão também foram superestimados pelo modelo em até três vezes, apresentando valores máximos de até $44,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e os picos máximos observados não ultrapassam $24,74 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Obteve-se, para essa primeira simulação, um valor da função objetivo de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0.033 e um R^2 igual a 0,87 (figura 26) para a simulação mensal e um ENS -1.50 e com um R^2 igual 0,62 para a simulação diária (figura 27). Os resultados do ENS indicam que o SWAT não foi capaz de simular satisfatoriamente a vazão quando utilizada sem calibração. Apresenta-se, nas figuras abaixo (figuras 26 e 27), a dispersão dos dados estimados em relação aos dados observados, que demonstra que a distribuição dos dados não ocorre de maneira proporcional e que os dados simulados estão sendo superestimados na modelagem em ambos os casos.

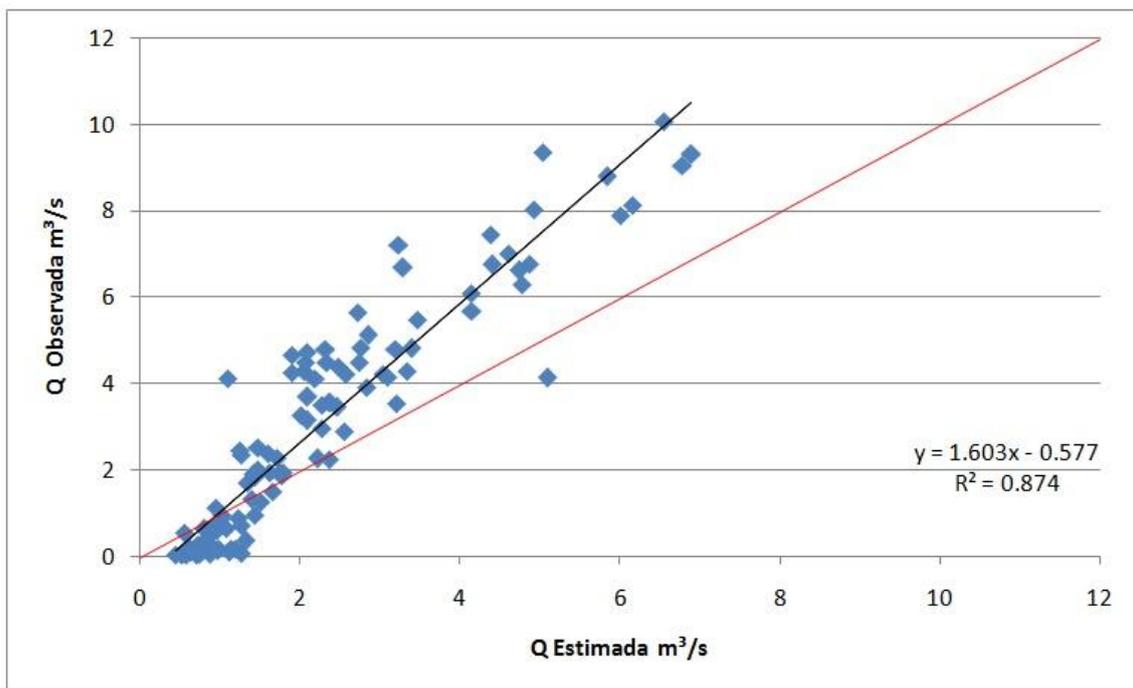


Figura 26 Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 sem calibração.

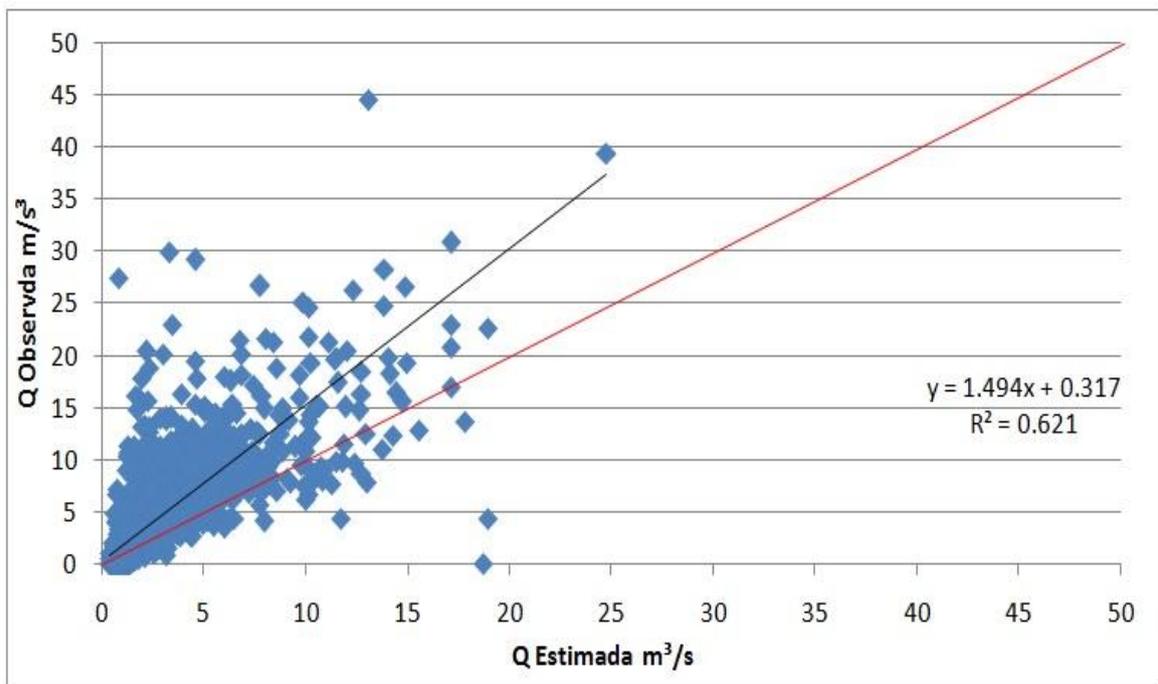


Figura 27 Diagrama de dispersão das vazões diárias observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 sem calibração.

Minoti et al. (2011) realizou um trabalho também na bacia do Gama com o intuito de estimar a vazão, cargas de sedimento e concentração de nitrogênio e fósforo nos anos de 1997 a 2008, com o objetivo de avaliar a utilização do SWAT na simulação de processos de poluição difusa. O estudo foi uma fase inicial de desenvolvimento, uma primeira aproximação, onde não foi feita a calibração do modelo, pois, há princípio, o modelo SWAT foi desenvolvido para estimativas de vazão e cargas em bacias não monitoradas. Partindo dessa premissa, o autor verificou a habilidade do modelo em prever essas variáveis sem calibração.

Minoti et al. (2011) encontrou um valor da função objetivo de Nash-Sutcliffe (ENS) de -2,30 e um R^2 igual a 0,45 para simulação diárias. Já neste trabalho foi encontrado um ENS -1.50 e com um R^2 igual 0,62 para a simulação diária, como já foi dito antes. Ou seja, houve uma melhora nessa etapa inicial sem calibração, mesmo com a série histórica utilizada neste estudo sendo menor. Essa melhora se deve, provavelmente, ao fato deste trabalho possuir dados de entrada mais recentes, com melhor qualidade espacial (escalas menores) e também de se estar utilizando mais estações meteorológicas que

estão de fato dentro da área de estudo. A análise feitas dos dados de vazão deste trabalho e a feita por Minoti et al. (2011) demonstraram que o modelo SWAT superestimou as vazões nos períodos de cheia e subestimou-as no período de seca.

Com base na análise dos valores do modelo SWAT e do trabalho de Mesquita (2015) realizado na bacia do ribeirão do Gama, constatou-se que a origem do problema do comportamento da vazão, é gerada pela superestimativa do escoamento superficial. Mesquita (2015), constatou com base em monitoramento direto de escoamento em microplots em 5 diferentes usos, que o escoamento só ultrapassou os 10% quando medido diretamente nos solos expostos. A média para condições vegetadas foi em torno de 3% de escoamento. Lima (2010), corrobora essa informação (tabela 19), constatando a partir de estudos da hidrógrafa, que o escoamento superficial não deve ultrapassar 3% do total precipitado. Na simulação sem calibração realizada no presente estudo, o volume do escoamento representou 12% (figura 29) do total precipitado.

Tabela 19 Resultado do Balanço hídrico anual efetuados em pequenas bacias não urbanizadas do Distrito Federal (DF). (Modificado de Lima, 2010)

Referência	Silva e Oliveira (1999)		Lima (2000)		Lima (2010)	
Ano hidrológico	1996/1997		1998/1999		2007/2008	
Bacia hidrográfica	Capetinga, DF		Capetinga, DF		Alto Jardim, DF	
Área da bacia (km ²)	10,00		10,00		104,86	
Variável	mm.ano ⁻¹	%	mm.ano ⁻¹	%	mm.ano ⁻¹	%
Precipitação	1.744,00	100,00	1.058,73	100,00	1.100,00	100,00
Escoamento superficial	52,50	3,01	15,08	1,42	32,33	2,94
Escoamento de base	444,00	25,46	284,39	26,86	289,89	26,35
Escoamento total	496,50	28,47	299,47	28,29	322,22	29,29
Varição da lâmina de água no solo	0,00*	0,00*	-71,77	-6,78	0,00*	0,00*
Evapotranspiração real	1.247,50	71,53	831,03	78,49	777,78	70,71

* valor não-medido.

No ciclo hidrológico representado na figura 28, pode-se observar que a evapotranspiração compõe cerca de 575,8 mm, o escoamento superficial 170,43 mm, o fluxo lateral 96,58 mm, a percolação 555,29 mm, o fluxo de base 502,92 mm, a recarga para o aquífero profundo 27,76 e ascensão capilar do aquífero raso 24,48 mm. O CN médio para a bacia ficou em torno de 51,35.

Com base nos estudos da tabela 19, pode-se dizer que o modelo superestimou o fluxo de base e o escoamento superficial pra as condições de cerrado.

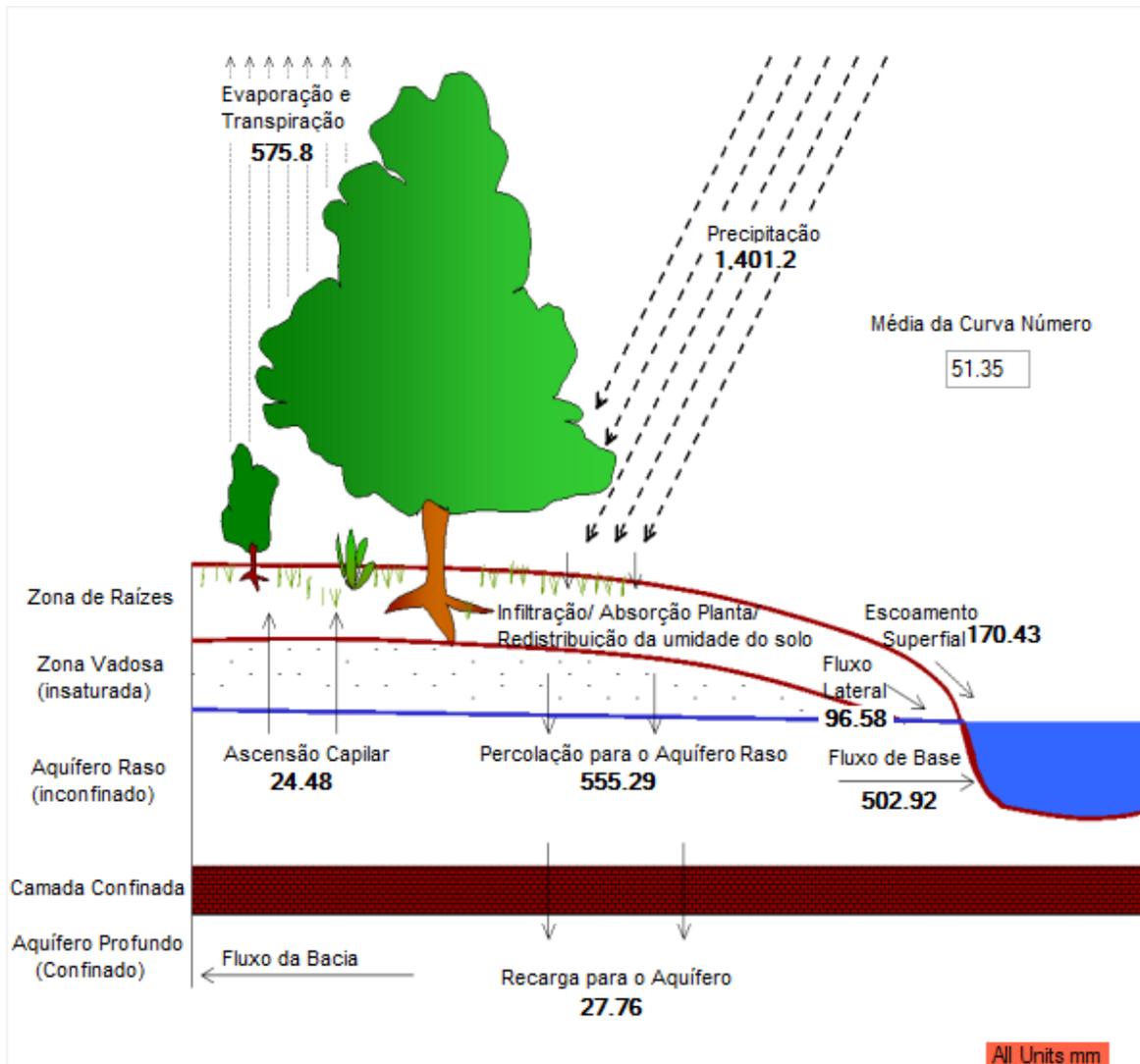


Figura 28 Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2004 a 2012 (dados não calibrados).

Dessa forma, verificou-se a necessidade de realizar a calibração do modelo, para que a simulação da vazão pudesse representar satisfatoriamente os dados observados. Antes de executar a calibração do modelo, foi feita uma análise de sensibilidade com base em outros trabalhos feitos no Cerrado com o uso do modelo SWAT, para, assim, identificar quais parâmetros eram mais significativos para a modelagem com o objetivo de simplificar e guiar o processo de calibração dos dados.

5.1.3. Seleção dos Parâmetros para a calibração do modelo

Segundo Arnold et al. (2012), o primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma bacia hidrográfica.

Para raciocinar o processo de calibração, foi feita uma pesquisa com base em outros trabalhos feitos no Cerrado com o modelo SWAT com objetivo de identificar quais parâmetros são mais comumente apontados como sendo de grande influência (tabela 20).

Tabela 20 Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT feitas em Bacias do Distrito Federal, bioma Cerrado.

Parâmetros mais sensíveis	Autor	Data
SURLAG, GWQMN, CN2, GW_REVAP, RCHRG_DP, SOL_K	Sarmento	2010
CN2, ALPHA_BF, CH_K2, ESCO, GW_DELAY, CH_N2	Strauch	2011
ESCO, ALPHA_BF, GW_DELAY, SOL_Z, CHK2, BLAI, SOL_AWC, CN2, SOL_K, GWQMN, SLOPE	Ferrigo	2011
ALPHA_BF, CN2, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, ESCO, SLSUBBSN	Ferrigo	2012
ESCO, ALPHA_BF, GW_QMN, SURLAG, GWREVAP, CN2, CH_K2, RCHRGH_DP, CH_N2, REVAPMN	Salles	2012
SURLAG, ALPHA_BF, CN2, GWQMN, SOL_K, CH_K2, SLOPE, SLSUBBSN, BLAI E SOL_ALB	Castro	2013
CN2, SOL_K, ESCO, GW_DELAY, SURLAG, SOL_AWC, SHALLST, CH_N2, ALPHA_BF, GWQMN, GWHT, RCHRGH_DP, GW_REVAP	Carvalho	2014
SOL_K, CN2, SOL_AWC, SHALLST, ANION_EXCL, REVAPMN, ESCO, ALPHA_BF, SOL_BD, DEEPST, GW_REVAP, GWHT, GWQMN, GW_DELAY	Ferrigo	2014

Existe também um estudo feito por Arnold et al., (2012a), onde o autor reúne 64 trabalhos feitos com o modelo SWAT e indica quais são os parâmetros mais utilizados nesses estudos (tabela 21).

Tabela 21 Parâmetros de calibração relatados em 64 estudos da SWAT de bacias hidrográficas selecionadas.^[4] Os números entre parênteses são o número de vezes que o parâmetro foi usado na calibração (modificado de Arnold et al. 2012).

Processo	Parâmetros de entrada									
Escoamento Superficial	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)				
Escoamento de Base	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELAY (18)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)				
Neve	SFTMP (11)	SMFMN (14)	SMFMX (18)	SMTMP (13)	TIMP (7)	SNO50COV (4)	SNOCOVMX (3)			
Sedimento dos Canais	PRF (10)	APM (7)	SPEXP (10)	SPCON (11)	CH_EROD (6)	CH_COV (7)				
Sedimento da Paisagem	USLE_P (7)	USLE_C (7)	USLE_K (7)	LAT_SED (1)	SLSOIL (2)	SLOPE (8)				
N da Paisagem	RCN (1)	UBN (3)	GWNO3 (2)	ERORGN (5)	NPERCO (11)	ANION_EXCL (2)				
P da Paisagem	PSP (5)	PHOSKD (6)	UBP (5)	PPERCO (8)	GWQMINP (1)	ERORGP (5)				
Pertidas	KOC (1)	HL_SOIL (1)	HL_FOL (1)	WSOL (1)	WOFFW (2)					
N e P dos Canais	BC1 (2)	BC2 (2)	BC3 (2)	BC4 (2)	RS4 (2)	RS5 (1)				
Crescimento de Planta	GSI (3)	HI (1)	BLAI (3)	PHU (1)	CN_YLD (1)					
Bactérias	BACTRDQ (1)	BACTMIX (1)	BCNST (1)	CFRT_KG (1)	WDPRCH (1)	WDPO (1)				
Outros	BIOMIX (4)	SOL_ROCK (1)	MSK_COL (1)	MSK_CO2 (2)	CBNINT (1)	SOL_BD (3)	ALPHA_BNR (1)	EVRCH (1)	SOL_ALB (2)	LAT_TTIME (1)

^[4] Abbaspour et al. (2007), Ahl et al. (2008), Alibuyog et al. (2009), Behera and Panda (2006), Bekele and Nicklow (2007), Benaman and Shoemaker (2004), Benaman et al. (2005), Bekele and Knapp (2010), Cheng et al. (2007), Chin et al. (2009), Chu et al. (2004), Coffey et al. (2010), Debele et al. (2008), Di Luzio and Arnold (2004), Douglas-Mankin et al. (2010), Du et al. (2006), Easton et al. (2008), Eckhardt et al. (2002), Eckhardt et al. (2005), Engel et al. (2007), Ghaffari et al. (2010), Gikas et al. (2006), Gitau et al. (2008), Green et al. (2006, 2007), Green and van Griensven (2008), Heuvelmans et al. (2004, 2006), Hu et al. (2007), Inamdar and Naumov (2006), Jha et al. (2010), Lemonds and McCray (2007), Maski et al. (2008), Meng et al. (2010), Mukundan et al. (2010), Muleta and Nicklow (2005), Narasimhan et al. (2010), Santhi et al. (2008), Shoemaker et al. (2007), Starks and Moriasi (2009), Sui and Frankenberger (2008), Sudheer et al. (2007), Tuppada et al. (2011), van Griensven et al. (2008), Van Liew et al. (2007), White and Chubey (2005), Zhang et al. (2008a), Zhang et al. (2008b).

Após fazer essa revisão da literatura, foram extraídos de alguns trabalhos os parâmetros mais sensíveis, para assim, facilitar a próxima etapa do trabalho, a de calibração. Dessa forma, para esse estudo, foram selecionados 14 parâmetros : ALPHA_BF, CH_K2, CH_N2, CN2, DEEPST, ESCO, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, SOL_AWC, SOL_BD, SHALLST e SURLAG. A tabela 20 traz informações específicas sobre a calibração de cada um deles.

5.1.4. Análise de Sensibilidade

Ao contrário do que era feito em versões antigas do SWAT, o SWATCUP executa as etapas de calibração e análise de sensibilidade de forma conjunta e possui várias opções de algoritmos de otimização. A calibração no âmbito deste trabalho foi feita de forma automática, com utilização do *software* SWATCUP 5.1.6.2

No presente estudo foi utilizado o algoritmo SUFI2. Nesse algoritmo, a calibração ocorre através de um sistemática seleção de intervalos de valores de parâmetros que, a cada iteração, são testados a fim de estreitar este intervalo, até que seja encontrado o melhor intervalo de dados de confiança (KUWAJIMA, 2012).

O SWATCUP fornece uma lista completa com 651 parâmetros, em que o usuário pode escolher quais deles quer alterar. Importante dizer que o SWATCUP possui em "*Absolute Swat Values*" com todos os 651 parâmetros listados com suas respectivas definições e os seus intervalos máximo e mínimo (que podem ser alterados pelo usuário de acordo com as características da área de estudo). Neste trabalho foram selecionados 14 parâmetros, onde a delimitação dos intervalos foi determinada de acordo com estudos de campo e valores disponíveis e retratados na literatura (tabela 22).

Os limites dos intervalos são de suma importância, pois evitam que haja distorções modelo e que o resultado final da modelagem seja fictício e incompatíveis com a realidade da área de estudo.

Tabela 22 Detalhamento da alteração dos valores dos parâmetros no processo de calibração da bacia do Gama.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Método	Intervalo	
				Mín	Máx
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	Substituição	0,1	0,8
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal	mm/hr	Substituição	0	2,5
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning	$s m^{-1/3}$	Substituição	0,025	0,050
CN2	Curva Número na condição II	adimensional	Multiplicação	-0,3	0,2
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo	mm	Substituição	0.0	5000
ESCO	Fator de compensação da evaporação do	adimensional	Substituição	0,4	1,0

	solo				
GW_DELAY	intervalo de tempo para a recarga do aquífero	dias	Substituição	30	120
GWQMN	Profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado pelo canal	mm	Substituição	0,0	1500
GW_REVAP	Coefficiente "revap" de água subterrânea	adimensional	Substituição	0,02	0,1
REVAPMN	Profundidade em aquífero raso para que aconteça o "revap"	mm	Substituição	0,0	500
SOL_AWC	Capacidade de água disponível na camada de solo	mm/mm	Multiplicação	-0,1	0,5
SOL_BD	Densidade aparente do solo	g/cm ³	Multiplicação	-0,6	-0,4
SHALLST	Altura inicial da água do aquífero raso	mm	Substituição	500	5000
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial	dias	Substituição	0,5	5,0

É possível utilizar três possibilidades para determinar os valores superiores e inferiores de um parâmetro a partir do seu valor inicial: por Substituição direta (onde o programa faz alterações do valor diretamente), por Adição (em que um valor constante, definido pelo usuário, é adicionado ao valor inicial do parâmetro) e por Multiplicação, onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial, em termos percentuais, para mais ou para menos.

O resultado da análise de sensibilidade global está representado na figura 29. O *t-stat* demonstra o grau da sensibilidade dos parâmetros, onde, quanto maior for o seu valor absoluto, mais sensível é o parâmetro. Já o *P-Value*, indica a significância da sensibilidade dos parâmetros, em que valores próximos de zero apresentam maior significância na modelagem (Abbaspour, 2015). É possível notar que os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram (por ordem de sensibilidade): ESCO, GW_DELAY, SOL_AWC, CN2, SHALLST, GWQMN, DEEPST, GW_REVAP, CH_K2, REVAPMN, SURLAG, SOL_BD, ALPHA_BF e CH_N2.

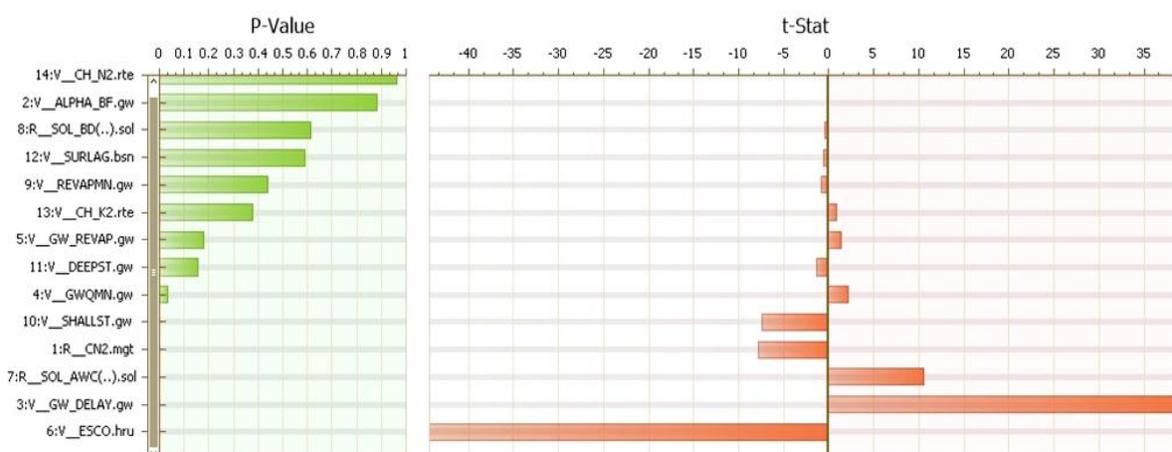


Figura 29 Resultados da análise de sensibilidade para a variável vazão.

Pela análise dos gráficos, percebe-se que os parâmetros ESCO e GW_DELAY tiveram comportamento amplamente dominante no processo. Na Tabela 23, são apresentados os valores de *t-Stat* e *P-Value* obtidos durante a análise de sensibilidade global na bacia do Gama.

Tabela 23 Valores de *t-Stat* e *P-Value* obtidos na análise de sensibilidade global.

Parâmetro	t- Start	P- Value
CH_N2	-0.0468924	0.96261084
ALPHA_BF	-0.1477010	0.88261662
SOL_BD	-0.5038223	0.61452756
SURLAG	-0.5371825	0.59129372
REVAPMN	-0.7772892	0.43722228
CH_K2	0.88304055	0.37748469
GW_REVAP	1.34675116	0.17844906
DEEPST	-1.4190440	0.15628309
GWQMN	2.13286003	0.03324583
SHALLST	-7.4733665	0.00000000

CN2	-7.8570982	0.00000000
SOL_AWC	10.5293496	0,00000000
GW_DELAY	39.3188141	0,00000000
ESCO	-44.353411	0,00000000

O SWAT-CUP fornece gráficos de dispersão para cada parâmetro, onde a figura 30 representa a distribuição do valor do parâmetro atribuído (eixo x) e respectiva resposta na função objetivo Nash-Sutcliffe (eixo y), obtidas pela análise de sensibilidade individual. Para efeito de comparação, foram selecionados os gráficos dos parâmetros mais influente (ESCO) e do parâmetro menos influente (CH_N2).

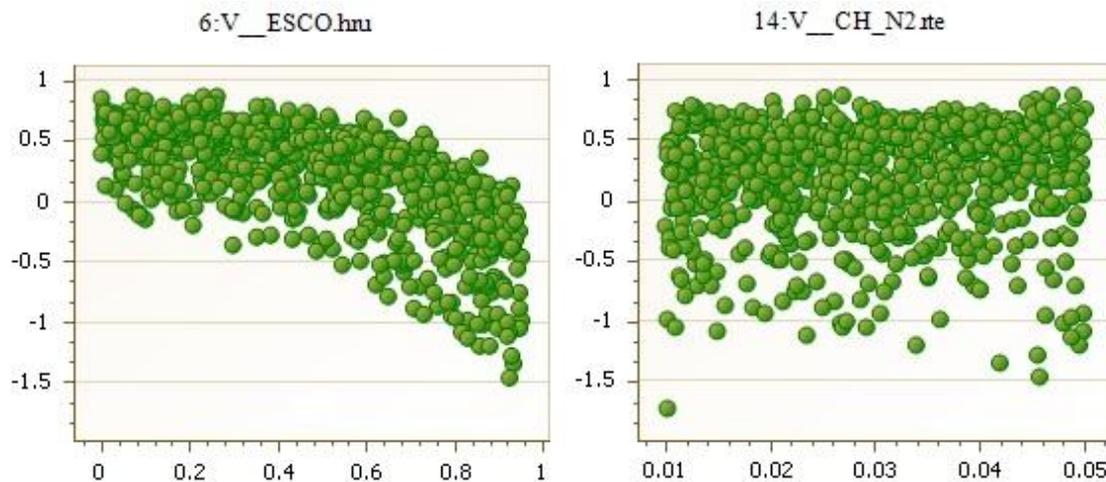


Figura 30 Gráficos de dispersão, valor do parâmetro versus função objetivo (Nash- Sutcliffe).

Pode-se notar, nos gráficos acima, a sensibilidade do modelo aos parâmetros, quando se observa o comportamento da relação do valor atribuído ao parâmetro com o efeito na resposta da função objetivo. O gráfico do ESCO segue uma clara tendência: os pontos mais à esquerda resultam em melhores valores da função objetivo, pois quando se aumenta os valores desse parâmetros, os valores da função objetivo diminuem. Já no gráfico do CH_N2, nenhuma tendência é encontrada. Analisando o gráfico, fica claro que a qualidade da simulação está sendo conduzida por outros parâmetros, pois é possível notar que os melhores valores da função objetivo são encontrados em praticamente toda a faixa de variação deste parâmetro.

5.1.5. Calibração do modelo SWAT

A calibração automática dos 14 parâmetros escolhidos, foi realizada para os anos hidrológicos correspondentes ao período de janeiro de 2004 a dezembro de 2012, onde foram feitas 1000 interações dentro dos intervalos adotados na análise de sensibilidade. A calibração foi feita tanto diariamente, onde foram disponibilizados 3248 dados diários, quanto mensalmente, 108 médias mensais. Os valores dos parâmetros que apresentaram o melhor ajuste estão representados na tabela 24.

Tabela 24 Parâmetros, métodos e valores da melhor da calibração encontrada.

Parâmetro	Método	Valor da Melhor Calibração
ESCO	Substituição	0.427182
GW_DELAY	Substituição	107.595833
SOL_AWC	Multiplicação	0.487380
CN2	Multiplicação	-0.283450
SHALLST	Substituição	522.218018
GWQMN	Substituição	1004.201355
DEEPST	Substituição	2111.177979
GW_REVAP	Substituição	0.087727
CH_K2	Substituição	2.016220
REVAPMN	Substituição	230.748001
SURLAG	Substituição	2.482100
SOL_BD	Multiplicação	-0.523559
ALPHA_BF	Substituição	0.336332
CH_N2	Substituição	0.030786

Nas Figura 31 e 32, são apresentados os hidrogramas observado e simulado pelo SWAT após a calibração automática dos parâmetros, tanto diariamente quanto mensalmente. A calibração mensal apresentou um NS de 0,86 e um R^2 de 0,90 e a calibração diária apresentou um NS de 0,53 e um R^2 de 0,63.

Com relação a calibração mensal (figura 31), percebe-se uma grande melhora nos picos, pois houve uma redução considerável da vazão nos períodos chuvosos quando comparados a primeira simulação (sem calibração). Também pode-se observar que houve uma melhora significativa do ajuste do fluxo de base, principalmente, no período de seca onde os dados simulados chegavam bem próximos de zero. Já no hidrograma da figura 32 (dados

diários), é possível notar que o modelo não foi capaz de representar diversos picos de vazão observados durante o período chuvoso, e algumas vezes simulou picos maiores que os registrados, porém também houve uma melhora do ajuste do fluxo de base no período de seca e no período da chuva o modelo não superestimou tanto a vazão, quando comparado com o não calibrado.

Após a calibração do modelo, os valores mensais mais altos apresentados pela vazão observada chegam a $6,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e para vazão estimada pelo modelo atingem $6,91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que o valor para o mesmo período sem a calibração era de $10,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No período de estiagem, o modelo conseguiu representar de forma bem mais satisfatória as vazões. Os valores mais baixos apresentados pela vazão observada chegam a $0,45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e para vazão estimada pelo modelo chegam a $0,59 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que o valor para o mesmo período sem a calibração era de $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Com relação aos dados diários (figura 33), os valores mais altos apresentados pela vazão observada chegam a $24,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a vazão estimada pelo modelo atigem $38,79 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto para o mesmo período sem calibração os valores chegavam a $44,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Assim como na calibração mensal, o modelo conseguiu representar de forma mais satisfatória as vazões no período de estiagem, pois houve uma melhora no ajuste do fluxo de base. Os valores mais baixos apresentados pela vazão observada chegam a $0,35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e para vazão estimada pelo modelo chegam a $0,06 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que o valor para o mesmo período sem a calibração era de $0,016 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

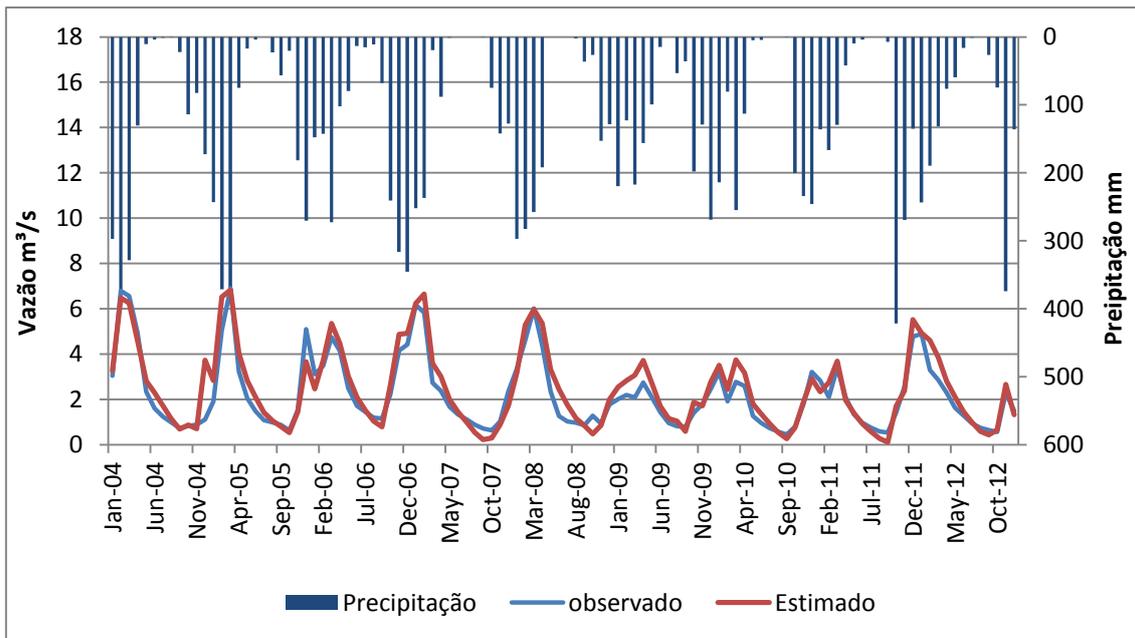


Figura 31 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada mensal após a calibração.

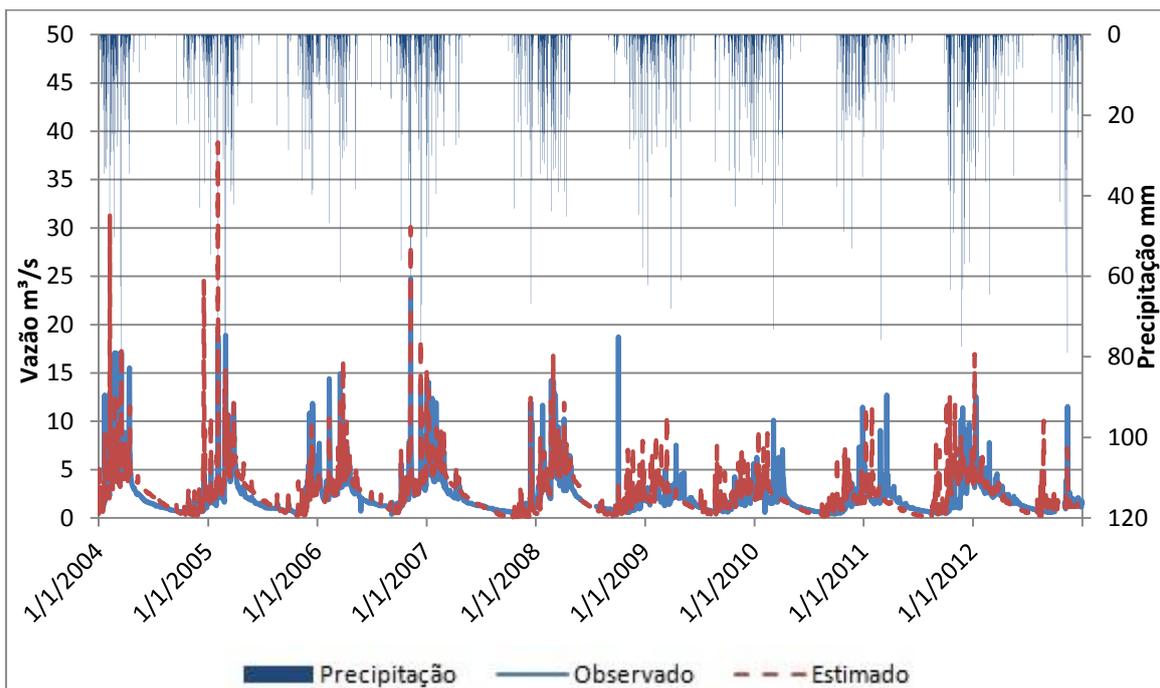


Figura 32 Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada diária após a calibração.

Essa melhora na representação do modelo na simulação da vazão mensal e diária também pode ser notada na dispersão de seus valores apresentados no gráfico de dispersão na figura 33 e 34, quando comparado

com o gráfico da figuras 26 e 27, onde o modelo superestimava muito mais os valores de vazão.

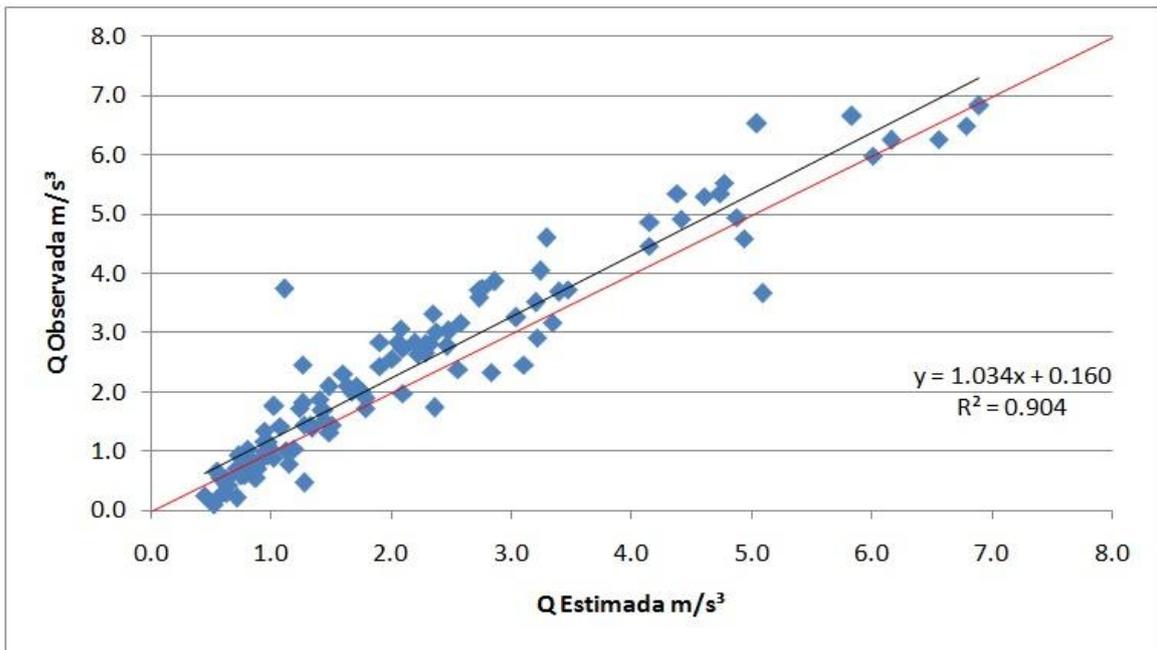


Figura 33 Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 após a calibração.

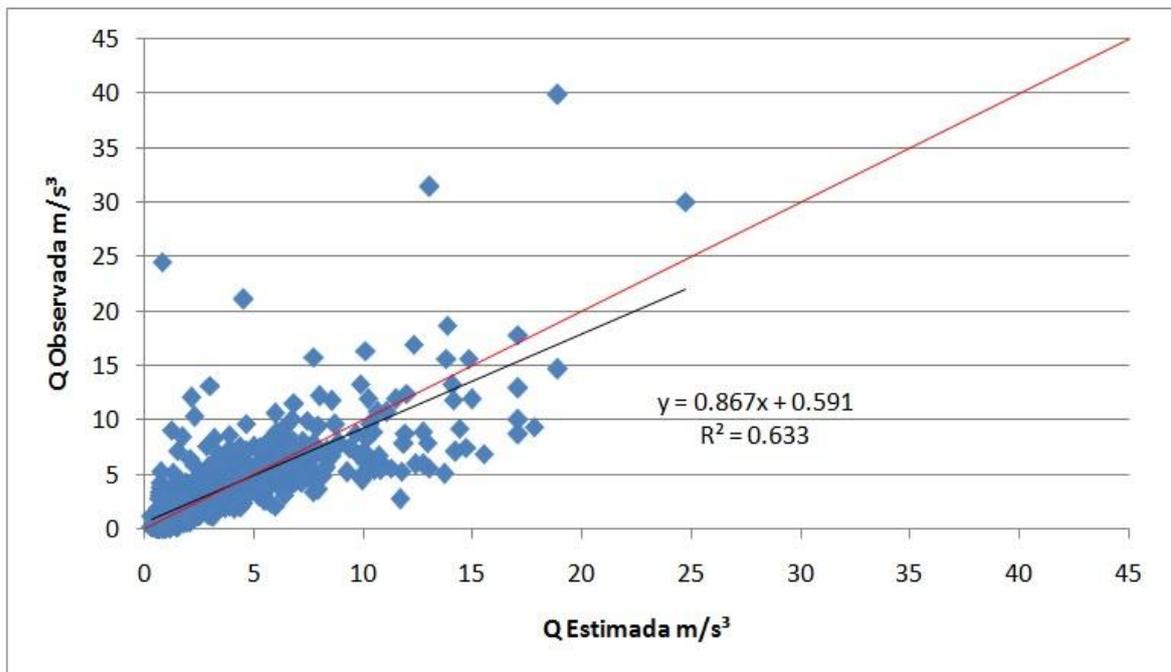


Figura 34 Diagrama de dispersão das vazões diárias observadas e simuladas na bacia do Gama no período de 2004 a 2012 após a calibração.

5.1.6. Validação do modelo SWAT

Após a etapa de calibração, é preciso testar o desempenho do modelo frente a uma série de dados que não tenham sido utilizados na calibração. Trata-se da validação do modelo, que tem o objetivo de avaliar a capacidade do SWAT em simular adequadamente as vazões da bacia estudada.

A validação do modelo SWAT calibrado para a bacia do ribeirão do Gama foi feita mensalmente e diariamente e durante os anos hidrológicos de 2013 a 2014. A validação alcançou os seguintes índices de desempenho: ENS=0.85 e R2=0.96 para modelagem mensal; ENS=0.57 e R2=0.74 para a diária. Os índices, mais uma vez, indicam que o SWAT foi capaz de simular adequadamente as vazões da bacia. Como se esperava, permaneceram problemas específicos na simulação de picos no períodos chuvosos, mas comportamento geral da modelagem pode ser considerada satisfatória. As figuras abaixo contêm os gráficos do período de validação (figura 35 e 36):

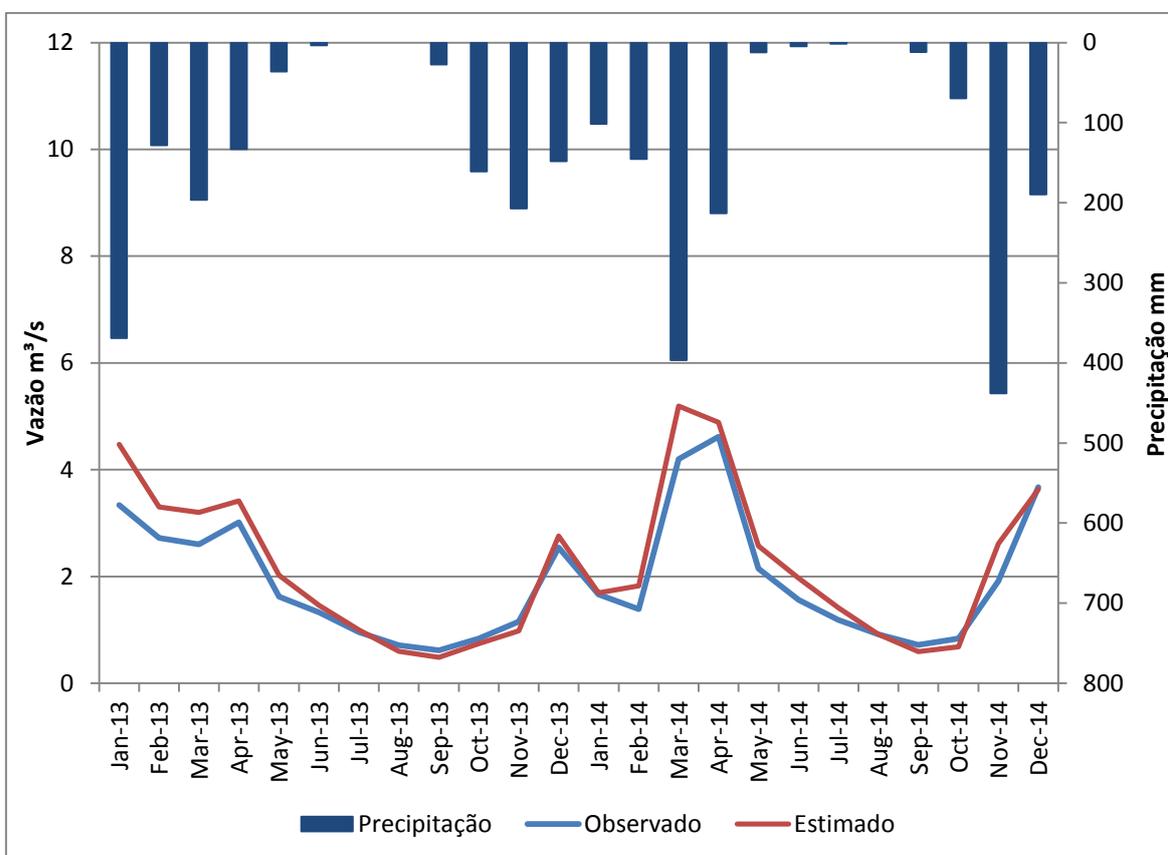


Figura 35 Gráficos da validação mensal da vazão.

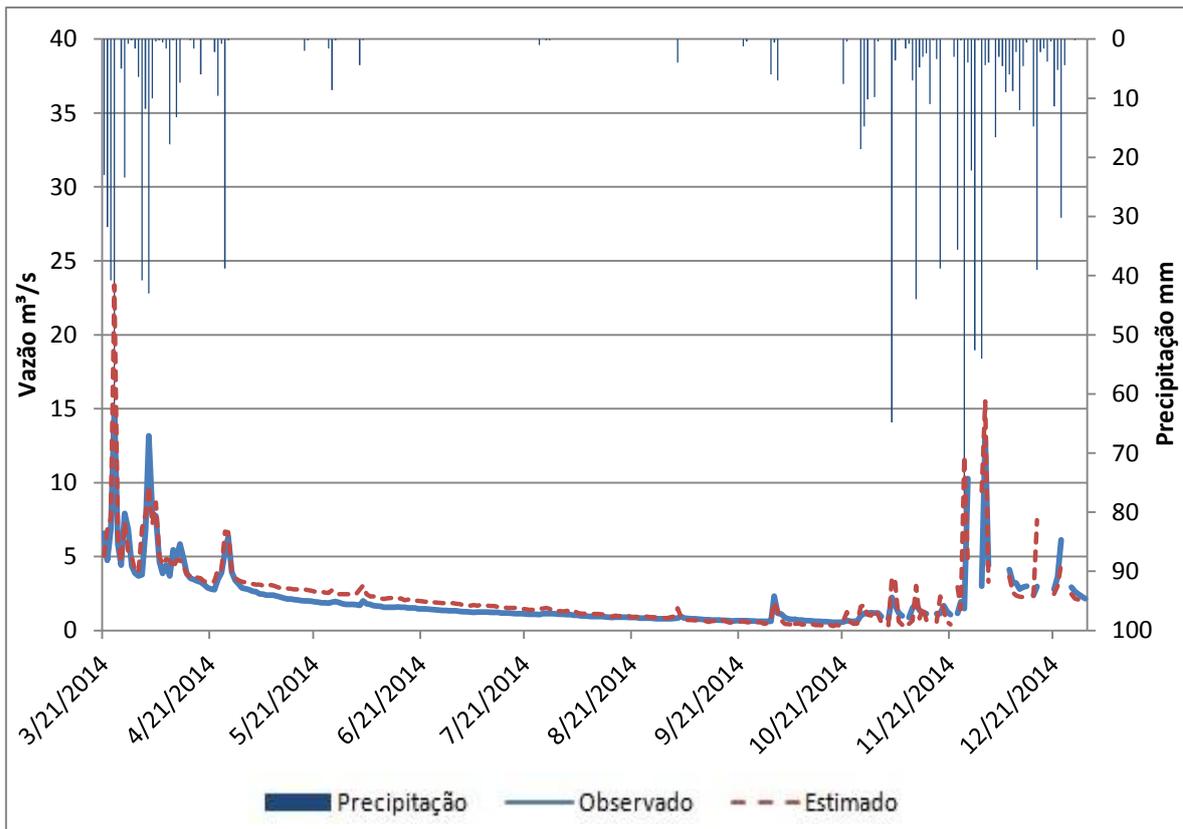


Figura 36 Gráficos da validação diária da vazão.

Nas figuras 37 e 38, é apresentado o gráfico de dispersão do período de validação mensal e diária, respectivamente, dos dados. A dispersão entre os dados observados e simulados para a validação apresentou uma melhora significativa, principalmente para os valores diários, com relação ao período de calibração. Embora ainda tenha mantido a tendência de superestimativa as vazões em ambos os gráficos, é possível notar uma melhora no ajuste da distribuição dos pontos em relação a reta de tendência.

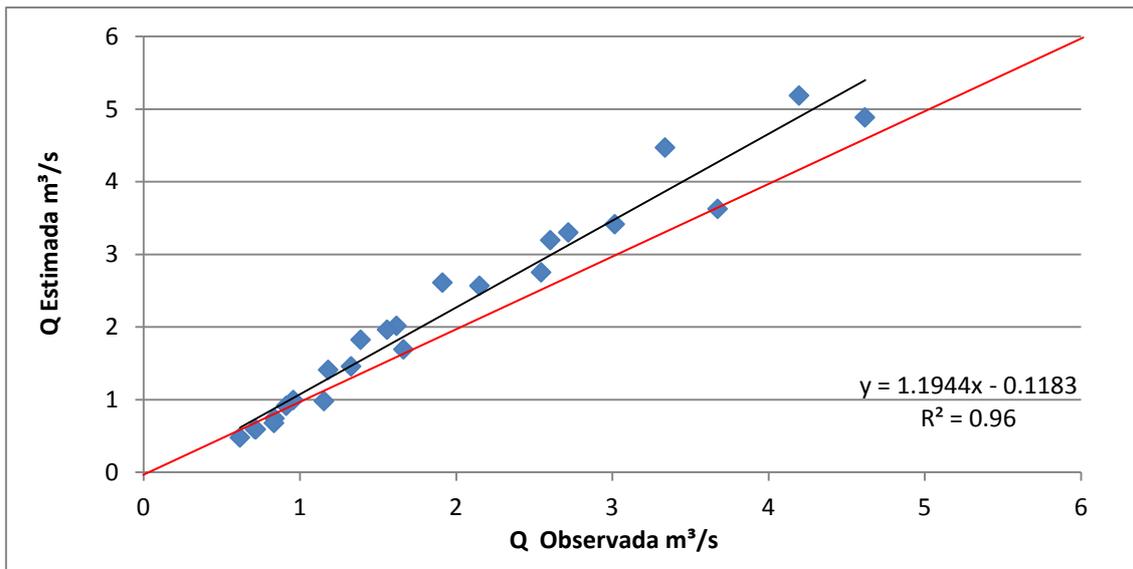


Figura 37 Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de validação mensal.

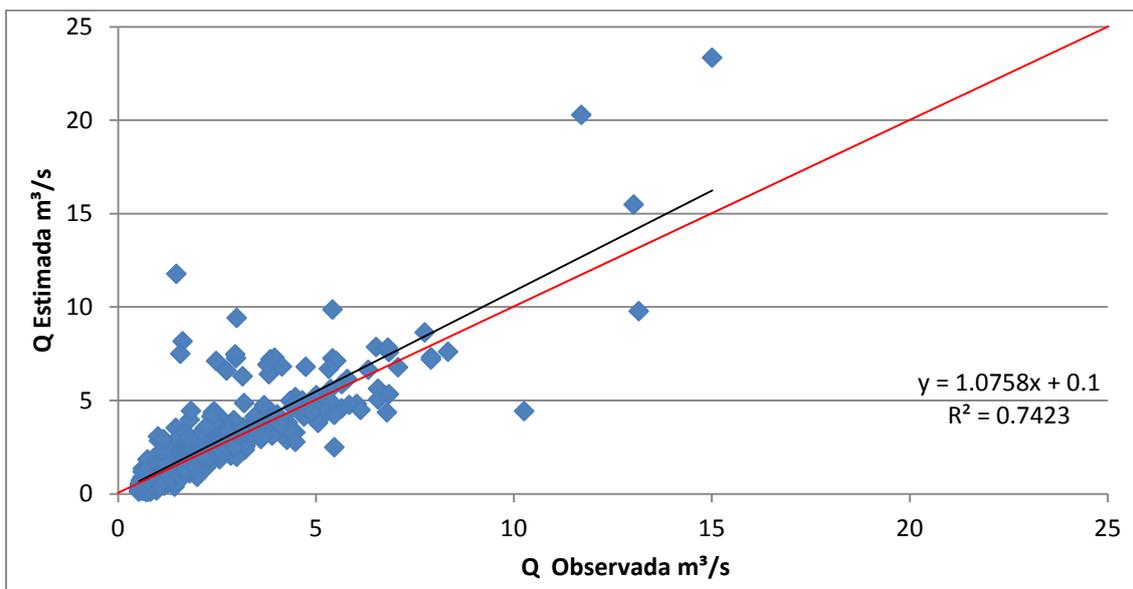


Figura 38 Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de validação diária.

Por fim, é fornecida tabela comparativa (tabela 25) dos índices de Nash-Sutcliffe obtidos em recentes trabalhos de simulações de vazão realizados no Distrito Federal:

Tabela 25 Valores de ENS obtidos em simulações com o SWAT em bacias do Distrito Federal, na simulação de vazão.

Autor	Ano	Bacia	Calibração	Validação	Dados
Sarmiento	2010	Descoberto	0,62	0,34	Diário
Strauch et al	2011	Pipiripau	0,78	0,65	Diário
Ferrigo et al	2012	Descoberto	0,69	0,73	Mensal
Salles	2012	Piriripau	0,67	0,79	Mensal
Castro	2013	Jardim	0,60	-0,84	Diário
Carvalho	2014	Jardim	0,52	0,49	Diário
Carvalho	2014	Jardim	0,71	0,54	Mensal
Ferrigo	2014	Descoberto	0,40	0,48	Diário
Este Trabalho	2015	Gama	0,86	0,85	Mensal
Este Trabalho	2015	Gama	0,53	0,57	Diário

5.1.7. Simulação do balanço hídrico da bacia do Gama

De acordo com Neitsh et al., (2005), a fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo modelo SWAT tem como base na equação do balanço hídrico, que é responsável por todo o restante que ocorre na bacia hidrográfica. O resultado do balanço hídrico para o período de calibração apresentou os seguintes resultados, 753,7 mm do total da chuva foi convertido em evapotranspiração (53,54%), 84,1 mm em escoamento superficial (5,9%), 137,06 mm em fluxo lateral (9,73%), 431,56 mm em água disponível para percolação (30,65%), 301,18 mm em fluxo de base (21,39%), 94,4 mm em ascensão capilar do aquífero raso (6,7%), e 21,58 para a recarga do aquífero (1,53%) (Figura 39).

O valores representados no ciclo hidrológico sem a calibração foram: a evapotranspiração com 575,8 mm (41,09%), o escoamento superficial 170,43 mm (12,2%), o fluxo lateral 96,58 mm (6,89%), a percolação 555,29 mm (39,6%), o fluxo de base 502,92 mm (35,9%), ascensão capilar do aquífero raso 24,48 mm (1,74%) e a recarga para o aquífero profundo 27,76 (1,98%). A representação do balanço hídrico sem calibração podem ser vistos na figura 28 a título de comparação.

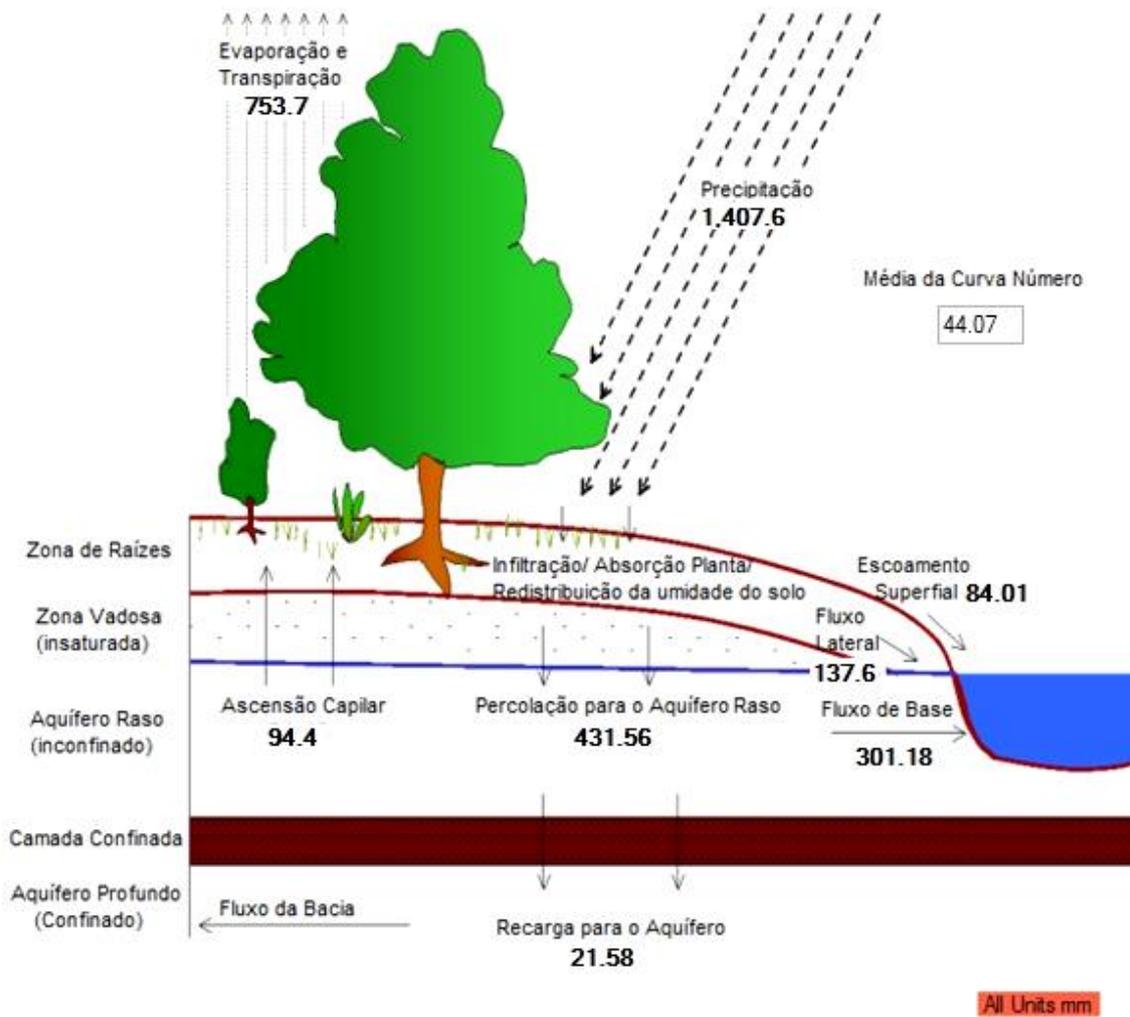


Figura 39 Balanço hídrico simulado pelo SWAT para a bacia do Gama, Distrito Federal. Unidades em mm.

Em trabalhos feitos com a utilização do SWAT no Distrito Federal, Castro (2013) encontrou que valores em torno de 56% do total precipitado é evapotranspirado na bacia do alto Jardim. Salles, estudando a bacia do rio Pípiripau (DF), encontrou 49% do total evapotranspirado, enquanto Ferrigo (2014) também chegou ao mesmo valor de 49%. Neste trabalho, por sua vez, foi calculado que para a bacia do Gama, 53% do total precipitado é convertido em evapotranspiração.

O escoamento superficial, mesmo após a calibração, ficou um pouco elevado, cerca de 5,9% do total precipitado. Apesar de ter sido ajustado parâmetro CN2 (curva número para a condição antecedente II), de forma a diminuir o escoamento superficial e, conseqüentemente, aumentar a infiltração, e de também ter ajustado o parâmetros SURLAG (coeficiente de retardo do

escoamento superficial), o modelo, ainda sim, apresentou um elevado valor de escoamento, pois, como demonstram trabalhos feitos por Silva e Oliveira (1999), Lima (2000), Lima (2010), Brady e Weil (2010) e Mesquita (2014), esse valor não deveria ultrapassar 3%. Porém houve uma significativa melhora em relação ao escoamento superficial do ciclo hidrológico sem calibração, que era cerca de 12,2% do total precipitado.

Também foram ajustados os parâmetros que controlam os valores relativos a recarga do sistema: GWQMN, (limite entre a profundidade de água entre o aquífero raso e a superfície), GW_DELAY (tempo de retardo da água subterrânea), ALPHA_BF (constante de recessão do escoamento de base), SOL_AWC (capacidade de água disponível na camada de solo). Foi alterado o parâmetro GWQMN para ajustar a profundidade da água entre o aquífero raso e a superfície, o segundo foi modificado devido a lenta resposta da água subterrânea para a descarga no rio na bacia estudada, o terceiro foi alterado para aumentar o volume de água no fluxo de base, buscando-se, dessa forma, elevar a vazão mínima nos períodos de estiagem, (visto que era um dos principais problemas encontrado na simulação do modelo sem a calibração) e, por fim, foi ajustado o parâmetro SOL_AWC, pois observou-se que o aumento do seu valor diminui o fluxo de base e aumentou a infiltração, ou seja, o aumento de seu valor, favoreceu o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo, em detrimento do escoamento superficial. O valor do fluxo de base encontrado neste trabalho foi de 301,18 mm, ou seja, 21,3% do total precipitado, ficou um pouco abaixo do esperado, pois de acordo com trabalhos feitos por Silva e Oliveira (1999), Lima (2000) e Lima (2010), o fluxo de base é de cerca de 25%.

O parâmetro CH_N2 (coeficiente de rugosidade de *Manning*) e CH_K2 (condutividade hidráulica efetiva), também foram modificados e ambos são relacionados a vazão dos canais. O primeiro foi alterado, pois segundo Chow (1959), o coeficiente *n* de *Manning*, em canais naturais com algumas pedras e vegetação variam de 0,25 a 0,150 e quando não se calibra esse parâmetro, o valor *default* do moledo é igual a 0,014 (valor indicado para canais de concreto). Este parâmetro está intimamente ligado às características da margem e do leito do rio que influenciam diretamente nos valores de coeficiente de rugosidade, que, por sua vez, tem influência direta na descrição da

vazão sobre uma superfície. O parâmetro CH_K2 também foi ajustado. Os rios podem ser classificados em efluentes ou influentes, em função da sua relação com o escoamento de base. Os rios efluentes recebem contribuição de água do subsolo e aumentam a sua vazão (é o caso da bacia do ribeirão do Gama), já os rios influentes perdem água para o subsolo e também por evaporação. Eles diminuem a vazão em relação a jusante e podem secar antes de atingir sua foz. Existem também os que concomitantemente recebem e perdem água subterrânea, sendo denominados "*flow-through stream*" (NEITSCH et al., 2012). Para bacias com baixo valor de perda de água para o subsolo, os valores de CH_K2 variam de 0,025 a 2,5 mm/hr de acordo com Lane (1983) apud Neitsh et al., (2012).

O valor da ascensão capilar simulado foi alto em comparação a outros trabalhos do DF, como o de Castro (2013) que encontrou um valor de 10,9 mm, Ferrigo (2014) com um valor de 27,93 mm. Já Salles (2012) encontrou um valor de 165,30 de ascensão capilar. Neste estudo foi encontrado o valor de 94,4 mm de ascensão capilar, ou seja, 6,7% do total precipitado. Segundo Brady e Weil (2012), no ciclo hidrológicos de uma bacia hidrográfica, cerca de 10% da água precipitada se converte em ascensão capilar.

Os parâmetros mais ligados a ascensão capilar são: ESCO (fator de compensação da evaporação do solo), GW_REVAP (coeficiente "revap" da água subterrânea) e REVAMN (profundidade do aquífero raso para que aconteça o "revap"). O primeiro parâmetro é usado para determinar a demanda evaporativa do solo. Na medida em que seu valor é diminuído, o modelo é capaz de extrair mais água de níveis mais baixos, e se nenhum valor for dado, será usado o valor igual a 0,95 pelo modelo. O segundo parâmetro está ligado ao movimento de água do aquífero raso para zona insaturada, que é apenas permitida se o volume de água no aquífero raso for maior ou igual ao REVAPMN. E, por fim, o último parâmetro (que é o mais sensível em relação ao fluxo de retorno na bacia estudada). A água pode se mover de um aquífero raso para uma zona insaturada logo acima (ascensão capilar). Nos períodos de estiagem, a franja capilar (separa a zona saturada da zona insaturada), irá evaporar no sentido de baixo para cima, este movimento é importante para as plantas principalmente nos períodos secos. Quanto menor o o valor de GW_REVAP, mais é restringido movimento de água de um aquífero raso para

a zona que contém raízes. O ajuste desses parametros citados acima, gera um impacto direto no fluxo de base.

5.1.8. Sedimento Observado X Sedimento estimado apenas com a calibração da vazão no modelo SWAT

O modelo SWAT gera, dentre outros dados, a descarga sedimentar do canal junto a simulação da vazão, que foi o principal objetivo deste trabalho. Para dar sequência ao objetivos deste estudo, a figura abaixo mostra a comparação entre a carga sedimentar estimada pelo modelo (Sedimento EST), a observada em dados de Souza (2015), coletadas por Igual Incremento de Largura (IIL) e por uma média das coletas de eventos no amostrador automático (AA). Também estão presentes do gráficos a precipitação, a vazão observada (Vazão OBS) e a vazão estimada (Vazão EST) já calibrada (figura 41). Todos esses dados são referentes ao ano de 2014.

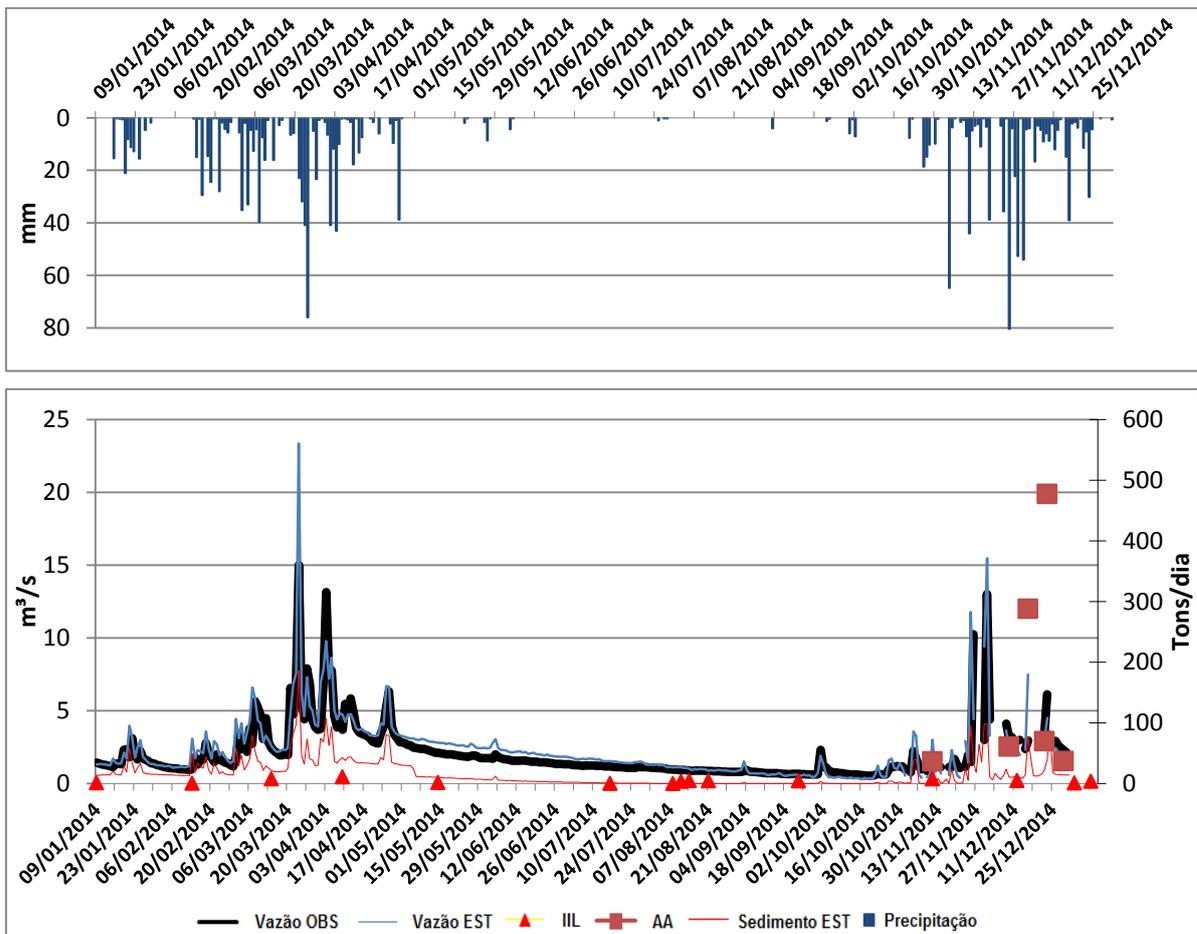


Figura 40 Gráfico comparativo da carga sedimentar estimada (Sedimento EST) pelo modelo SWAT (apenas com a calibração da vazão) e a carga sedimentar observada pelo amostrador automático (AA) e a de igual incremento e Largura (IIL) em Tons/dia do ano de 2014.

No total há 12 dados registrados pelo método Igual Incremento de Largura (SOUZA, 2015) e 6 dados do amostrador automático (onde foram registrados os eventos). Por não ter uma grande quantidade de dados referente a carga sedimentar, optou-se em apenas fazer uma comparação entre o sedimento estimado pelo modelo apenas com a calibração de vazão e os observados.

Nota-se, visualmente, que a carga sedimentar estimada segue o comportamento dos dados observados de forma satisfatória. Fica claro que no período de estiagem há pouco transporte de sedimento e no período chuvoso a carga sedimentar estimada aumenta, porém não consegue representar os eventos. O maior valor registrado pelo modelo foi de 186,7 tons/dia, enquanto o maior valor observado foi de 477,28 tons/dia, ou seja, o modelo subestimou em quase duas vezes e meia a produção da carga sólida no maior evento registrado. Já o menor valor estimado pelo modelo foi de 0,013 tons/dia, enquanto o menor valor observado foi de 0,23 tons/dia, ou seja, o modelo subestimou em quase vinte vezes o valor da produção da carga sólida em momentos de baixa vazão.

Tendo como base apenas as análises dos dados obtidos até então do ano de 2014, o modelo SWAT subestimou os valores da produção da carga sólida tanto no período de estiagem quanto no período chuvoso, isto é, há a necessidade da calibração dessa variável. Nota-se também que o modelo não conseguiu estimar os valores de forma satisfatória, porém conseguiu reproduzir o comportamento sedimentar da bacia, onde a produção de sedimento diminui nos meses de estiagem e no período de chuva aumenta. A baixa produção de sedimentos no período seco se deve ao fato de que o modelo utiliza-se da MUSLE. A MUSLE controla os processos de erosão e sedimentação oriundos das encostas da bacia hidrográfica e, sendo a força motriz da MUSLE o escoamento superficial, fica claro que não haverá qualquer produção de sedimento se não ocorrer um evento chuvoso.

Existem alguns trabalhos na literatura que descrevem a adequação dos valores da produção de sedimentos apenas pela calibração da vazão. Como é o caso do trabalho feito por Ferrigo et al. (2012), onde a autora aplicou o modelo SWAT em uma sub-bacia do Lago do Descoberto-DF, buscando

analisar a viabilidade em simular a carga de sedimentos calibrando unicamente a vazão para o ano hidrológico de 2008/2009. A carga sólida total observada foi de 1552,7 toneladas, enquanto a carga simulada foi de 1334,8 toneladas. Esse resultado demonstrou que o modelo, apenas com calibração da vazão, não conseguiu ajustar os valores de produção de sedimentos de forma satisfatória.

Há poucos trabalhos feitos no Distrito federal onde foi feita a utilização dos dados de sedimentos no modelo SWAT, como é o caso dos trabalhos feitos por Strauch et al. (2013) e Carvalho (2014). Isso se deve ao fato de que faltam dados precisos, com registro de eventos e com uma série histórica grande para a aplicação da modelagem nessa área. Segundo Carvalho (2014), as dificuldades na modelagem dessa variável se deve a etapa de coleta dos dados para construção da série de dados observados, pois a maior parte dos sedimentos de uma bacia hidrográfica é produzida nos eventos chuvosos, especialmente os de alta magnitude, onde os pesquisadores precisam contar com equipamentos automáticos ou estar presentes constantemente no local de coleta.

Outros trabalho vem sendo desenvolvidos com relação à produção da carga sólida na bacia do Gama, o que poderá permitir que no futuro se possa desenvolver uma curva chave de sedimentos segura, permitindo melhorar a comparação dados estimados versus dados observados no modelo SWAT.

5.1.9. Espacialização dos dados na bacia do Gama

O SWAT disponibiliza aos seus usuários a possibilidade de visualizar as áreas da bacia hidrográfica com diferentes tipos de dados da simulação, como produção de sedimentos, vazão, neve, pluviosidade, evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, etc. Isso pode ser feito por HRU, por subbacia, canal, reservatório, entre outros. Todos esses dados de saída estão descritos no manual no SWAT com suas respectivas descrições.

Para este trabalho, foi utilizado os dados por sub-bacias e canal. Apresenta-se na figura 41, figura 42, figura 43, figura 44, figura 45 e figura 46 os mapas espacializados de precipitação por sub-bacia (mm), escoamento superficial por sub-bacia ($\text{mm } H_2O$), uso do solo com sub-bacias, vazão no canal (m^3/s), produção de sedimento no canal (tons) e erosão por subbacia

(tons/ha). Os mapas foram feitos com os dados referentes ao ano de 2010, por estarem mais ligados ao uso do solo (que foi vetorizado com uma ortofoto de 2010).

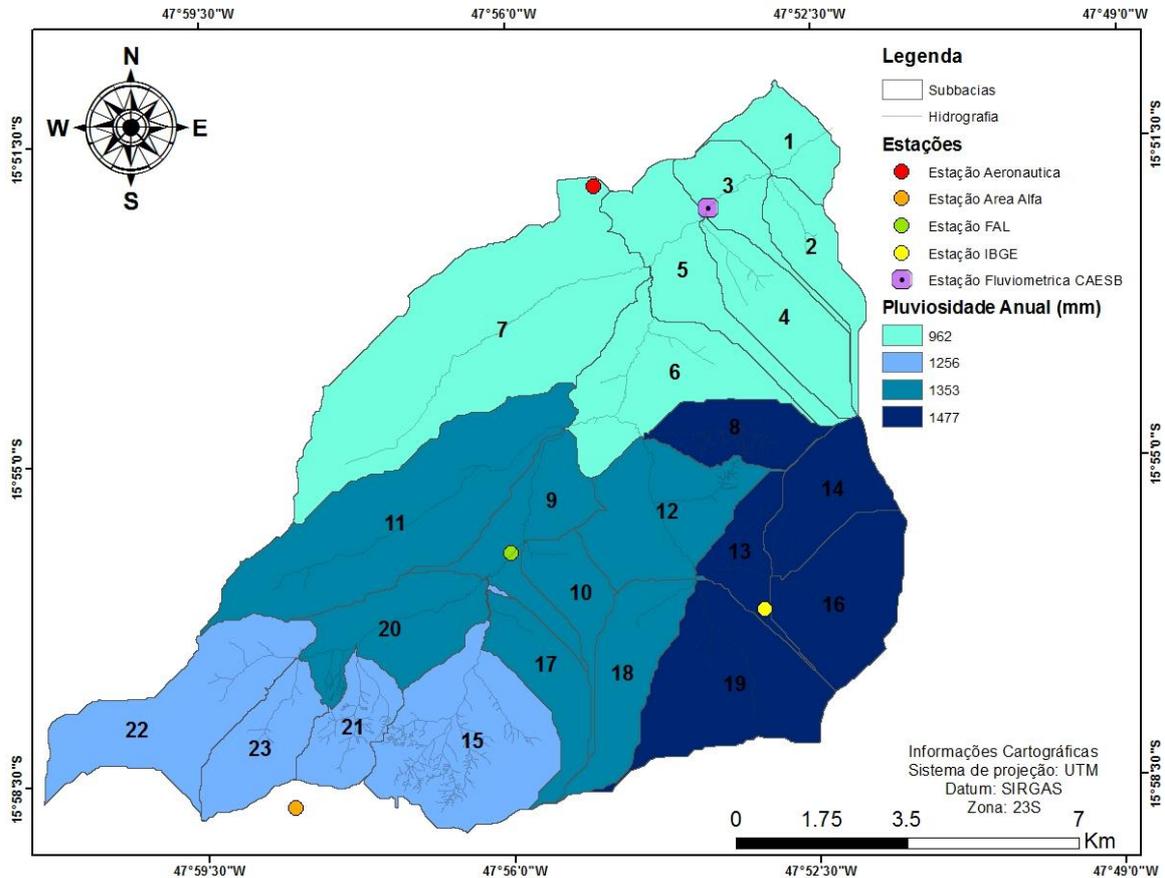


Figura 41 Espacialização da precipitação média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.

É possível perceber, pelo mapa acima, como o modelo SWAT espacializa a chuva dentro da bacia. Nota-se que o modelo separou quatro grupo de médias pluviométricas tendo como base a proximidade das subbacias com a estação pluviométrica mais próxima, onde as médias mais baixas pertencem às estações Área Alfa e ICEA (que possuem um volume anual de 962 mm a 1256 mm) e as médias mais altas pertencem às estações FAL e IBGE (que possuem um volume anual médio de 1353 a 1477). Importante lembrar que a espacialização da chuva pelo modelo leva em consideração o efeito orográfico, depende da sua localização na bacia em termos de altitude e também da influência do vento (NEITSCH, 2009).

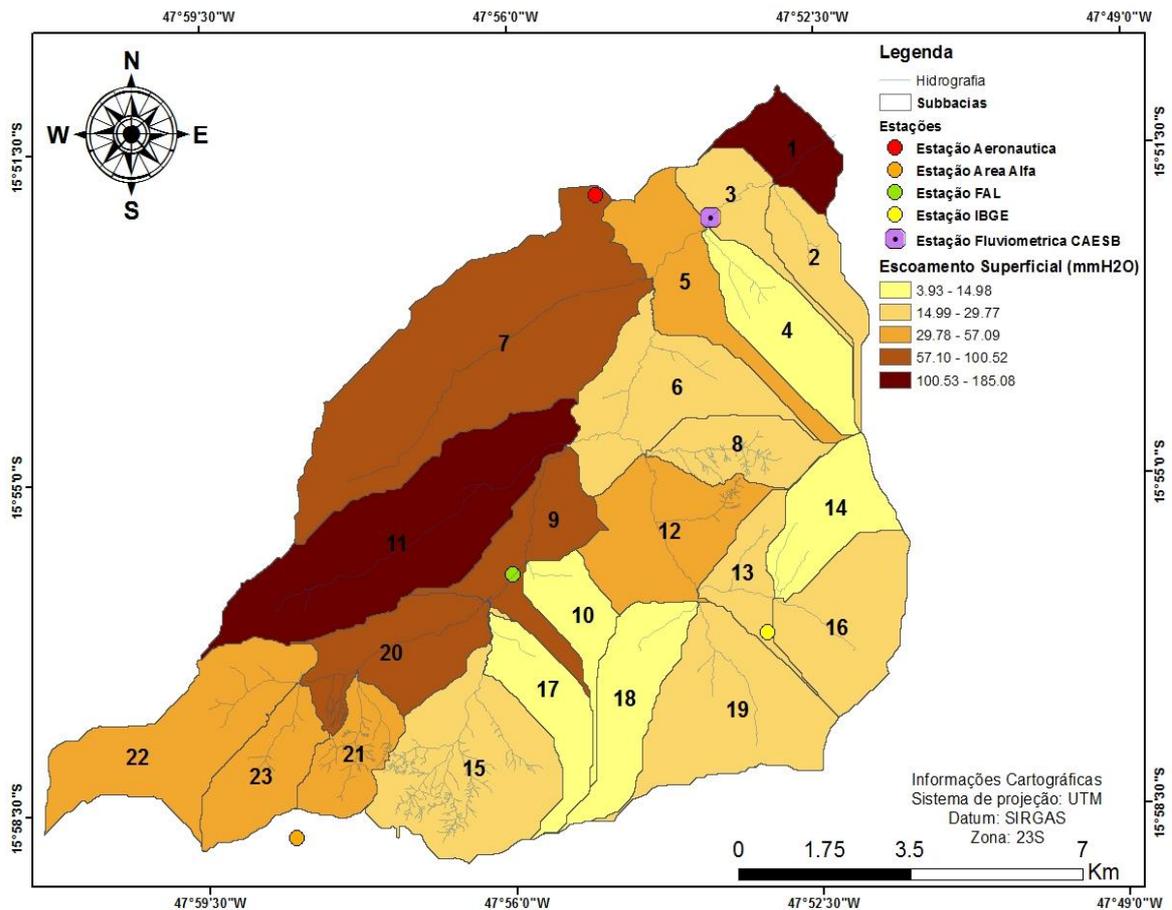


Figura 42 Espacialização do escoamento superficial média anual simulado no ano de 2010 na bacia do Gama.

O mapa de escoamento superficial está intimamente ligado com o uso do solo de cada sub-bacia (figura 42). Fica claro que a parte leste da bacia, onde se localizam as áreas de proteção ambiental e que são regiões com uma maior presença da vegetação nativa (mata galeria, campo, cerrado), possui um menor escoamento superficial, variando entre 0,3 a 57 mm H_2O . Já a parte oeste da bacia, composta por regiões de produção agrícola (hortifrutí), pasto, solo exposto, vias e por área urbana de alta, média e baixa densidade, possui um maior valor de escoamento superficial, variando entre 57 a 185 mm H_2O . A sub-bacia 11, tem o maior valor de escoamento superficial, isso se deve ao fato de que 55% da sua área total é composta por terras usadas para produção agrícola e regiões residenciais de média densidade. A sub-bacia 1 possui o segundo maior valor de escoamento superficial e isso se deve ao fato de que 53% da sua área é composta por regiões de alta densidade urbana e vias

pavimentadas. As subbacias 7,9 e 20, também seguem esse padrão, de serem subbacias bastante modificadas pelo homem.

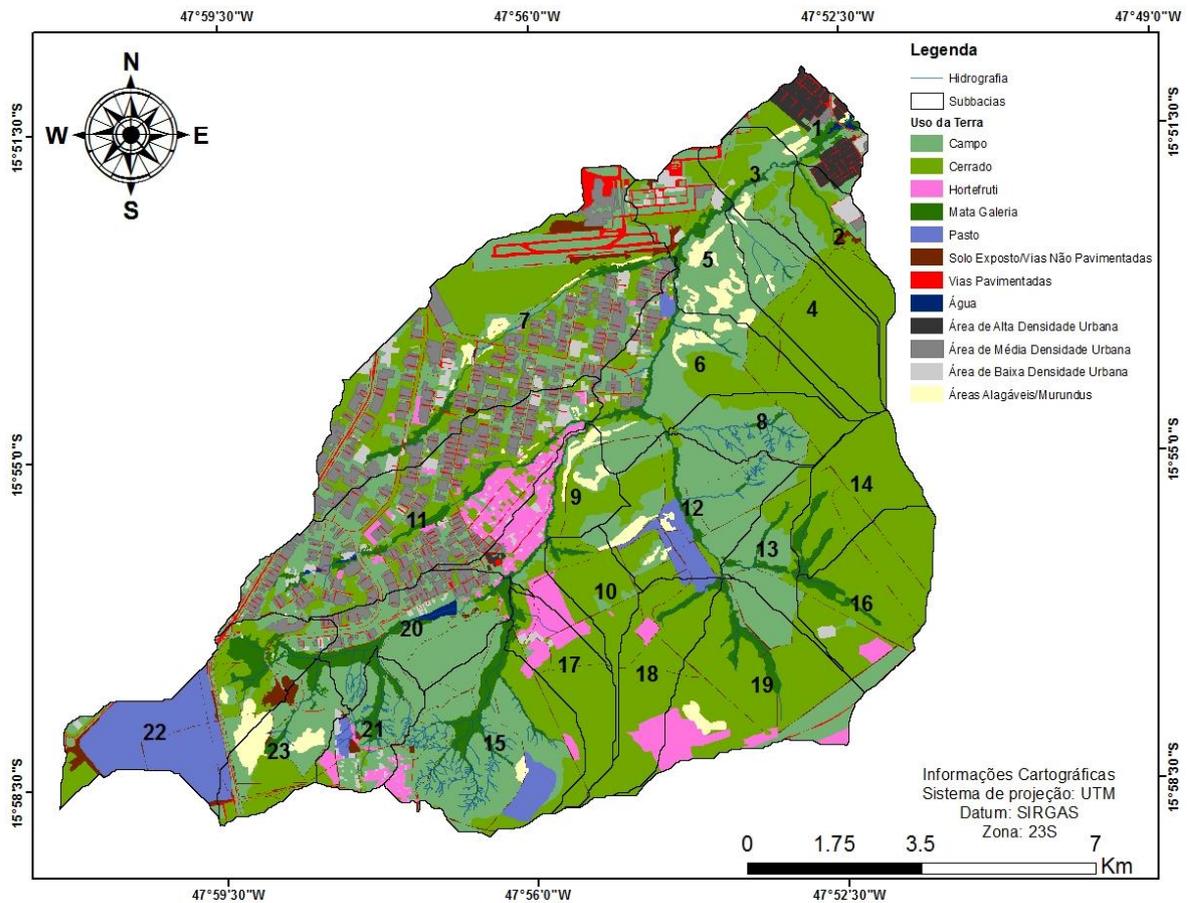


Figura 43 Mapa de uso da terra de 2010 com as subbacias geradas pelo modelo SWAT.

A figura 44 demonstra a espacialização da média anual de vazão no canal. Nota-se que os maiores valores de vazão estão localizados no percurso no canal principal da bacia, logo após a junção do córrego capetinga (subbacia mais dissecada do Gama) com o canal principal. Os maiores valores de vazão estão localizados das subbacias 1,3,5 e 6, que possuem em média um valor de vazão de 0,86 m³/s a 1,96 m³/s, e os menores valores, que estão localizados nas subbacias 2 e 4, possuem uma valor médio de 0,014 m³/s e 0,016 m³/s, respectivamente. Comparando o valor médio anual observado com o valor médio anual estimado pelo modelo SWAT no ano de 2010 na subbacia 3 (onde está localizado a estação fluviométrica da CAESB), tem-se que a médial anual observada foi de 1,76 m³/s e o estimada pelo modelo foi de 1,92 m³/s.

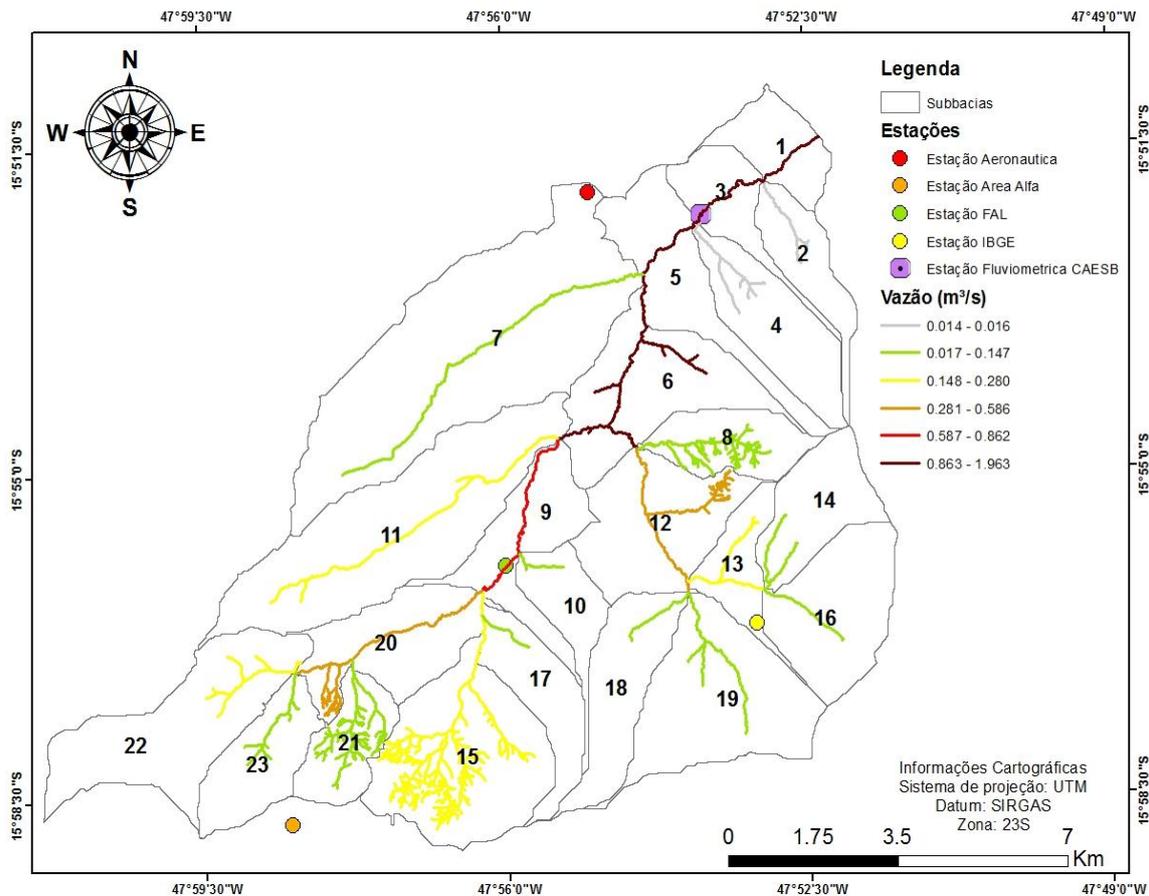


Figura 44 Espacialização da vazão média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.

Comparando-se a figura 44 com a figura 45, é possível observar uma similaridade com relação a espacialização de dados, ficando clara a relação vazão-sedimento no canal na bacia estudada. Nota-se que os canais que possuem as maiores vazões (1,3,5 e 6) e as menores vazões (2 e 4) são exatamente os mesmos canais que possuem as maiores e menores cargas sedimentares. É importante lembrar que não foi usado a calibração de carga sólida neste trabalho, os resultados de sedimentos são gerados apenas a partir da calibração da vazão e está sendo usada no mapa acima só a título de comparação.

Esse resultado também foi encontrado no trabalho Makundan (2010), onde o autor comparou duas bases de dados de solo com resoluções diferentes, a do *United States are the State Soil Geographic (STATSGO)*, mapeado na escala 1:250.000, e a do *Soil Survey Geographic (SSURGO)*, mapeado na escala 1:12.000. Os resultados mostraram que ambas as previsões de fluxo e de sedimentos pelos dois modelos foram semelhantes e

com diferenças estatisticamente insignificantes, embora tenham sido observadas pequenas diferenças. STATSGO estimou mais fluxo e sedimentos em comparação com SSURGO em várias sub-bacias. O autor encontrou dois possíveis efeitos do uso de uma base com maior resolução de dados do solo, um deles é o efeito direto dos parâmetros de dados do solo e o outro é o efeito indireto sobre parâmetros derivados, tais como inclinação, comprimento do declive, e número da curva CN (II). Por fim, o autor conclui que os parâmetros relacionados à topografia e uso da terra podem ter mais influência na produção de sedimentos do que os parâmetros relacionados a solo e que diferença na predição da erosão do canal pelos dois modelos foi atribuída à diferença de predição de fluxo estimada, pois foi encontrado uma forte relação vazão-sedimento nos mapas espacializados.

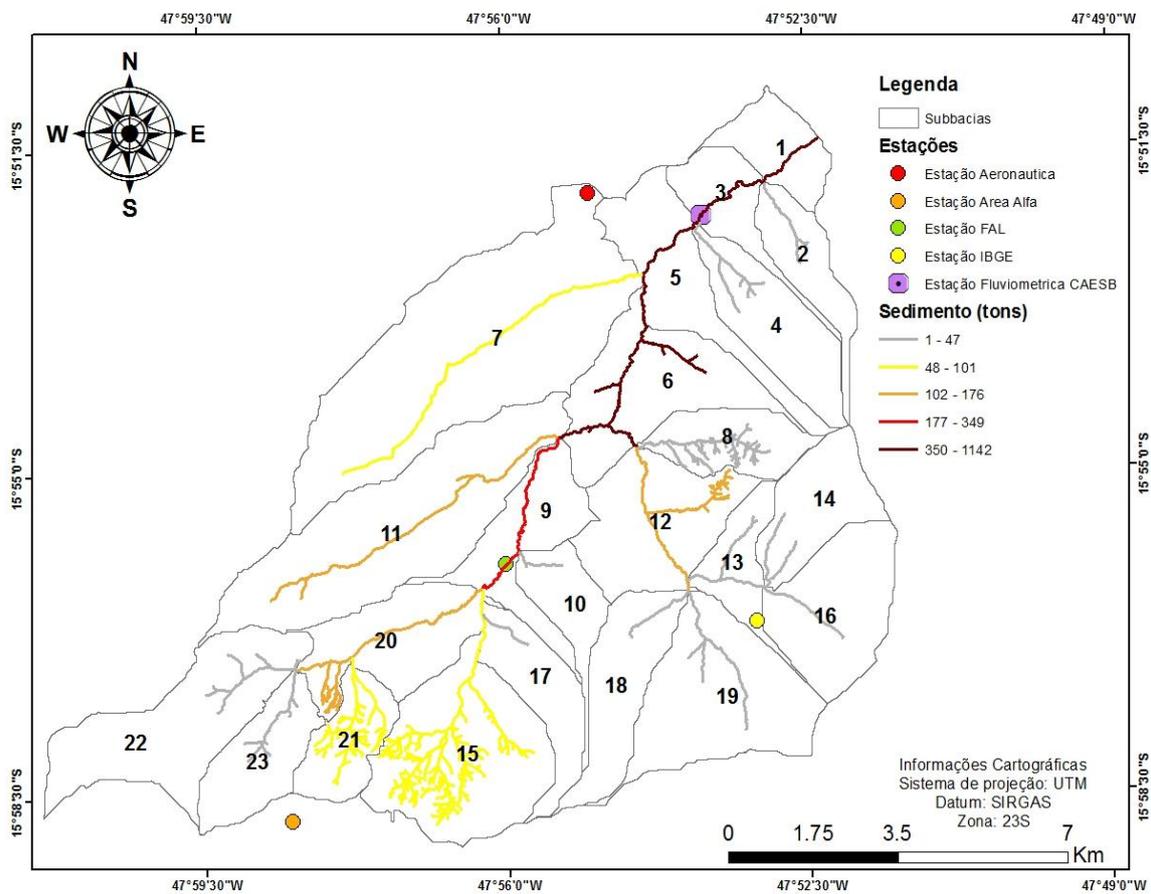


Figura 45 Espacialização da produção de sedimento média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.

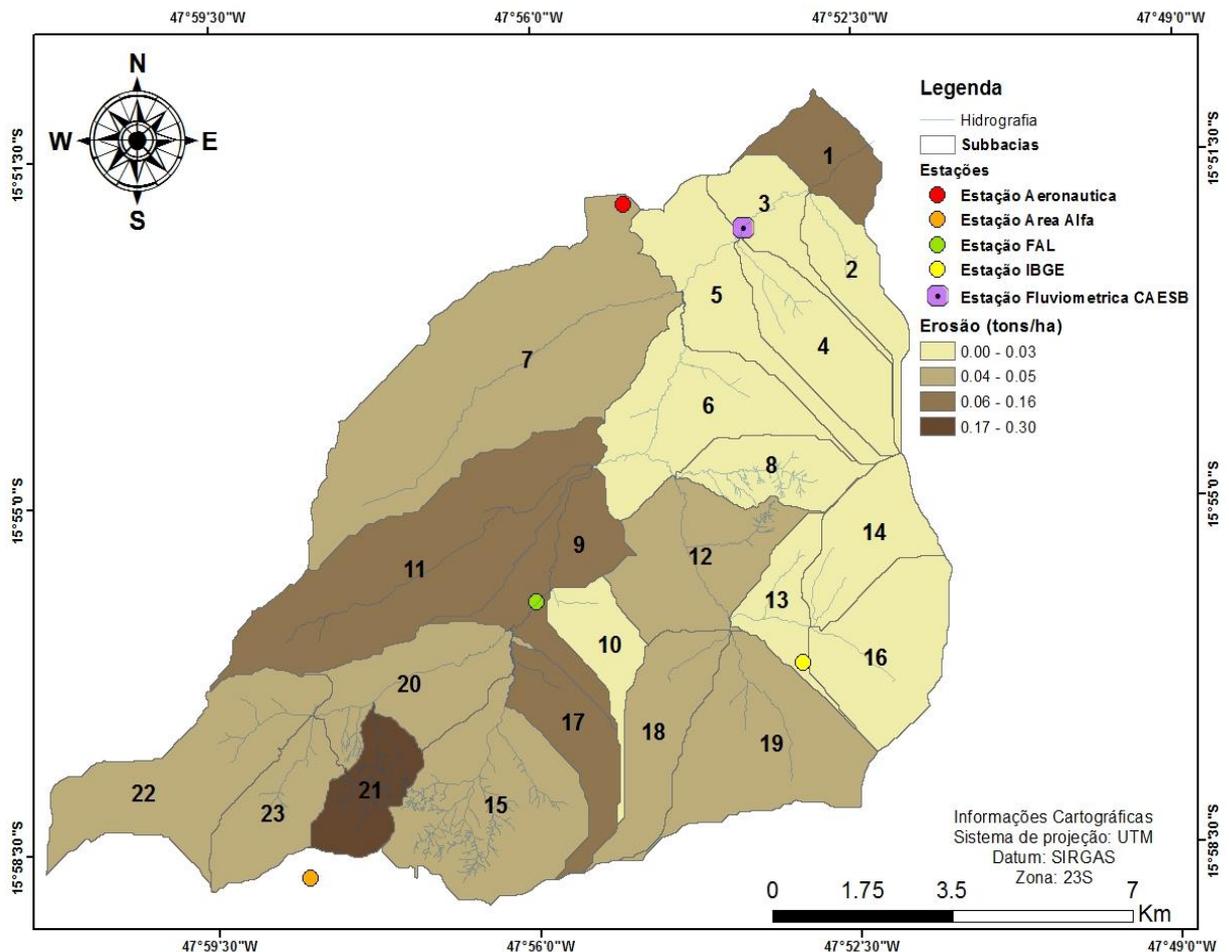


Figura 46 Espacialização da produção de sedimento média anual simulada no ano de 2010 na bacia do Gama.

Com relação a figura 46, também é possível perceber a relação do mapa de erosão com o mapa de uso do solo, assim como foi visto no mapa de escoamento superficial. A sub-bacia com o maior valor de erosão é a sub-bacia 21, que possui 30% da sua área com tipo de uso da terra relacionados à solo exposto/vias não pavimentadas, pasto, agricultura e áreas urbanas de baixa densidade. As sub-bacias 11 e 9 são sub-bacias com atividades agrícolas e áreas urbanas e a sub-bacia 1 possui 51% da sua área total ocupada por áreas de alta densidade urbana. Todos esses tipos usos da terra geram muita perda de sedimento e escoamento superficial. De acordo com Neto (2011), quanto maior o escoamento superficial, maior a propensão à degradação do solo, ou seja, os cenários que promovem maiores escoamentos superficiais, irão, em via de regra, promover uma maior arraste de solo (carga de sedimento). Nota-se que o valor da erosão nas sub-bacias são maiores nas regiões mais altas, com

valores entre 0,06 a 0,30 (tons/ ha), e menores nas regiões mais baixas (exceto na subbacia 1), com valores entre 0 a 0,05 tons/ha.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o modelo SWAT, após a calibração, foi capaz de simular de forma satisfatória a vazão da bacia do ribeirão do Gama, tanto em nível mensal quanto diário, sendo que os resultados mensais mostraram-se mais apropriados do que os diários.

O SWAT, no entanto, não simulou adequadamente a vazão da bacia de acordo com os dados hidrológicos e fisiográficos definidos inicialmente, sendo necessário a calibração do modelo. Sem utilizar o recurso da calibração, o modelo apresenta uma clara tendência em superestimar as variáveis vazão nos períodos chuvosos e subestimá-las na época de estiagem.

Considerando os objetivos expostos no início do trabalho, a análise de sensibilidade permitiu a identificação dos parâmetros mais significativos para a simulação da vazão com o modelo SWAT na bacia estudada, onde, primariamente, foram selecionados os parâmetros mais sensíveis feitos no Distrito Federal realizados nos anos de 2010 a 2014 e depois usados para a calibração do modelo na bacia do Gama. Os parâmetros indicados como de maior sensibilidade para a calibração da vazão foram ESCO, GW_DELAY e SOL_AWC.

O período de calibração do modelo resultou em um ENS de 0,86 e um R^2 de 0,90, para valores mensais, e um ENS de 0,53 e um R^2 0,63, para valores diários. Para o período de validação o modelos resultou em um ENS de 0,85 e um R^2 de 0,96, para valores mensais, e um ENS de 0,57 e um R^2 0,74, para valores diários. Todos os valores apresentaram resultados variando de satisfório a muito bom.

O balanço hídrico para todo o período histórico da bacia do ribeirão do Gama foi coerente com trabalhos experimentais anteriores. Porém o escoamento superficial, mesmo após a calibração, ficou um pouco elevado, cerca de 5,9% do total precipitado e o valor do fluxo de base encontrado neste trabalho foi de 301,18 mm, ou seja, 21,3% do total precipitado, ficou um pouco abaixo so esperado.

De acordo com a comparação feita dos dados de sedimento observados e estimados apenas com a calibração da vazão, tem-se que o modelo SWAT subestimou os valores da produção da carga sólida tanto no período de estiagem quanto no período chuvoso, ou seja, notou-se que há a necessidade da calibração dessa variável. Observou-se também que modelo não conseguiu estimar os valores de forma satisfatória, porém conseguiu reproduzir o comportamento sedimentar da bacia, onde a produção de sedimento diminui nos meses de estiagem e no período de chuva aumenta. Outros estudos vem sendo feitos na bacia do Gama tendo como foco principal a produção de sedimento, o que poderá ajudar em futuros trabalhos com modelagem hidrológica na mesma.

Com relação a espacialização dos dados gerados na simulação na bacia, foi possível entender como o modelo organiza os dados pluviométrico, levando em conta a proximidade das subbacias com as quatro estações utilizadas. Observou-se a clara relação vazão-sedimento na bacia estudada, assim como também foi constatado no trabalho de Makundan (2010). E, por fim, notou-se que escoamento superficial gerado pelo modelo, está intimamente ligado com o uso do solo de cada subbacia. Esta representação de dados espacializados feitos dentro da subbacias, fornece subsídios para a identificação de áreas de maior vulnerabilidade ambiental, mostrando que modelagem pode ser uma ferramenta de apoio a tomada de decisão, porém os resultados obtidos não podem ser considerados como a verdade de campo, pois e os dados coletados em campo não podem ser substituídos. Cabe lembrar que este trabalho só foi possível graças aos dados aferidos em campo.

De acordo com as dificuldades observadas, recomenda-se para os estudos futuros, a inclusão dos dados de sedimentos (que já vem sendo estudados e desenvolvidos, porém não foram utilizados neste trabalho por ter um série histórica de um ano), a calibração do modelo por sub-bacia, a instalação, se possível, de mais estações fluviométricas, pois ajudaria na melhora dos resultados por meio da calibração. E, por fim, verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos sobre o efeito dos parâmetros que influenciam no comportamento do escoamento superficial da bacia.

7. BIBLIOGRAFIA

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

ABBASPOUR, K.C. (2011) 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.

ABBASPOUR, K.C. (2015) 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.

ABBOTT, M. B. An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, 'SHE' – 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 1986, v. 87, p. 61-77

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. MUTTIAH, R. S. WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, v. 34, n. 1, p. 1-17.

ARNOLD, J.G., FOHRER, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, v. 19.

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.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. (2012a) SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Transactions of the ASABE* , v. 55(4), p. 1491-1508.

ARNOLD, J. G. KINITY, J. R. SRINIVASAN, R. WILLIAMS, J. R., HANEY, E.B. NEITSCH, S. L. (2012b) Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica swat (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso para obtenção do título de Mestre em Física do Meio Ambiente. Cuiabá, 2005.

BARBOSA, I. O. et al. Relações Pedomorfogeológicas nas Chapadas elevadas do Distrito Federal. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.33, n.5, p.1373-1383, set./out. 2009.

BELTRÃO J. A. Aplicação do modelo SWAT na estimativa e análise da vazão e precipitação na bacia do Alto São Francisco: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, João Pessoa, 2014.

BENETTI, A.; BIDONE, F. O Meio Ambiente e os Recursos Hídricos. In: Tucci, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Segunda edição. Porto Alegre Ed. Universidade/UFRGS: ABRH.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J.A. Physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol.Sci.Bull., 1979, v.24, p.43–69.

BESKOW, Samuel. LASH model: a hydrological simulation tool in GIS framework. Doutorado em Engenharia Agrícola – Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, 2009.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R; 2010. Elements of the Nature and Properties of Soils 3rd Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

BRANCO, N. Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta. Santa Maria – Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, 1998, 118p.

BONUMÁ, N. B., ROSSI, C.G., ARNOLD, J. G., REICHERT, J.M., PAIVA, E. M. C. D. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. Applied Engineering in Agriculture, 2003 v. 29, p. 189-200.

BONUMÁ, N.B.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.; BARROS, C.A.P.; RODRIGUES, M.F.; BUARQUE, D.C. Simulação da vazão e da produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT. In: LIMA, J.E.F.W.; LOPES, W.T.A. Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Brasília: ABRH, p. 448, 2011.

BONUMÁ, N.B. Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil. 2011. 136 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de ciências rurais. Programa de pós-graduação em ciência do solo. 2011.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. (Org.), Hidrologia-ciência e aplicação Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 1993. p 915-943.

BROOKS, K.N.; P.F. FFOLLIOT; H.M. GREGERSEN; J.L. THAMES. Hydrology and the Management of Watersheds. Iowa State University Press. 1991, 391p.

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Produtos e Serviços - Água e Esgotos no Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em setembro de 2015.

CARDOSO, A. T.; Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC. Dissertação de Mestrado - Universidade

Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2013.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. Hidrologia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, ago. 2006. Obtido em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>. Acesso em: 17/11/2014.

CARVALHO, Flávio Hermínio de. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. 152 f., il. Dissertação Mestrado em Agronomia —Universidade de Brasília, Brasília, 2014

CASTRO, Kássia Batista de. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada. 2013. xix, 122 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências)—Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COELHO NETTO, A.L.; AVELAR, A.S.; FERNANDES, M.C. & LACERDA, W.A. Landslide Susceptibility in a Mountainous Geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain. In: GEOMORPHOLOGY, 2006.

COSTA, L. C. Estudo da vulnerabilidade à erosão com a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo na Alta Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Pepira, utilizando SIG/SPRING. Unesp, 2005.

COELHO NETTO, A.L.; GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. In: COELHO NETTO, A.L. (org). Hidrologia de encostas da interface com a geomorfologia. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1994.

CODEPLAN. Atlas do Distrito Federal. 1ª edição, GDF, Brasília., 1984.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. "Simulação hidrológica de grandes bacias". Revista Brasileira de Recursos Hídricos 6(1), 2001, pp. 95-118.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. Applied hydrology. New York: McGraw-hill Book, 572p. 1988.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. Geomorfologia. 2º ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1980, 188p.

CHRISTOPHERSON, Robert W. Geossistemas – Uma introdução à geografia física. Porto Alegre: Bookman, 7ª edição, 2012.

DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., C.J. RITSEMA. LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. Hydrological Processes, 1996,10, p.1107-1117.

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. Hydrological Processes, 2009 vol 23, 2394 – 2406.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. ArcView interface for SWAT2000 - User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2001. 337p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. Boletim Técnico nº 53.

FAYAL, M. A. de A. Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

FERRIGO, Sara.; MINOTTI, R.; KOIDE S. Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos decorrentes de diferentes cenários de

uso do solo na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, 2011.

FERRIGO, S.; MINOTI, R.T.; ROIG, H.; KOIDE, S. Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu, 2012.

FERRIGO, Sara.; MINOTTI, R.; ROIG, H.L; KOIDE S. Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automatizada do modelo SWAT In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

FERRIGO, Sara. Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF. 2014. 147 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)—Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

GARATUZA-PAVÁN, J.; SÁNCHEZ-ANDRÉS, R.; SÁNCHEZ-CARRILLO, S.; NAVARRO, J.M. Using remote sensing to investigate rate variability in a semiarid watershed, due to changes in vegetation cover. IAHS Publications, 2005, 292,144-15.

GASSMAN, P. W., M. REYES, C. H. GREEN, AND J. G. ARNOLD. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transaction of the ASABE*, 2007 v. 50(4), p. 1211- 1250.

GONÇALVES, T. D. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2007. 88p.

GOERL, R. F, KOBAYAMA, M.; MICHEL, G. P. Relação entre desastres naturais e floresta. *Revista Geonorte*, v. 1, p. 17-48, 2012.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software*, 2008, v. 23, n. 4.

HACK, J.T. Interpretation of Erosional Topography in Humid-Temperate Regions. *Amer. Journ. Sci*, New Haven, Conn. 1960 v. 258-A, p. 80-97.

HACK, J.T., Goodlett, J.C. Geomorphology and Forest ecology of a Mountain Region in the Central Appalachians. *US Geological Survey Professional*, 1960, paper 347.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc America Bulletin*, 1945, v3, n.56.

GARATUZA-PAVÁN, J.; SÁNCHEZ-ANDRÉS, R.; SÁNCHEZ-CARRILLO, S.; NAVARRO, J.M. Using remote sensing to investigate rate variability in a semiarid watershed, due to changes in vegetation cover. *IAHS Publications*, 2005,p.144-15.

GARBOSSA, L. H. P.; BLAINSKI, E.; JUSTEN, J. G K.; VASCONCELOS, L. R. Potencial de uso de modelo hidrológico de base física na avaliação da legislação florestal e seus impactos nos cenários hidrológicos. In *X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Fortaleza – Ceará. Brasil, 2010.

GARBOSSA, L.H.P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. *International SWAT Conference & Workshops*, Toledo Espanha. 27 p. 2011.

KÖPPEN, W. *Climatologia: conun estudio de los climas de latierra*. Fondo de Cultura Económica. México, 1948, 479p.

LIMA, J.E.F.W. Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. 312 f. Tese de Doutorado, Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2010

LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

LIMA, W.P. Princípios de Hidrologia florestal para o manejo de Bacias Hidrográficas. Piracicaba. E. A. Luis de Queiroz/ USP, 1986.

LIMA, J.E.F.W (2000). Determinação e simulação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica do cerrado. Dissertação de Mestrado. Brasília: UnB.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. (2013) Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado. In. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17 a 22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 8 p.

LINO, J.F.L. Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina. 2009.

LOPES, N.H.Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.

KUWAJIMA, J.I; Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP). Dissertação Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2012.

MACHADO, Ronalton Evandro. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP, 2002, 154 p

MAKUNDAN, R., D. E. Radcliffe, and L. M. Risse. 2010. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment. *J. Soil Water Cons.* 65(2): 92-104.

MARCHIORO, E; FERNANDES, N.F; MACEDO, J.R; BHERING, S.B; GONÇALVES, A.O; CAIADO, M.A.C. modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2011, v.12, p. 29-38.

MAIDMENT, D. R., 1993. Developing a Watershed Structure. Report Prepared for the Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California, April, 1993.

MAIDMENT, D. R. Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, New York, ed, 1993.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (Es). *Revista Brasileira De Ciência De Solo*, 2003, V.27, N. 3, Pp. 395-403.

MERCURI, E. G. F. ; DEPPE, F. ; LOHMANN, M. ; SIMOES, K. . Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras. In: XIV SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais do XIV SBSR.

MESQUITA, M.; Mensuração de Perdas de Sedimentos por Escoamento Superficial em Encostas, em Diferentes Usos da Terra no Bioma Cerrado:

Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Gama/DF. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MEYBECK, M.; KIMSTACH, V; HELMER, R. Strategier for water quatityassessment. In: Chapman, D. (Ed.) Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd. ed London: E & FN Spon. 1996, ch 2, p.23-57.

MINELLA, J. P. G. Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2007.

MINOTI, R. T. ; KOIDE, S. ; LIPORONI, L. M. . Estimativa das cargas de sedimentos e nutrientes em duas sub-bacias do lago Paranoá Brasília/DF. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. v. 1. p. 1-19.

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

MOTA, A. R. P.; CARDOSO, M. E. S.; SANTOS, D. H. Erosão e Conservação dos Solos na Microbacia do Córrego do Veado. Colloquium Agrarie: Presidente Prudente, 2008, v. 4, n. 1, p. 09-17.

MOTA, S. Preservação e conservação de recursos hídricos. Rio de Janeiro: ABES, 1995. p.200.

MOURA, Luiz Henrique Amorim. Estudo geoquímico da bacia do Gama e avaliação da qualidade de água. 2008. 129 f., il. Dissertação (Mestrado em Geologia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MOURA, L. H. A., BOAVENTURA, G. R. & PINELLI, M. P., A qualidade da água como indicador de uso e ocupação do solo: Bacia do Gama - Distrito Federal. Química Nova, 2010, Vol. 33-1, pp. 97-103.

MULUNGU, M.M & MUNISHI, S.E. Simiyu River catchment parameterization using SWAT model. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C, 32:1032-1039, 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 2005b.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2009) Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2009. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 654p, 2009.

NETO, Wilson M. S. Avaliação da distribuição espacial de zona de armazenamento de água em nascente perene de microbacia instável Barra de Guaratiba, RJ, UFRJ. 2010.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. SUPREN/IBGE. 1979, Volume 4.

NOVAES PINTO, M. S. Superfícies de Aplainamento do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geografia. 1987, Vol.49. p. 9-26.

NOVAES PINTO, M. Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. In:Cerrado: caracterização, ocupação e perspectiva. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993. p. 285-320.

OKUNISHI, K. Hydrogeomorphological interactions: a review of approach and strategy. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 1991, 12, p. 99-116.

OKUNISHI, K. Concept and methodology of hydrogeomorphology. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 1994, 15A, p. 5-18.

OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicação do modelo SWAT na avaliação de impactos decorrentes da modificação no uso do solo em bacias hidrográficas. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte/MG. Brasil. 1999.

PEREIRA, J.C.D., Aplicação do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeirinha-MG. 134 fl. Dissertação (mestrado). Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá/MG, 2010.

PINHEIRO, C.E.G. Estudos comparativos sobre a fauna de borboletas do Distrito Federal: Implicações para a conservação. In Biodiversidade, Ecologia e Conservação do Cerrado (Scariot, A., Silva, J.C.S. & Felfili J.M. eds.). MMA, Brasília. 2006.

PINTO, D. B. F. Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG. Lavras: UFLA, 2011. 225p. Tese de Doutorado. 2011

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for sediment transport simulation at headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. Transactions of the ASABE, 2013, v. 56, p. 697-709.

RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S.B.D., CORRÊA, G.F. Pedologia: Base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1995. p.304.

RODOLFO JUNIOR, F. ; ARAÚJO, L.G. ; SOUZA, R.Q. ; BATISTA, F.P.S. ; OLIVEIRA, D.N.S. ; LACERDA, M.P.C. . Relações Solo-Paisagem em Topossequências na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. *Nativa* , v. 3, p. 27-35, 2015.

SANTOS, Thiago Tavares. Delimitação espacial e simulação hidrossedimentalógica na Bacia do Rio Japarutuba Mirim em Sergipe. Diss. Universidade Federal de Sergipe, 2010.

SANTOS, Rosely Ferreira. Planejamento Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SARMENTO, L. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. 2010. 241 f. Tese de Doutorado. Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília. Brasília/DF. 2010.

SALLES, Leandro de Almeida. Calibração e validação do modelo Swat para a previsão de vazões na Bacia do Ribeirão Pípiripau. 2012. xv, 114 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)—Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SARTORI, A. 2004. 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, Instituto de Engenharia Civil, Universidade de Campinas. 2004, p.159.

SEQUINATO, L. A insustentabilidade do uso do solo com fumi-cultura em terras declivosas. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2007.

SILVA, C.L e OLIVEIRA, C.A.S (1999). Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil. *Revista brasileira de ciência do solo*. 23(3), 695-701.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and Remote, 2013a.

SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G., Silva, V.C.L. e SILVA, L.P.: “Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil”, Environmental Monitoring and Assessment, 2013.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: Tucci, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Segunda edição. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 2009, p. 35-51.

SOUZA, E. R; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas: Unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 2000 V.21, n.207, p. 15-20.

SOUZA, I.C. Análise da resposta do regime hídrico/sedimentar na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF, durante o ano de 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of basin-scale water quality model with GIS. Water Resources Bulletin, 1994, v. 30, p. 453-462.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion altopography. Geological Society of America Bulletin, 1952, v. 63, n. 11, p. 1117- 1142.

STRAUCH, M., Lima, J.E.F.W., Volk, M., Lorz, C., Makeschin, F., 2013. The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. Journal of Environmental Management v.127, p.24- 36.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 1a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, p. 669.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005, p. 679.

UBERTI, A. A. A.; BACIC, I. L. Z.; PANICHI, J. A. V.; LAUS NETO, J. A.; MOSER, J. M.; PUNDEK, M.; CARRIÃO, S. L. (1991) Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Empasc: Emater (SC), 19 p.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil And Water Assesment Tool) na Simulação da Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural. Porto Alegre; UFRGS/IPH, 2009. 144 p. Dissertação Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; Bishop, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameter soft multi-variable catchment models. Journal of Hydrology 324, 2006, p.10-23.

VAN GRIENSVEN, A. Sensitivity, autocalibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005. Artigo técnico. 2006. Disponível em: <http://gis-vrac.vrac.iastate.edu/icrw/download/PrintOut/SWAT2005_manual_sens_cal_unc.pdf>. Acesso em: 27/12/2014.

VEIGA, A. M. ; OLIVEIRA, W. N. ; SIQUEIRA, R. V. . Utilização de dados espaciais para estimativa de vazão do Ribeirão da Posse no município de Guapó - Goiás. In: XVII SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa - PB. XVII SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015.

VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Multiscale objective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resource Research*, v. 39 (12). 2003.

VAN GRIENSVEN. A. MEIXNER. T.. GRUNWALD. S.. BISHOP. T.. DILUZIO. M.. SRINIVASAN. R. (2006) A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* v. 324, pp. 10–23.

VAN LIEW, M.W.; ARNOLD, J.G.; GARBRECHT, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions ASABE*, v. 46, p. 1539-1551.

VESTENA, L. R. Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WOLMAN MG, MILLER JP. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, *Journal of Geology*. 1960, p.54–74.

WINCHELL, M., SRINIVASAN, R., DI LUZIO, M., AND ARNOLD, J. G. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas. 2010, p.431.

XAVIER, C.F. Avaliação da influência do uso e ocupação do Solo e de características geomofológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba- Paraná. 167 f. Dissertação (Mestrado em Solo) - Universidade Federal do Paraná. 2005.