



**Universidade de Brasília – UnB**

**Instituto de Geociências – IG**

**Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas**

# **MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO INDAIÁ, ALTO SÃO FRANCISCO – MG, UTILIZANDO SWAT**

**KAUEM SIMÕES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Nº 169**

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane Ennes Cicerelli – IG/UnB

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – IG/UnB

**BRASÍLIA – DF**

**Dezembro de 2019**



**Universidade de Brasília – UnB**

**Instituto de Geociências – IG**

**Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas**

# **MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO INDAIÁ, ALTO SÃO FRANCISCO – MG, UTILIZANDO SWAT**

**KAUEM SIMÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (Geoprocessamento e Análise Ambiental) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane Ennes Cicerelli – IG/UnB

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – IG/UnB

**BRASÍLIA – DF**

**Dezembro de 2019**

## TERMO DE APROVAÇÃO

KAUEM SIMÕES

MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO INDAIÁ, ALTO SÃO FRANCISCO – MG, UTILIZANDO SWAT.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (Geoprocessamento e Análise Ambiental) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

### BANCA EXAMINADORA

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane Ennes Cicerelli (Orientadora – UnB)**  
**Presidente**

---

**Prof. Dr. Ricardo Tezini Minoti (UnB)**  
**Membro Interno**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Roberta Sarmiento da Silva (ANA)**  
**Membro Externo**

Brasília, 11 de dezembro de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Simões, Kauem

Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Indaiá, Alto São Francisco – MG, utilizando SWAT / Kauem Simões; orientação de Rejane Ennes Cicerelli – Brasília, 2019.

xxii + 144p.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília / Instituto de Geociências, 2019.

## CITAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Simões, K. *Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Indaiá, Alto São Francisco – MG, utilizando SWAT*. 2019. 144f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2019.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Kauem Simões

TÍTULO: Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Indaiá, Alto São Francisco – MG, utilizando SWAT.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

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

---

Nome: Kauem Simões

CPF: 022.155.879-97

Endereço Comercial: SGAN 601, Conj. I. Ed. Dep. Manoel Novaes – Codevasf

CEP: 70830-019 – Brasília/DF – Brasil

Tel: (61) 2028-4556

E-mail: [kauem2001@gmail.com](mailto:kauem2001@gmail.com) [kauem.simoes@codevasf.gov.br](mailto:kauem.simoes@codevasf.gov.br)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação de mestrado à minha querida e amada esposa Aline Welp Simões pelo apoio incondicional e constante incentivo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, o Grande Arquiteto do Universo, pelo dom da vida, e por ter me guiado e me protegido durante os dois anos de pesquisa de mestrado.

À minha esposa Aline por toda dedicação, amor, carinho e compreensão. Por ser sempre meu porto seguro, principalmente nos momentos mais difíceis.

À minha orientadora Dr<sup>a</sup>. Rejane Ennes Cicerelli e ao meu co-orientador Dr. Henrique Llacer Roig pela oportunidade dada, pelo conhecimento repassado, pelo apoio e incentivo constantes, pela enorme paciência e tempo dedicados ao aprimoramento do trabalho e, por acreditarem na realização deste projeto.

Aos professores do Instituto de Geociências (*IG*) da Universidade de Brasília (*UnB*), em especial aos professores do Seminário I, Dr. Edilson de Souza Bias e Dr<sup>a</sup>. Tati de Almeida, e Seminário II, Dr<sup>a</sup>. Julia Barbosa Curto Ma e Dr. Ricardo Tezini Minoti, pelas correções e aprimoramentos deste trabalho.

A todos colegas do IG, em especial ao grupo de modelagem hidrológica formado por Luciano Campitelli Conti (*Codevasf*), Leandro de Almeida Salles (*Ibram-DF*), Welber Ferreira Alves (*Adasa*), e Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya (*ANA*), pela amizade, troca de conhecimentos, e ajuda no decorrer do processo de modelagem com *SWAT*.

À colega Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya pelo apoio no levantamento e organização dos dados climatológicos e pluviométricos e pelas discussões para aprimoramento das etapas de modelagem no *SWAT*.

À empresa em que trabalho, Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (*Codevasf*), em especial à unidade *AR/GSA/UCF* (onde trabalhava até metade de 2019) e à gerência *AI/GAF* (onde trabalho atualmente), pela liberação parcial concedida para realização do mestrado na *UnB*.

Aos colegas de trabalho Camilo Cavalcanti de Souza, Carlos Alberto Moreira, Círio José Costa, Fabrício de Sousa Líbano, Luciano Campitelli Conti, pelos momentos de incentivo, apoio e descontração.

À equipe técnica da *CEMIG* (*Companhia Energética de Minas Gerais*), em especial aos técnicos Henrique Nunes de Siqueira Campos, Jean de Carvalho Breves e Denise Ferreira dos Santos, pelo fornecimento dos dados sedimentológicos da Estação Porto Indaiá.

À equipe técnica da *ANA* (*Agência Nacional de Águas*), em especial à técnica Andreлина Laura dos Santos, pelo fornecimento dos dados pluviométricos.

À equipe técnica do *INMET* (*Instituto Nacional de Meteorologia*), em especial à técnica Cristina Costa, pelo fornecimento dos dados climatológicos.

À equipe técnica do *USACE* (*United States Army Corps of Engineers*), em especial ao técnico Calvin T. Creech, pela amizade, inspiração e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

À *CAPES* (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*) pelo fomento ao programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da *UnB*.

Finalmente, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste estudo, meus mais sinceros agradecimentos!

## EPÍGRAFE

*“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir.”*  
**Albert Einstein**

## RESUMO

### MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO INDAIÁ, ALTO SÃO FRANCISCO – MG, UTILIZANDO SWAT.

**Curso/Programa:** Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (PPGGAG)

**Área de Concentração:** Geoprocessamento e Análise Ambiental

**Data da Defesa:** 11/12/2019

**Autor:** Kauem Simões

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rejane Ennes Cicerelli – IG/UnB

**Co-orientador:** Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – IG/UnB

A mensuração e avaliação da erosão do solo e, conseqüentemente, da produção de sedimentos são fundamentais no planejamento e gestão de bacias hidrográficas, pois permitem a identificação de áreas críticas susceptíveis aos processos erosivos e hidrossedimentológicos, bem como a determinação de práticas adequadas de manejo e conservação do solo. Assim, o objetivo do presente trabalho de pesquisa foi analisar a produção de sedimentos gerada por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Indaiá, Alto São Francisco, no estado de Minas Gerais, no período de 1988 a 2017, por meio da utilização da ferramenta de modelagem chamada *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. Para isso, elaborou-se uma base de dados (espaciais e alfanuméricos) da área de estudo, em uma escala de trabalho de 1:250.000. Em seguida, utilizou-se estes dados para realizar a simulação em escala mensal das variáveis de interesse (vazão e descarga sólida). Após a simulação inicial, procedeu-se as etapas de análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e verificação do modelo. Na calibração mensal do modelo, realizada para os anos de 1988 a 2007, o desempenho das simulações para vazão média mensal ( $m^3/s$ ) foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,92$  e  $NSE=0,91$ ) e Estação Barra do Funchal ( $R^2=0,90$  e  $NSE=0,87$ ), e para descarga sólida total mensal (ton/mês) foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,51$  e  $NSE=0,50$ ), resultados considerados satisfatórios. Já na verificação mensal do modelo, realizada para os anos de 2008 a 2017, o desempenho das simulações para a vazão foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,85$  e  $NSE=0,82$ ) e Estação Barra do Funchal ( $R^2=0,77$  e  $NSE=0,77$ ), e para a descarga sólida total foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,19$  e  $NSE=0,16$ ). Posteriormente, gerou-se um mapa de produção de sedimentos da área de estudo, o qual indicou, de forma qualitativa, uma tendência de ocorrência de maiores processos erosivos na porção central da bacia. Espera-se que os resultados gerados possam dar suporte às políticas públicas mitigadoras da degradação ambiental da bacia do rio Indaiá.

**Palavras-Chave:** processos erosivos, produção de sedimentos, modelagem hidrossedimentológica, SWAT, análise de sensibilidade, calibração e verificação de modelos.

## ABSTRACT

### HYDROSEDIMENTOLOGICAL MODELING OF INDAIA RIVER BASIN, ALTO SAO FRANCISCO – MG, USING SWAT.

**Course/Program:** Postgraduate in Applied Geosciences and Geodynamics

**Concentration Area:** Geoprocessing and Environmental Analysis

**Date of Defense:** 12/11/2019

**Author:** Kauem Simões

**Advisor:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane Ennes Cicerelli – IG / UnB

**Co-advisor:** Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – IG / UnB

The measurement and evaluation of soil erosion and, consequently, sediment yield are fundamental in the planning and management of watersheds, as they allow the identification of critical areas susceptible to erosive and hydrosedimentological processes, as well as the determination of best management practices (BMPs). Thus, the objective of the present research work was to analyze the sediment yield generated by water erosion in the Indaia river basin, Alto Sao Francisco, Minas Gerais State, from 1988 to 2017, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). For this, a database (spatial and alphanumeric) of the study area was created, in a scale of work of 1: 250,000. Then, these data were used to perform the monthly scale simulation of the variables of interest (flow and total solid discharge). After the initial simulation, the steps of sensitivity analysis of the parameters, calibration and verification of the model were performed. In the monthly calibration of the model, performed from 1988 to 2007, the performance of the simulations for monthly average flow ( $m^3/s$ ) was: Porto Indaia Station ( $R^2=0.92$  and  $NSE=0.91$ ) and Barra do Station Funchal ( $R^2=0.90$  and  $NSE=0.87$ ), and for total monthly total solid discharge (ton/month) it was: Porto Indaia Station ( $R^2=0.51$  and  $NSE=0.50$ ), results considered satisfactory. In the monthly verification of the model, performed from 2008 to 2017, the performance of the simulations for the flow was: Porto Indaia Station ( $R^2=0.85$  and  $NSE=0.82$ ) and Barra do Funchal Station ( $R^2=0.77$  and  $NSE=0.77$ ), and for the total solid discharge it was: Porto Indaia Station ( $R^2=0.19$  and  $NSE=0.16$ ). Subsequently, a sediment yield map of the study area was generated, which qualitatively indicated a tendency for greater erosive processes to occur in the central portion of the basin. It is hoped that the results generated will support public policies that mitigate environmental degradation in the Indaia river basin.

**Keywords:** *erosive processes, sediment yield, hydrosedimentological modeling, SWAT, sensitivity analysis, calibration and validation of models.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquematização do ciclo hidrológico .....	7
<b>Figura 2:</b> Dados de entrada no SWAT e resumo de processos .....	22
<b>Figura 3:</b> Relação entre a incerteza do parâmetro e da predição.....	39
<b>Figura 4:</b> Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas no estudo .....	46
<b>Figura 5:</b> Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Indaiá .....	47
<b>Figura 6:</b> Fluxograma das etapas de modelagem .....	53
<b>Figura 7:</b> Modelo digital de elevação da bacia do Indaiá.....	55
<b>Figura 8:</b> Mapa de solos da bacia do Indaiá.....	57
<b>Figura 9:</b> Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do Indaiá .....	59
<b>Figura 10:</b> Arquivo de localização das estações climatológicas (solar.txt).....	61
<b>Figura 11:</b> Arquivo da série de dados diários de radiação solar (solar83533.txt).....	62
<b>Figura 12:</b> Médias mensais de precipitação da estação Barra do Funchal .....	63
<b>Figura 13:</b> Sub-bacias geradas pelo SWAT na bacia do Indaiá .....	71
<b>Figura 14:</b> Mapa de declividade da bacia do Indaiá.....	72
<b>Figura 15:</b> Interface de entrada dos dados climatológicos .....	73
<b>Figura 16:</b> Configuração dos dados para simulação .....	75
<b>Figura 17:</b> Curva-chave de sedimentos em suspensão .....	84
<b>Figura 18:</b> Balanço hídrico anual simulado para o período de 1988 a 2017 .....	86
<b>Figura 19:</b> Simulação inicial da vazão – Porto Indaiá (Sub-bacia 01).....	87
<b>Figura 20:</b> Simulação inicial da vazão – Barra do Funchal (Sub-bacia 10).....	87
<b>Figura 21:</b> Simulação inicial da descarga sólida total – Porto Indaiá (Sub-bacia 01).....	88
<b>Figura 22:</b> Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros.....	90
<b>Figura 23:</b> Melhor simulação da vazão na calibração – Porto Indaiá (Sub-bacia 01).....	92
<b>Figura 24:</b> Melhor simulação da vazão na calibração – Barra do Funchal (Sub-bacia 10).....	92
<b>Figura 25:</b> Melhor simulação da descarga sólida na calibração – Porto Indaiá (Sub-bacia 01).....	93
<b>Figura 26:</b> Simulação da vazão na verificação – Porto Indaiá (Sub-bacia 01).....	96
<b>Figura 27:</b> Simulação da vazão na verificação – Barra do Funchal (Sub-bacia 10) .....	97
<b>Figura 28:</b> Simulação da descarga sólida na verificação – Porto Indaiá (Sub-bacia 01) .....	98
<b>Figura 29:</b> Balanço hídrico anual simulado para o período de calibração (1988 a 2007).....	99
<b>Figura 30:</b> Produção de sedimentos média anual da bacia do Indaiá (por sub-bacia).....	102
<b>Figura 31:</b> Produção de sedimentos média anual da bacia do Indaiá (por hru).....	103

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Classificação dos resultados do SWAT por índice de eficiência .....	37
<b>Tabela 2:</b> Características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Indaiá .....	48
<b>Tabela 3:</b> Dados demográficos e econômicos dos municípios que englobam a bacia .....	51
<b>Tabela 4:</b> Reclassificação dos solos para as classes do SWAT.....	56
<b>Tabela 5:</b> Reclassificação do uso do solo para as classes do SWAT .....	58
<b>Tabela 6:</b> Estações climatológicas do INMET utilizados no estudo .....	60
<b>Tabela 7:</b> Estações pluviométricas da ANA utilizados no estudo .....	62
<b>Tabela 8:</b> Coeficiente de eficiência de acordo com o detalhamento da bacia do Indaiá .....	70
<b>Tabela 9:</b> Estações pluviométricas vinculadas as sub-bacias geradas.....	74
<b>Tabela 10:</b> Intervalos iniciais utilizados na calibração hidrossedimentológica.....	81
<b>Tabela 11:</b> Intervalos ajustados utilizados na verificação hidrossedimentológica .....	82
<b>Tabela 12:</b> Parâmetros de estatística descritiva calculados para curva-chave de sedimentos .....	84
<b>Tabela 13:</b> Balanço hídrico anual simulado para o período de 1988 a 2017.....	86
<b>Tabela 14:</b> Avaliação estatística da simulação inicial (1988-2017) .....	88
<b>Tabela 15:</b> Valores dos parâmetros mais sensíveis não ajustados.....	90
<b>Tabela 16:</b> Avaliação estatística da calibração mensal (1988-2007).....	94
<b>Tabela 17:</b> Valores dos parâmetros mais sensíveis ajustados na calibração .....	95
<b>Tabela 18:</b> Avaliação estatística da verificação mensal (2008-2017) .....	98
<b>Tabela 19:</b> Balanço hídrico anual simulado para o período de calibração (1988 a 2007).....	100
<b>Tabela 20:</b> Valores de referência para o balanço hídrico anual.....	100
<b>Tabela 21:</b> Produção de sedimentos anual da bacia do Indaiá (por sub-bacia) .....	101

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Principais agentes erosivos e tipos de erosão .....	9
<b>Quadro 2:</b> Problemas decorrentes do transporte e deposição de sedimentos.....	11
<b>Quadro 3:</b> Benefícios decorrentes do transporte e deposição de sedimentos.....	11
<b>Quadro 4:</b> Parâmetros do SWAT para simulação da vazão e da carga de sedimentos .....	30
<b>Quadro 5:</b> Informações técnicas dos dados espaciais levantados .....	52
<b>Quadro 6:</b> Informações técnicas dos dados alfanuméricos levantados .....	52
<b>Quadro 7:</b> Parâmetros de solos do banco de dados do SWAT (UserSoil).....	66
<b>Quadro 8:</b> Parâmetros de crescimento vegetal do banco de dados do SWAT (Crop) - Continua .....	67
<b>Quadro 9:</b> Parâmetros de crescimento vegetal do banco de dados do SWAT (Crop) - Conclusão .....	68
<b>Quadro 10:</b> Parâmetros estatísticos climáticos do gerador de clima do SWAT (WGEN).....	69
<b>Quadro 11:</b> Períodos utilizados e sua função na etapa de simulação.....	74
<b>Quadro 12:</b> Períodos utilizados e sua função na etapa de pós-processamento .....	75
<b>Quadro 13:</b> Lista dos parâmetros mais sensíveis identificados em alguns estudos .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 95PPU: 95 Percent Prediction Uncertainty – Faixa de Incerteza de Predição de 95%
- ADASA: Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
- Adm: Adimensional
- AGNPS: Agricultural Non Point Source Pollution Model – Modelo de Fonte Difusa Para a Poluição na Agricultura
- AI/GAF: Gerência de Administração Fundiária da Codevasf
- ANA: Agência Nacional de Águas
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANSWERS: Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – Simulação de Resposta para Fonte de Área Difusa no Ambiente de Bacia Hidrográfica
- AR/GSA/UCF: Unidade de Conservação de Água, Solo e Recursos Florestais da Codevasf
- ArcGIS: Software para Sistema de Informações Geográficas da Esri
- ArcSWAT: Extensão e Interface ArcGIS para o SWAT
- ARS: Agricultural Research Service – Serviço de Pesquisa Agrícola
- BMPs: Best Management Practices – Boas Práticas de Manejo
- CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais
- CN: Curve Number – Curva Número
- CODEVASF: Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
- ESRI: Environmental Systems Research Institute – Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais
- EUA: Estados Unidos da América
- EUROSEM: European Soil Erosion Model – Modelo de Erosão do Solo Europeu
- GLUE: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation – Estimativa da Incerteza de Probabilidade Generalizada
- Hab: habitantes
- HRUs: Hydrologic Response Units – Unidades de Resposta Hidrológica
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBRAM-DF: Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal
- IDHM: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
- IG: Instituto de Geociências
- INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
- KGE: Kling–Gupta Efficiency – Coeficiente de Eficiência Kling–Gupta
- KINEROS: Kinematic Runoff and Erosion Model – Modelo de Erosão e de Escoamento Superficial Cinemático
- LH: Latin Hypercube – Hiperubo Latino
- LH-OAT: Junção entre os métodos Latin Hypercube e One-Factor-At-a-Time
- LISEM: Limburg Soil Erosion Model – Modelo de Erosão do Solo de Limburg
- LS: slope Length and slope Steepness – Comprimento da vertente e Inclinação da vertente
- MapBiomass: Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil
- MCMC: Markov Chain Monte Carlo – Monte Carlo via Cadeias de Markov
- MDB: Microsoft Access Database
- MDE: Modelo Digital de Elevação
- MDS: Modelo Digital de Superfície

*MG: Minas Gerais*

*MNS: Modified Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado*

*MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo Modificada*

*MVT: Modelo Digital do Terreno*

*NASA: National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço*

*NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe*

*OAT: One-Factor-At-a-Time*

*PARASOL: Parameter Solution – Solução de Parâmetros*

*PBIAS: Percent Bias – Percentual de Tendência*

*PET: Potential Evapotranspiration – Evapotranspiração Potencial*

*PSO: Particle Swarm Optimization – Otimização por Enxame de Partículas*

*R<sup>2</sup>: Coefficient of determination – Coeficiente de determinação*

*RSR: RMSE-observations Standard Deviation Ratio – Razão entre o Erro Padrão Médio e o Desvio Padrão das Observações*

*RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo Revisada*

*SCS: Soil Conservation Service – Serviço de Conservação do Solo*

*SIG: Sistemas de Informações Geográficas*

*SIRGAS: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas*

*SRTM: Shuttle Radar Topography Mission – Missão Topográfica do Radar Shuttle*

*SUF12: Sequential Uncertainty Fitting Algorithm Version2 – Algoritmo Sequencial de Ajuste de Incerteza Versão2*

*SWAT: Soil and Water Assessment Tool – Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água*

*SWAT-CUP: Calibration and Uncertainty Program – Programa de Calibração e Incerteza*

*TAMU: Texas A&M University – Universidade Agrícola e Mecânica do Texas*

*UHE: Usina Hidrelétrica*

*UnB: Universidade de Brasília*

*USACE: United States Army Corps of Engineers – Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos*

*USDA: United States Department of Agriculture – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos*

*USGS: United States Geological Survey – Serviço Geológico dos Estados Unidos*

*USLE: Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo*

*WEPP: Water Erosion Prediction Project – Projeto de Predição da Erosão Hídrica*

*WESP: Watershed Erosion Simulation Program – Programa de Simulação da Erosão em Bacias Hidrográficas*

## LISTA DE PARÂMETROS DO SWAT

- ADJ\_PKR*: Peak rate adjustment factor – Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos nos canais tributários (adm)
- ALAI\_MIN*: Minimum leaf area index during dormant – Índice mínimo de área foliar durante a dormência (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)
- ALPHA\_BF*: Base flow recession constant – Constante de recessão do fluxo de base (dias)
- ANION\_EXCL*: Fraction of porosity from which anions are excluded – Fração de porosidade (fração)
- BIO\_E*: Radiation-use efficiency – Eficiência do uso da radiação ((kg/ha) / (MJ/m<sup>2</sup>))
- BIO\_LEAF*: Fraction of tree biomass accumulated during dormancy – Fração da biomassa acumulada durante a dormência (fração)
- BIOEHI*: Biomass-energy ratio – Relação biomassa-energia (adm)
- BIOMIX*: Biological mixing efficiency – Eficiência da mistura biológica do solo (adm)
- BLAI*: Maximum potential leaf area index – Índice máximo de área foliar potencial (adm)
- BLAI*: Potential maximum leaf area index for the plant – Índice de área foliar máxima potencial (adm)
- BM\_DIEOFF*: Biomass dieoff fraction – Fração de morte da biomassa (fração)
- BMX\_TREES*: Maximum biomass for a forest – Biomassa máxima para uma floresta (ton/ha)
- BN1*: Nitrogen uptake parameter #1 – Parâmetro de absorção de nitrogênio #1 (kg N/kg biomassa)
- BN2*: Nitrogen uptake parameter #2 – Parâmetro de absorção de nitrogênio #2 (kg N/kg biomassa)
- BN3*: Nitrogen uptake parameter #3 – Parâmetro de absorção de nitrogênio #3 (kg N/kg biomassa)
- BP1*: Phosphorus uptake parameter #1 – Parâmetro de absorção de fósforo #1 (kg P/kg biomassa)
- BP2*: Phosphorus uptake parameter #2 – Parâmetro de absorção de fósforo #2 (kg P/kg biomassa)
- BP3*: Phosphorus uptake parameter #3 – Parâmetro de absorção de fósforo #3 (kg P/kg biomassa)
- CANMX*: Maximum canopy storage – Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)
- CH\_COV1*: Channel erodibility factor – Fator de erodibilidade do canal (adm)
- CH\_COV2*: Channel cover factor – Fator de cobertura do canal (adm)
- CH\_K2*: Effective hydraulic conductivity of channel – Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/hr)
- CH\_N2*: Manning's "n" value for the main channel – Coeficiente de Manning para o canal principal (m<sup>-1/3</sup>.s)
- CHTMX*: Maximum canopy height – Altura máxima do dossel (m)
- CLAY*: % Clay content in the soil layer – Teor de argila na camada de solo (%)
- CN2*: Moisture condition II curve number – Curva Número para a condição de umidade II (adm)
- CNYLD*: Normal fraction of nitrogen in yield – Fração normal de nitrogênio na colheita (kg N/kg colheita)
- CO2HI*: Elevated CO<sub>2</sub> atmospheric concentration – Concentração atmosférica elevada de CO<sub>2</sub> (µL CO<sub>2</sub>/L de ar)
- CPYLD*: Normal fraction of phosphorus in yield – Fração normal de fósforo na colheita (kg P/kg colheita)
- DLAI*: Fraction of growing season – Fração da época de crescimento (fração)
- EPCO*: Plant uptake compensation factor – Fator de compensação da captação de água pela vegetação (adm)
- ESCO*: Soil evaporation compensation coefficient – Coeficiente de compensação da evaporação do solo (adm)
- EXT\_COEF*: Light extinction coefficient – Coeficiente de radiação fotossintética interceptada (adm)
- FERTFIELD*: Indicates when there is crop fertilization – Indica quando há fertilização da cultura (adm)
- FRGMAX*: Fraction of maximum stomatal conductance – Fração da condutância estomatal máxima (fração)
- FRGRW1*: Fraction of the plant growing season 1 – Fração da época de crescimento da planta 1 (fração)
- FRGRW2*: Fraction of the plant growing season 2 – Fração da época de crescimento da planta 2 (fração)
- GSI*: Maximum stomatal conductance – Condutância estomatal máxima (m·s<sup>-1</sup>)

*GW\_DELAY: Delay time for aquifer recharge – Intervalo de tempo de atraso para recarga do aquífero (dias)*

*GW\_REVAP: Revap coefficient – Coeficiente “revap” da água subterrânea (adm)*

*GWHT: Initial groundwater height – Altura inicial do aquífero (m)*

*GWQMN: Threshold water level in shallow aquifer for base flow – Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm)*

*HVSTI: Harvest index for optimal growing conditions – Índice de colheita para condições ideais de crescimento (adm)*

*HYDGRP: Grupo Hidrológico do Solo (A, B, C ou D)*

*LAIMX1: Fraction of the maximum leaf area index 1 – Fração do índice máximo de área foliar 1 (fração)*

*LAIMX2: Fraction of the maximum leaf area index 2 – Fração do índice máximo de área foliar 2 (fração)*

*LAT\_SED: Concentration of sediment in lateral and groundwater flow – Concentração de sedimento no escoamento subsuperficial (mg/L)*

*MAT\_YRS: Number of years for tree species full development – Número de anos para pleno desenvolvimento para espécies arbóreas (anos)*

*NLAYERS: Número de camadas do solo*

*OV\_N: Manning's value for overland flow – Coeficiente de Manning para escoamento superficial ( $m^{-1/3}.s$ )*

*PRF: Peak rate adjustment factor – Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos no canal principal (adm)*

*RCHRG\_DP: Aquifer percolation coefficient – Coeficiente de percolação do aquífero (mm)*

*RDMX: Maximum root depth – Profundidade máxima da raiz (m)*

*REVAPMN: Threshold water level in shallow aquifer for revap – Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do “revap” (mm)*

*ROCK: % Rock content in the soil layer – Teor de fragmentos de rocha na camada de solo (%)*

*RSDCO\_PL: Plant residue decomposition coefficient – Coeficiente de decomposição de resíduos vegetais (adm)*

*SAND: % Sand content in the soil layer – Teor de areia na camada de solo (%)*

*SHALLST: Initial depth of water in the shallow aquifer – Profundidade inicial de água no aquífero raso (mm  $H_2O$ )*

*SILT: % Silt content in the soil layer – Teor de silte na camada de solo (%)*

*SLOPE: Average slope of the subbasin – Declividade média da sub-bacia (m/m)*

*SLSUBBSN: Average slope length – Comprimento médio da encosta (m)*

*SOL\_ALB: Moist soil albedo – Albedo do solo úmido (adm)*

*SOL\_AWC: Available water capacity of the soil layer – Capacidade de água disponível da camada de solo (mm  $H_2O/mm$  solo)*

*SOL\_BD: Bulk density of the soil layer – Densidade aparente da camada de solo ( $mg/m^3$ )*

*SOL\_CBN: Amount of organic carbon in the soil layer – Teor de carbono orgânico na camada de solo (%)*

*SOL\_CRK: Potential crack volume for soil profile – Volume potencial de rachaduras para o perfil de solo (fração)*

*SOL\_K: Saturated hydraulic conductivity – Condutividade hidráulica saturada (mm/hr)*

*SOL\_Z: Depth from soil surface to bottom of the soil layer – Profundidade a partir da superfície do solo até o fundo da camada de solo (mm)*

*SOL\_ZMX: Maximum rooting depth in soil – Profundidade máxima de enraizamento no solo (mm)*

*SPCON: Coefficient in sediment transport equation – Parâmetro linear para reentrada de sedimento durante o transporte no canal (adm)*

*SPEXP: Exponent in sediment transport equation – Parâmetro exponencial para reentrada de sedimento durante o transporte no canal (adm)*

*SURLAG: Surface runoff lag coefficient – Coeficiente de atraso do escoamento superficial (adm)*

*T\_BASE: Minimum (base) temperature for plant growth – Temperatura mínima (base) para o crescimento das plantas (°C)*

*T\_OPT: Optimal temperature for plant growth – Temperatura ideal para o crescimento das plantas (°C)*

*TEXTURE: Textura da camada do Solo*

*USLE\_C: USLE cover and management fator – Fator C da USLE (fator de cobertura do solo) (adm)*

*USLE\_K: USLE soil erodibility fator- Fator K da USLE (fator de erodibilidade do solo) (0,013 (ton m<sup>2</sup> hr)/(m<sup>3</sup> ton cm))*

*USLE\_P: USLE support practice fator – Fator P da USLE (fator de práticas conservacionistas) (adm)*

*VPDFR: Vapor pressure deficit – Déficit de pressão de vapor (kPa)*

*WAVP: Rate of decline in radiation use efficiency per unit increase in vapor pressure deficit – Taxa de declínio na eficiência do uso de radiação por unidade de aumento no déficit de pressão de vapor (adm)*

*WSYF: Lower limit of harvest index – Limite inferior do índice de colheita ((kg/ha) / (kg/ha))*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_{ch}$  : área da seção do canal ( $m^2$ )
- $area_{hru}$  : área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha)
- $conc_{sed, ch, i}$  : concentração de sedimentos no início do intervalo de tempo ( $ton/m^3$  ou  $kg/L$ )
- $conc_{sed, ch, mx}$  : concentração máxima de sedimentos que pode ser transportado pela água ( $ton/m^3$  ou  $kg/L$ )
- $I_a$  : condição antecedente de umidade antes do escoamento superficial (mm)
- $E_{solo, z}$  : demanda evaporativa (mm) na profundidade
- $Q_{surf}$  : escoamento superficial no dia  $i$  (mm)
- $E_z^-$  : evaporação máxima do solo para o dia (mm)
- $E_a$  : evaporação no dia  $i$  (mm)
- $C_{ch}$  : fator de cobertura do canal (adm)
- $K_{ch}$  : fator de erodibilidade do canal (adm)
- $Q_{gw}$  : fluxo de retorno (quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo) no dia  $i$  (mm)
- $\alpha_{tc}$  : fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração da bacia (adm)
- $IAF_{mx}$  : índice de área foliar máximo quando do completo desenvolvimento do vegetal (adm)
- $IAF$  : índice de área foliar para um determinado dia (adm)
- $w_{seep}$  : percolação (quantidade de água que entrou na zona vadosa) no dia  $i$  (mm)
- $R_{day}$  : precipitação no dia  $i$  (mm)
- $Q_{arm, i-1}$  : quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm)
- $Q'_{surf}$  : quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm)
- $SW_0$  : quantidade de água no início do dia (mm)
- $SW_f$  : quantidade de água no solo no fim do dia (mm)
- $Q_{surf}$  : quantidade de água que chega ao canal principal por escoamento superficial (mm)
- $sed_{ch, i}$  : quantidade de sedimento inicial no canal (ton)
- $cop_{mx}$  : quantidade máxima de água armazenada na copa quando esta está completamente desenvolvida
- $cop_{dia}$  : quantidade máxima de água que pode ser armazenada na copa em um dado dia
- $sed_{dep}$  : quantidade total de sedimento depositado (ton)
- $t_{conc}$  : tempo de concentração da sub-bacia (horas)
- $sed_{deg}$  : total de sedimento degradado do canal (ton)
- $sed_{ch}$  : total de sedimento suspenso no canal (ton)
- $sed_{out}$  : total de sedimentos transportado para fora da seção (ton)
- $q_{ch, pk}$  : vazão ( $m^3/s$ )
- $q_{pico}$  : vazão de pico do escoamento ( $m^3/s$ );
- $v_{ch, pk}$  : velocidade de pico do canal (m/s)
- $V_{arm}$  : volume armazenado no trecho ( $m^3$ )
- $V_{arm, 1}$  : volume armazenando no início do intervalo de tempo ( $m^3$ )
- $V_{ch}$  : volume de água no segmento do canal ( $m^3$ )
- $V_{in}$  : volume de água que entra no início do intervalo de tempo ( $m^3$ )
- $V_{out}$  : volume de água saído no espaço de tempo ( $m^3$ )
- $V_{ent}$  : volume de entrada no trecho ( $m^3$ )

$V_{saída}$  : volume de saída no trecho ( $m^3$ )

$V_{saída,2}$  : volume que sai do trecho no fim do intervalo de tempo ( $m^3$ )

$a$  e  $b$ : parâmetros de regressão que caracterizam a transmitância atmosférica.

$A$ : área da sub-bacia ( $km^2$ )

$Aw$ : clima tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso

$b_i$ : variável independente (parâmetros)

$C$ : fator de uso e manejo do solo ( $adm$ )

$CFRG$ : fator de fragmentação esparsa ( $adm$ )

$cm$ : centímetro

$Cm$ : coeficiente de manutenção ( $m^2/m$ )

$CN$ : valor de curva-número, que corresponde à capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo

$c_{sp}$  e  $sp_{exp}$ : coeficientes de ajuste, variando entre 0,0001 a 0,01 e entre 1 a 2

$Css$ : concentração de sedimentos em suspensão ( $mg/L$ )

$Cwa$ : clima temperado brando com verão quente e inverno brando

$CX$ : cambissolo

$Cxa$ : cambissolo háplico aluminico

$CXbd$ : cambissolo háplico Tb distrófico

$Dd$ : densidade de drenagem ( $km/km^2$ )

$Dh$ : densidade hidrográfica (canais/ $km^2$ )

$dv$ : distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal ( $km$ )

$Eps$ : extensão média do percurso superficial ( $m$ )

$F$ : fator de forma ( $km/km^2$ )

$g$ : variável dependente

$Gc$ : gradiente dos canais (%)

$ha$ : hectare

$Hm$ : amplitude altimétrica da bacia ( $m$ )

$Hmáx$ : altitude máxima da bacia ( $m$ )

$hmáx$ : altitude máxima do rio principal ( $m$ )

$Hmín$ : altitude mínima da bacia ( $m$ )

$hmín$ : altitude mínima do rio principal ( $m$ )

$hr$ : horas

$Ic$ : índice de circularidade ( $adm$ )

$Is$ : índice de sinuosidade ( $km/km$ )

$K$ : fator erodibilidade do solo [ $(0,013ton\ m^2\ hr) / (m^3\ ton\ cm)$ ]

$Kc$ : coeficiente de compacidade ( $adm$ )

$km$ : quilômetro

$km^2$ : quilômetro quadrado

$L$ : comprimento do canal principal ( $km$ )

$L$ : litro

$LS$ : fator topográfico ( $adm$ )

$Lt$ : comprimento total dos canais ( $km$ )

*LV: latossolo vermelho*  
*LVA: latossolo vermelho-amarelo*  
*LVA<sub>d</sub>: latossolo vermelho-amarelo distrófico*  
*LV<sub>d</sub>: latossolo vermelho distrófico*  
*m: metro*  
*m: número de parâmetros*  
*m<sup>2</sup>: metro quadrado*  
*m<sup>3</sup>: metro cúbico*  
*mg: miligrama*  
*MJ: megajoule*  
*mm: milímetros*  
*N: comprimento astronômico do dia (horas)*  
*n: insolação diária (horas)*  
*N: ordem do canal principal*  
*N<sub>t</sub>: número total de canais*  
*°C: graus Celsius*  
*OH: diferença de nível no rio (m)*  
*P: fator de práticas conservacionistas (adm)*  
*P: perímetro (km)*  
*p-factor: porcentagem entre os dados medidos e a faixa de incerteza de predição de 95% (95PPU)*  
*p-value: significância da sensibilidade (valores próximos a zero indicam maior significância)*  
*Q: vazão (m<sup>3</sup>/s)*  
*Q<sub>sf</sub>: descarga sólida de fundo diária (ton/dia)*  
*Q<sub>ss</sub>: descarga sólida em suspensão diária (ton/dia)*  
*Q<sub>st</sub>: descarga sólida total diária (ton/dia)*  
*R<sub>a</sub>: radiação total recebida em uma superfície plana e horizontal, na ausência da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)*  
*r-factor: razão entre a largura da faixa de 95PPU e o desvio padrão dos dados observados*  
*RL: neossolo litólico*  
*RL<sub>d</sub>: neossolo litólico distrófico*  
*R<sub>r</sub>: relação de relevo (%)*  
*R<sub>s</sub>: radiação solar global recebida na superfície terrestre (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)*  
*S: parâmetro de retenção (capacidade máxima de armazenamento) do solo (mm)*  
*s: segundos*  
*SC: coeficiente de armazenamento*  
*sed: produção de sedimentos após evento de precipitação no dia (ton/dia)*  
*Sméd: declividade média da bacia (%)*  
*t: intervalo de tempo (dias)*  
*T: razão de textura (canais/km)*  
*ton: toneladas*  
*t-stat: medida da sensibilidade (maiores valores em módulo indicam maior sensibilidade)*  
*W: watt*

$y_i^{obs}$ : vazão observada

$y_i^{sim}$ : vazão simulada

$y_{med,obs}$ : média da vazão observada

$y_{med,sim}$ : média da vazão simulada

$Z$ : profundidade do solo (mm)

$\alpha$ : coeficiente técnico fixo

$\beta_i$ : coeficiente técnico atrelado à variável  $b_i$

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.2.1	Objetivos Específicos	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1	PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	6
2.1.1	Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico	6
2.1.2	Erosão e Perda do Solo	8
2.1.3	Hidrossedimentologia e Produção de Sedimentos	10
2.2	FUNDAMENTOS DA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA	12
2.2.1	Conceituação de Modelo, Sistema, Variável e Parâmetro	12
2.2.2	Classificação e Aplicações de Modelos	13
2.2.3	Principais Modelos Hidrossedimentológicos	17
2.3	FERRAMENTA DE MODELAGEM SWAT	21
2.3.1	Conceito, Fundamentação e Estrutura	21
2.3.2	Caracterização e Equacionamento	23
2.3.2.1	Fase Terrestre do Ciclo Hidrológico	24
2.3.2.2	Fase Aquática (Propagação na Rede Hídrica)	27
2.3.3	Principais Parâmetros do SWAT	29
2.3.4	Análise de Sensibilidade, Calibração, Verificação e Análise de Incerteza	31
2.3.4.1	Análise de Sensibilidade	32
2.3.4.2	Calibração do Modelo e Análise de Incertezas	35
2.3.4.3	Verificação do Modelo	40
2.3.5	Principais Aplicações do SWAT	41
2.3.5.1	Limitações/Obstáculos e Dificuldades da Aplicação do SWAT no Brasil	44
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>46</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	51
3.2.1	Sistema Computacional	51
3.2.2	Dados de Entrada do SWAT	51
3.3	MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA	53
3.3.1	Construção da Base de Dados (Espaciais e Alfanuméricos)	53
3.3.1.1	Base de Dados Espaciais	54
3.3.1.2	Base de Dados Alfanuméricos	60

<b>3.3.2</b>	<b>Parametrização dos Bancos de Dados de Entrada do SWAT .....</b>	<b>65</b>
3.3.2.1	Bancos de Dados de Solos (UserSoil) .....	65
3.3.2.2	Bancos de Dados de Uso do Solo (Crop) .....	67
3.3.2.3	Bancos de Dados Climáticos (WGEN) .....	69
<b>3.3.3</b>	<b>Delineamento da Bacia e Geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) ..</b>	<b>70</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Inserção dos Dados Climatológicos.....</b>	<b>73</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Aquecimento do Modelo e Simulação Inicial.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Análise de sensibilidade, Calibração e Verificação .....</b>	<b>76</b>
3.3.6.1	Análise de Sensibilidade.....	76
3.3.6.2	Calibração e Verificação .....	79
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>4.1</b>	<b>CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2</b>	<b>MODELAGEM INICIAL .....</b>	<b>85</b>
<b>4.3</b>	<b>MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO .....</b>	<b>89</b>
4.3.1	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros .....	90
4.3.2	Calibração do Modelo .....	91
4.3.3	Verificação do Modelo .....	96
4.3.4	Balanço Hídrico do Modelo Calibrado.....	99
<b>4.4</b>	<b>PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....</b>	<b>101</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>

*APÊNDICE A: Marco conceitual dos principais parâmetros do SWAT*

*APÊNDICE B: Dissertações e teses que utilizaram SWAT com foco em erosão e produção de sedimentos*

*APÊNDICE C: Artigos científicos que utilizaram SWAT com foco em erosão e produção de sedimentos*

*APÊNDICE D: Valores dos parâmetros físicos e químicos dos solos da bacia do Indaiá (UserSoil)*

*APÊNDICE E: Valores dos parâmetros de crescimento vegetal da bacia do Indaiá (Crop)*

*APÊNDICE F: Valores dos parâmetros estatísticos climáticos das estações utilizadas na bacia do Indaiá (WGEN)*

*APÊNDICE G: Valores de produção de sedimentos anual na bacia do Indaiá (por hru)*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O intemperismo é um fenômeno natural que altera física e quimicamente as rochas e seus minerais, tendo como resultado a formação dos solos. Seus principais fatores são: o clima, o relevo, a composição mineral das rochas, o tempo geológico e, a cobertura vegetal (CREPANI *et al.*, 2001; GUIMARÃES, 2019). Por consequência, a erosão é o desprendimento, deslocamento e arraste de partículas de solo e rocha ocasionado pela ação combinada da gravidade com água, vento, gelo ou organismos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). De acordo com Carvalho (2008), as partículas geradas (sedimentos) normalmente são deslocadas por enxurradas (escoamento superficial) até os rios, posteriormente são transportadas pelos cursos d'água e depositadas nas calhas de rios, lagos, reservatórios, e finalmente chegam no mar. Segundo o mesmo autor, a quantidade total de sedimentos erodida numa bacia hidrográfica é conhecida como erosão bruta ou erosão total (*gross soil erosion*); já a quantidade total de material erodida que consegue completar o percurso, desde a origem até um exutório (que também pode ser um ponto de controle ou de medição, tal como um reservatório ou posto fluviométrico), é conhecida como produção de sedimentos (*sediment yield*).

Sabe-se que a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são processos naturais que estão atrelados ao ciclo hidrológico e, de maneira geral, podem ser modificados e intensificados pela ação humana sobre o meio ambiente. Como consequência da aceleração e intensificação dos processos citados, observa-se geralmente: a redução da fertilidade e produtividade dos solos; a destruição de estradas, encostas e margens de rios; a degradação de ecossistemas terrestres e aquáticos; o assoreamento e a poluição de lagos e reservatórios; a diminuição do volume e da qualidade das águas. Estes efeitos podem causar prejuízos à biota, à geração de energia e ao abastecimento de água, aumentando o custo de produção e tratamento e, por fim, diminuir a qualidade de vida dos seres humanos (CARVALHO, 2008; ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2013; GUERRA; SILVA; BOTELHO, 2014; ISSAKA; ASHRAF, 2017).

Assim sendo, a caracterização, mensuração e avaliação da erosão do solo e, consequentemente, da produção de sedimentos são fundamentais na identificação de áreas críticas susceptíveis aos processos erosivos e hidrossedimentológicos, e na verificação da vida útil de reservatórios. Este tipo de análise pode também auxiliar na determinação de práticas adequadas de manejo e conservação do solo – conhecidas na língua inglesa como *BMPs (Best Management Practices* –

*Boas Práticas de Manejo*) – contribuindo assim para o planejamento conservacionista de bacias hidrográficas (OLIVEIRA *et al.*, 2011; CONCEIÇÃO, 2014; HIMANSHU *et al.*, 2019).

O entendimento destes processos é essencial em bacias hidrográficas com a presença de reservatórios de acumulação de água, uma vez que a deposição de sedimentos pode ocasionar assoreamento e poluição, comprometendo o uso dos mesmos. Estes lagos cumprem diversas funções tanto para o sistema elétrico quanto para os demais setores usuários dos recursos hídricos, tais como: controle de cheias; aumento de vazões mínimas em momentos de grande escassez; proteção da qualidade da água (possibilidade de liberar “ondas de cheia” para diluir eventuais concentrações de poluentes); e ampliação da área disponível para captação de água para abastecimento e usos múltiplos (NUNES, 2013; CARVALHO, 2015).

A construção de barramentos (represamentos) modifica o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, as taxas de transporte e deposição de sedimentos. Um exemplo disto é o rio São Francisco, onde foram implantados vários aproveitamentos hidroelétricos com a formação dos reservatórios de Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso, Moxotó e Xingó (ANA, 2012). Destes, apenas dois apresentam grande capacidade de acumulação (Três Marias e Sobradinho), os quais desempenham a importante função de regularização da vazão do rio São Francisco. Porém, por sua vez, apresentam grande potencial de retenção de sedimentos em suspensão e elevadas taxas de deposição (BANDEIRA *et al.*, 2013).

Neste contexto, Lima *et al.* (2001) realizaram uma avaliação do comportamento hidrossedimentológico da bacia do rio São Francisco por meio da análise do fluxo de sedimentos em suspensão. Para tanto, os autores utilizaram dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão de 48 estações hidrossedimentométricas sob gestão da ANEEL (*Agência Nacional de Energia Elétrica*). Como resultado, o estudo identificou que as sub-bacias dos rios Paraopeba e das Velhas, no Alto São Francisco, foram as que apresentaram maiores valores de produção de sedimentos e apontou para a necessidade de um aumento do número de estações de monitoramento hidrossedimentométrico bem como da taxa de amostragem, uma vez que geralmente são realizadas apenas quatro medições por ano de descarga sólida em suspensão (CARVALHO *et al.*, 2000a, 2000b).

Infelizmente é muito dispendioso e custoso monitorar os processos erosivos e hidrossedimentológicos em toda a bacia do rio São Francisco. Nesse sentido, Creech *et al.* (2015)

realizaram uma modelagem hidrossedimentológica com base na ferramenta *SWAT* (*Soil and Water Assessment Tool – Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água – tradução livre*) com o objetivo de entender melhor a extensão e a magnitude das cargas de sedimentos no canal de navegação do rio São Francisco em virtude de mudanças antrópicas nas sub-bacias. Verificaram, por meio de simulações de cenários no *SWAT*, que a taxa de deposição de sedimentos no rio São Francisco e principais afluentes aumentou em aproximadamente 20 vezes desde a pré-colonização Europeia da bacia (de aproximadamente 1,25 milhão para 23 milhões de toneladas por ano), o que possivelmente contribuiu para a formação de bancos de sedimentos no canal de navegação do rio São Francisco.

O trabalho de Creech *et al.* (2015), apesar de utilizar uma base de dados espacial pouco detalhada e genérica (1:1.000.000 ou menor), poucas estações fluviométricas (em torno de 17) e apenas uma estação sedimentométrica, conseguiu determinar que as bacias do Alto São Francisco, especialmente a do rio Indaiá, são as principais fontes de sedimentos, corroborando e confirmando o trabalho de Lima *et al.* (2001).

Estudos de hidrologia espacial realizados por Menezes (2013), Pinto (2013) e Pinto *et al.* (2014), para monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias, também demonstraram que a bacia do rio Indaiá é uma das principais geradoras de sedimentos do Alto São Francisco.

Diante do exposto, desenvolveu-se a seguinte hipótese: “*Se utilizarmos uma base dados espaciais de entrada, mais detalhada e robusta, e atributos parametrizados para a região, ou seja, para as condições ambientais e climáticas da área de estudo proposta, poderemos aprimorar o entendimento dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem na bacia do rio São Francisco, em uma escala temporal mensal*”.

Assim, escolheu-se a bacia hidrográfica do rio Indaiá, localizada na área do Alto São Francisco, como área de estudo para aplicação de uma modelagem hidrossedimentológica baseada no *SWAT*, em razão dos seguintes motivos:

- A bacia do Indaiá é um importante contribuinte do reservatório da *UHE Três Marias* (*Usina Hidrelétrica de Três Marias*), que por sua vez tem a significativa função de regularização da vazão do rio São Francisco. Dos afluentes do São Francisco, o rio Indaiá é o que está mais próximo do barramento;

- Possui uma longa série histórica de dados amostrais de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) levantados pela *CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais)* nos anos de 1974 a 2013;
- Por último, a bacia do Indaiá possui poucos estudos sobre erosão do solo e sedimentos, onde se destacam os seguintes trabalhos realizados na região: Carvalho (2001), Macêdo (2009), Menezes (2013), Pinto (2013) e Pinto *et al.* (2014).

Dos trabalhos citados, Carvalho (2001) realizou levantamento de campo e análises laboratoriais para quantificação dos sedimentos transportados pelo rio Indaiá; Macêdo (2009) utilizou modelos matemáticos de previsão de erosão qualitativos (*IPT e Campagnoli*) e quantitativos (*USLE, MUSLE e MMF*) para identificação de áreas-fonte potenciais de sedimentos e obtenção das taxas de perda de solo; já Menezes (2013), Pinto (2013) e Pinto *et al.* (2014), além de levantamento de campo utilizaram imagens de satélite para o monitoramento espacial e temporal do fluxo de sedimentos na bacia. Porém, nenhum destes trabalhos utilizaram o *SWAT* para modelagem da produção de sedimentos da bacia do rio Indaiá.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi analisar a produção de sedimentos gerada por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Indaiá, Alto São Francisco, no estado de Minas Gerais, no período de 1988 a 2017, por meio da utilização da ferramenta de modelagem *SWAT*.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Avaliar o desempenho do *SWAT* na simulação de variáveis hidrossedimentológicas (vazão e descarga sólida) em escala mensal por meio da calibração e verificação do modelo e análise de índices estatísticos de qualidade do ajuste;
- Determinar um modelo de simulação de vazões e cargas de sedimentos para a área de estudo proposta (bacia do rio Indaiá);
- Identificar áreas com maior propensão a processos erosivos na bacia do rio Indaiá a partir da utilização do modelo calibrado.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto da dissertação está estruturado em cinco capítulos, incluindo o Capítulo 1 (**INTRODUÇÃO**).

O Capítulo 2 (**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**) traz uma sucinta revisão da literatura sobre temas relacionados à modelagem hidrossedimentológica e, especificamente à ferramenta *SWAT* e suas aplicações, principalmente acerca de sua utilização em bacias hidrográficas brasileiras do Bioma Cerrado.

O Capítulo 3 (**MATERIAIS E MÉTODOS**) aborda quais foram os dados utilizados e como foram obtidos, abrange as etapas e os procedimentos empregados para a execução do trabalho e os programas necessários para desempenhar tais atividades.

O Capítulo 4 (**RESULTADOS E DISCUSSÕES**) apresenta os resultados obtidos para cada etapa desenvolvida, as respostas de saída da modelagem com o *SWAT* e uma análise desses resultados visando a compreensão dos processos representados pelo modelo e sua relação com o comportamento real da bacia.

O quinto e último Capítulo (**CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**) expõe as conclusões sobre o trabalho e apresenta algumas sugestões para a sua continuidade em uma oportunidade futura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo compreende o referencial teórico utilizado para embasar o conhecimento a respeito dos processos empregados para a realização dos objetivos propostos. Está dividido em 3 (três) itens:

- **2.1 Processos Hidrossedimentológicos em Bacias Hidrográficas** – aborda os processos hidrossedimentológicos atrelados ao ciclo hidrológico;
- **2.2 Fundamentos da Modelagem Hidrossedimentológica** – consiste em uma sucinta introdução à modelagem hidrossedimentológica, apresentando conceituação, classificação, aplicações e descrição dos principais aplicativos de modelagem existentes;
- **2.3 Ferramenta de Modelagem SWAT** – apresenta as especificações da ferramenta de modelagem *SWAT*, incluindo conceito, fundamentação, estrutura, equacionamento, procedimentos de modelagem e principais aplicações.

### 2.1 PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

#### 2.1.1 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico é o fenômeno dinâmico global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (RIGHETTO, 1998). Ele integra três partes do sistema que compõem a Terra: a atmosfera, onde é encontrado principalmente água no estado gasoso; a hidrosfera, representando a água na fase líquida ou sólida na superfície do planeta; e a litosfera, abrangendo todos os tipos de águas subterrâneas. Os principais componentes do ciclo hidrológico são: precipitação, evapotranspiração (evaporação e transpiração), condensação, detenção, escoamento superficial, infiltração, percolação da água no solo e nos aquíferos, escoamentos fluviais, drenagem e interações entre esses componentes (TUNDISI, 2003; TUCCI, 2012).

Segundo Paz (2004), de maneira simplificada, o ciclo hidrológico pode ser descrito da seguinte forma: ocorre evaporação da água dos oceanos e formação do vapor de água. Sob determinadas condições, o vapor precipita na forma de chuva, neve e granizo. Parte da precipitação não chega a atingir a superfície terrestre, sendo evaporada, enquanto boa parte da precipitação atinge diretamente a superfície de lagos e oceanos, evaporando uma parcela. Da precipitação que atinge a superfície terrestre, uma parte é interceptada pela cobertura vegetal, de onde parte evapora e parte acaba escorrendo até o solo. A precipitação que chega ao solo, tem parcela infiltrada subsuperficialmente, e desta, uma parte escoar até corpos d'água próximos, como rios e lagos,

enquanto uma parte percola, atingindo os aquíferos, que escoam lentamente até rios e lagos. Ainda quanto à parte da precipitação que atinge o solo, esta vai escoar superficialmente, sendo retida em depressões do solo, infiltrada, evaporada ou sendo absorvida pela vegetação. A vegetação que retém água das depressões do solo e infiltrações, elimina vapor d'água para a atmosfera por meio da evapotranspiração. A água que alcança os rios, seja por escoamento superficial, subsuperficial ou subterrâneo, ou mesmo precipitação direta, segue para lagos e oceanos, governada pela gravidade. Na **Figura 1** são apresentadas as principais etapas do ciclo hidrológico.

**Figura 1:** Esquemática do ciclo hidrológico



Fonte: USGS (United States Geological Survey).

O ciclo hidrológico, com todas as suas etapas, forma um sistema muito complexo e dinâmico. Porém, ele pode ser simplificado se os seus componentes forem categorizados em input, output e armazenamento, e assim, baseados no princípio de conservação de massas e na relação de continuidade, estudos de balanço hídrico em bacias hidrográficas podem ser realizados (BROOKS; FFOLIOTT; MAGNER, 2013).

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e

de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório. A bacia hidrográfica pode ser então considerada um ente sistêmico. É onde se realiza o balanço de entrada proveniente da chuva e saída de água através do exutório, o chamado balanço hídrico, permitindo que sejam delineadas bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos (TUCCI, 2012).

De acordo com Eilers (2004), os principais componentes do balanço hídrico são: (i) água total armazenada no solo e o déficit de água no solo; (ii) precipitação, escoamento superficial direto e infiltração; (iii) evapotranspiração potencial e evapotranspiração efetiva em função da disponibilidade de água no solo; (iv) o conceito de armazenamento temporário nas camadas superficiais do solo; e (v) a drenagem de água da zona de solo ou recarga potencial.

Nesse contexto, o balanço hídrico pode ser entendido como a computação das entradas e saídas de água do sistema, que neste caso é o próprio ciclo hidrológico, cujo resultado fornecerá a água disponível no sistema, ou seja, no solo, rios, lagoas, vegetação e oceanos. A principal utilização é para estimar parâmetros climáticos e, a partir deles, estabelecer comparações entre as condições predominantes em locais diferentes (TOMASSELLA; ROSSATO, 2005).

### **2.1.2 Erosão e Perda do Solo**

Erosão é o processo de desgaste, desprendimento, deslocamento, arraste e deposição de partículas de solo e rocha causado pela ação combinada de gravidade com água, vento ou outro agente ativo (CARVALHO, 2008; SHI *et al.*, 2012; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

A erosão do solo pode ocorrer de duas formas distintas, geológica (ou normal) e/ou acelerada (ou antrópica). Resumidamente, a primeira refere-se àquela oriunda da atividade geológica sobre a superfície terrestre, correspondendo a um processo natural, sem a interferência/intervenção do homem; já a segunda, seria aquela provocada pela ação humana, mas podendo também estar incluída nesta classificação a erosão provocada por catástrofes como, terremotos, enchentes e erupções vulcânicas (CAPECHE *et al.*, 2008; NEARING *et al.*, 2017).

A quantidade total de sedimentos que é erodida numa bacia hidrográfica, incluindo os sedimentos sólidos e dissolvidos, é conhecida como “*erosão bruta*” ou erosão total. Quando se refere apenas aos sedimentos sólidos é chamada de “*erosão efetiva*”. Já a quantidade total de material erodida

que consegue completar o percurso, desde a origem até um exutório (que também pode ser um ponto de controle ou de medição, tal como um reservatório ou posto fluviométrico), é conhecida como “*produção de sedimentos*” (CARVALHO, 2008).

De acordo com Carvalho (2008), os agentes erosivos (*Quadro 1*) são os elementos do meio físico que causam, ou afetam diretamente a erosão, sendo ativos e passivos. Os principais agentes ativos responsáveis pela erosão são: água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve e ação humana. Os principais agentes passivos são: topografia, gravidade, tipos de solo, cobertura vegetal, formações superficiais e práticas antrópicas.

**Quadro 1: Principais agentes erosivos e tipos de erosão**

<b>Agentes erosivos</b>	<b>Tipos de Erosão</b>
Eólica	De transporte pelo ar De transporte na superfície
Fluvial	Erosão de margem Erosão de leito
Hídrica	Erosão laminar Erosão por ravinas e sulcos Erosão por escoamento concentrado
Remoção de massa	Desprendimento de terra ou deslizamento Escorregamento superficial

*Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).*

Dentre todos os tipos de erosão existentes, a erosão hídrica e fluvial são as mais preocupantes na Hidrossedimentologia. A erosão do solo é um processo mecânico que envolve energia, e a energia necessária para desencadear o processo de erosão hídrica do solo é proveniente da água das chuvas e do escoamento superficial, especialmente a energia cinética do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo (CASSOL *et al.*, 2007). Segundo Oliveira *et al.* (2009), a erosão hídrica é caracterizada como uma das significativas formas de degradação ambiental, sendo influenciada por diversos fatores, tais como: característica do solo, topografia, uso e cobertura do solo e clima.

A degradação das bacias hidrográficas pela ação antrópica, associada aos fenômenos naturais de precipitação, como os verificados nas regiões tropicais, resulta em um aumento das quantidades de solo (sedimento) que chegam aos rios e reservatórios, que são muito maiores que aquelas produzidas em condições de equilíbrio natural. O conhecimento das relações entre o uso do solo e a erosão é essencial pois os sedimentos presentes nos cursos d'água são originados, em grande parte, da erosão da bacia hidrográfica, das margens e dos próprios leitos dos rios (PAIVA, 2001).

### 2.1.3 Hidrossedimentologia e Produção de Sedimentos

Hidrossedimentologia é o estudo dos processos relacionados à dinâmica da água e dos sedimentos no ciclo hidrológico, e as possíveis interações dessas partículas com o meio ambiente, analisando desde o desprendimento e arraste das partículas pelo escoamento superficial (*runoff*) até sua deposição e assoreamento em rios, lagos e reservatórios. O interesse por esta área é de grande relevância do ponto de vista social, econômico e ambiental, uma vez que a produção de sedimentos interfere direta e indiretamente nas relações bióticas e abióticas de um sistema hídrico (SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2007; VIERS; DUPRÉ; GAILLARDET, 2009).

Os sedimentos transportados pelos rios são oriundos de processos erosivos que ocorrem em suas vertentes, causados pela atuação dos agentes dinâmicos externos do processo de sedimentação, sendo estes a água, o vento, a gravidade, o gelo e os agentes biológicos. Estes sedimentos são encaminhados para áreas mais planas para a sua deposição, sendo que todos esses processos que envolvem o sedimento, são provenientes de fenômenos naturais que sempre ocorreram ao longo de tempos geológicos e que são responsáveis pela forma atual da superfície terrestre (CARVALHO, 2008).

Porém, mesmo fazendo parte de um processo natural, a sedimentação pode também ser intensificada pelas atividades antrópicas ocorridas no local, tais como agrícolas, construções civis, empreendimentos hídricos e mudança de uso do solo. Logo, o conhecimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é fundamental para aqueles envolvidos direta ou indiretamente na gestão dos recursos hídricos, pois fornece informações que fundamentam a tomada de decisões e subsidiam o planejamento e manejo integrado dos recursos naturais (EDWARDS; GLYSSON, 1999; VESTENA, 2009).

Assim, um dos principais problemas acerca do transporte e deposição de sedimentos, é sua influência nos empreendimentos hídricos (barragens, hidrelétricas, hidrovias), uma vez que esses interferem na funcionalidade e na vida útil destes (SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2007). Carvalho (2008) apresenta alguns outros problemas relacionados aos processos de sedimentação, listados no quadro (*Quadro 2*).

**Quadro 2: Problemas decorrentes do transporte e deposição de sedimentos**

<b>Ambientais</b>	<b>Sociais</b>	<b>Econômicos</b>
Os sedimentos em suspensão impedem a penetração da luz e do calor, reduzindo a atividade fotossintética necessário a salubridade dos rios.	Os sedimentos degradam a água para abastecimento e recreação. E reduzem a qualidade estética do curso d'água.	Os sedimentos em suspensão degradam o uso consuntivo da água, aumentando o custo do tratamento.
Diminuem a população de peixes nos rios, sobrevivendo os mais resistentes.	Podem provocar a redução das profundidades dos rios, prejudicando a navegação.	Podem provocar abrasão em turbinas, máquinas e comportas, quando as partículas se movem em alta velocidade, produzindo a redução de eficiência ou inutilização das peças.
Atuam como portadores de poluentes, tais como nutrientes químicos, inseticidas, herbicidas e metais pesados. Podendo também ser portador de vírus e bactérias	Podem elevar o nível de água, aumentando o risco de enchentes, danificando rodovias, propriedades rurais, urbanas e outros.	Podem provocar assoreamento nos recursos hídricos, reduzindo o volume de água e a vida útil do lago.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Mesmo havendo vários problemas relacionados à presença dos sedimentos, existem também alguns benefícios causados por esses, como a obtenção de cal e cimento, e fornecimento de matéria prima para a fabricação de tijolos e artefatos de barro. No quadro (**Quadro 3**) são expostos alguns outros exemplos de benefícios ao meio ambiente trazidos pelos sedimentos.

**Quadro 3: Benefícios decorrentes do transporte e deposição de sedimentos**

<b>Benefícios dos sedimentos ao meio ambiente</b>			
Permitem um meio no qual as reações químicas podem ocorrer em condições favoráveis.	Permitem um meio condutor de microrganismos ou matéria orgânica diversa que melhora a fauna fluvial e marinha.	Atuam como reductores de outros poluentes, melhorando dessa forma a purificação da água.	Formam uma camada fértil na parte superior do solo nos campos, várzeas ou área de inundação, devido à deposição em ocasião de enchentes.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Segundo Carvalho (2008), os sedimentos que chegam ao rio têm granulometria variada e terão transporte variado conforme as condições locais de escoamento. Esta variação é em função do tamanho, peso e forma da partícula. Os sedimentos ao serem transportados podem permanecer em suspensão ou no fundo do rio, ou podem saltar ou rolar ao longo do leito. As formas de transporte podem ser definidas como:

- Carga Sólida de Arrasto ou de Fundo (Qsf): são partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o fundo do leito do rio praticamente todo tempo.

- Carga Sólida Saltante: são partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas. O impulso inicial que arremessa uma partícula na correnteza pode ser devido ao impacto de uma na outra, o rolamento de uma por cima da outra ou o fluxo de água sobre a superfície curva de uma partícula, criando assim uma pressão negativa.
- Carga Sólida em Suspensão (Q<sub>ss</sub>): são as partículas que estão suportadas pelos componentes verticais da velocidade do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelos componentes horizontais destas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente acima do leito. O movimento da partícula em suspensão é mais complexo do que a do fundo do leito.

Recentemente o sensoriamento remoto vem sendo muito utilizado para estudar os processos hidrossedimentológicos, onde se destacam os trabalhos realizados no bioma Cerrado por: Menezes (2013), Pinto (2013), Roig *et al.* (2013), Pinto *et al.* (2014), Olivetti (2019), porém esbarram na limitação de trabalhar apenas na *zona eufótica* (camada superficial da coluna de água que é iluminada pela luz solar). O caminho atual é a integração entre os dados de sensoriamento remoto e os modelos de simulação hidrológica disponíveis (FAGUNDES (2018); FOTEH *et al.* (2018)).

## **2.2 FUNDAMENTOS DA MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA**

### **2.2.1 Conceituação de Modelo, Sistema, Variável e Parâmetro**

Um “*modelo*” pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, uma abstração, desenvolvido a partir da observação de dados concretos, e que auxilia no entendimento dos processos que envolvem esta realidade (RENNÓ; SOARES, 2000, 2003; FERNANDES, 2016).

Sendo assim, “*modelos hidrológicos*” são representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície ou subsuperfície terrestre, o que permite a simulação de processos físicos nas suas dimensões temporais e espaciais (PULLAR; SPRINGER, 2000). São ferramentas de análise capazes de entender, simular e representar o comportamento de bacias hidrográficas a partir do equacionamento dos processos hidrológicos que a envolvem; além disso permitem analisar o desempenho de práticas de manejo; bem como avaliar os riscos e benefícios advindos de diferentes tipos de uso e cobertura do solo por meio da previsão de cenários (SPRUILL; WORKMAN; TARABA, 2000; MORAES *et al.*, 2003; TUCCI, 2005).

Por sua vez, “*modelos hidrossedimentológicos*” são particularizações dos modelos hidrológicos, os quais são mais abrangentes. Um modelo hidrossedimentológico auxilia no entendimento do comportamento dinâmico dos fenômenos sedimentológicos por meio do equacionamento dos processos que envolvem a produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas. Logo, são modelos matemáticos de simulação formados por um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis (descrevem um fenômeno variável, ex: precipitação, vazão, carga de sedimentos) e parâmetros (caracterizam parte de um processo, equação, ex: albedo, condutividade hidráulica, declividade) (TUCCI, 2005; SANTOS; SRINIVASAN, 2012; BLAINSKI *et al.*, 2017; ZANIN; BONUMÁ; CORSEUIL, 2018).

Dooge (1968) define “*sistema*” como sendo qualquer estrutura, dispositivo, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num determinado tempo de referência se inter-relaciona com uma entrada, causa ou estímulo de matéria, energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de informação, energia ou matéria.

Tucci (2005) fornece algumas definições para melhor compreensão do sistema e do modelo que o representa. Trata-se dos conceitos de “*fenômeno*”, “*variável*” e “*parâmetro*”. Segundo o autor, fenômeno é um processo físico que produz alteração de estado no sistema como, por exemplo, a precipitação, a evaporação e a infiltração. Variável, por sua vez, é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno variando no espaço e no tempo como, por exemplo, a vazão que descreve o estado do escoamento. Já os parâmetros são valores que caracterizam o sistema, e que variam espacialmente como, por exemplo, a rugosidade de uma seção de um rio.

### **2.2.2 Classificação e Aplicações de Modelos**

Pela natureza variada dos modelos, desenvolvidos e aplicados com diferentes objetivos, há diversas tentativas de categorização. Considerações relacionadas à classificação de modelos de simulação hidrológica podem ser encontrados em: Vertessy *et al.* (1993), Collischonn (2001), Rennó e Soares (2000, 2003), Moreira (2005), Santos (2009), Tucci (2005, 2012); Marinho Filho *et al.* (2012), Fernandes (2016), e Almeida e Serra (2017). De acordo com estes autores os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos:

- **Pelo tipo de representação do sistema: modelos físicos ou matemáticos.** Os modelos físicos incluem tecnologias análogas e princípios de semelhança aplicados aos modelos de pequenas

escalas. Os modelos matemáticos representam o sistema com base em enunciados/proposições matemáticas.

- **Pelo tipo de variáveis utilizadas na modelagem: modelos estocásticos ou determinísticos.**

Chama-se modelo estocástico aquele em que pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório ou quando a série simulada pode ser gerada sinteticamente. Os modelos estocásticos partem da premissa de que a chance de ocorrência das variáveis é levada em consideração e o conceito de probabilidade é incorporado durante a confecção do modelo. Por outro lado, se a série simulada for uma sequência de anos históricos ou caso sejam negligenciados os conceitos de probabilidade, o modelo é dito determinístico. Os modelos determinísticos têm como principal característica a premissa de que os conceitos de probabilidade não são considerados durante a elaboração do modelo e a probabilidade de ocorrência das variáveis não é considerada, sendo realizada por outras leis, que não levam em conta análises probabilísticas.

- **Quanto ao tipo de relações entre as variáveis: modelos empíricos ou baseados em processos.**

Os modelos empíricos são embasados em observações. São modelos simples e úteis no dia a dia, porém limitados por não permitir a realização de simulações de mudanças em condições específicas (para os quais o modelo não previu), como grandes eventos pluviiais e mudança de uso do solo. Os modelos baseados em processos são mais complexos que os empíricos, pois buscam descrever diferentes processos que estão envolvidos em determinado fenômeno. Estes podem ser subdivididos em modelos conceituais e físicos. Os modelos conceituais fazem uso de equações empíricas, porém descrevem o sistema a partir das leis da física. Já os modelos de base física têm como princípio as equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos, e seus parâmetros possuem um significado físico e, por isso, podem ser simulados a partir de medidas reais.

- **Quanto à forma de representação dos dados: modelos contínuos ou discretos.**

Os modelos contínuos consideram a continuidade dos fenômenos que são contínuos no tempo (não discretos). Os modelos discretos consideram que as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos ou categorizados, de tempo ou passo, ao longo dos quais o modelo será executado.

- **Quanto à existência de relações espaciais: modelos pontuais ou distribuídos.**

Os modelos pontuais, também chamados de concentrados ou agregados, não consideram a variabilidade

espacial dos parâmetros no interior do sistema. Levam em conta que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada, ou seja, não possuem relação espacial. Os modelos distribuídos têm como principal característica a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis e parâmetros do modelo, ou seja, possuem relação espacial.

- **Quanto à existência de relação temporal: modelos estáticos ou dinâmicos.** Os modelos estáticos ou estacionários não possuem uma dimensão temporal explícita, ou seja, quando um conjunto de dados de entrada produz um resultado em um único passo ou tempo. Os modelos estacionários ou estáticos examinam os processos sem considerar o fator temporal, ou seja, os parâmetros não variam com o tempo. Já os modelos dinâmicos consideram que as variáveis podem possuir uma relação espacial e temporal explícitas com entradas e saídas que variam ao longo do tempo. Os modelos dinâmicos envolvem mudanças e interações ao longo do tempo, logo os parâmetros podem variar no tempo.
- **Quanto a sua finalidade: Modelos de *water budget* vs. preditivos:** Uma comparação importante é verificar se o modelo se propõe a prever as condições futuras utilizando informações sintéticas sobre as precipitações e condições da bacia de drenagem (modelos preditivos) ou pela verificação dos eventos históricos, (modelos *water budget*). Um modelo *water budget* é definido como um modelo ou um conjunto de relações que admitem o equilíbrio histórico de entradas, saídas e mudanças no armazenamento de um sistema em estudo.

Segundo Xavier (2009), uma das vantagens da utilização de modelos matemáticos está na possibilidade da elaboração de cenários, o que permite a alteração das configurações dos parâmetros de entrada do modelo para a obtenção de condições virtuais, levando a uma visualização antecipada de consequências futuras, causadas por determinados fatores hipoteticamente inseridos.

Outra importante vantagem da utilização de modelos, destacada por Machado, Vettorazzi e Xavier (2003), está associada a seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é muito menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fato tem maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica), além dos custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo.

Os modelos hidrológicos são essenciais para a predição e quantificação dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza, visto a impossibilidade de se quantificar diretamente tais fenômenos. Desse modo, caracterizam-se como ferramentas essenciais para o preenchimento de diversas lacunas de informações necessárias no planejamento e gestão dos recursos hídricos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

De acordo com Lou (2010), as principais aplicações da modelagem hidrológica são:

- **Análise de consistência e preenchimento de falhas:** devido à facilidade de operação e custo, é normal existirem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Portanto, através do modelo, é possível, após o ajuste, estender a série de vazão com base na precipitação. O modelo também é utilizado para analisar a consistência da curva-chave, dos níveis e precipitações observados, além de permitir a verificação de alterações no rio e na bacia.
- **Previsão de vazão:** o controle de cheia, a operação de obras hidráulicas, a navegação, entre outros, depende do conhecimento antecipado da ocorrência da vazão. Esse tipo de estimativa da vazão pode ser obtido com base na precipitação conhecida, na vazão de um posto de montante ou na correspondente combinação. As características da simulação para esse objetivo são diferentes das demais, no entanto, modelos semelhantes podem ser utilizados, mas com estruturas computacionais diferentes. O modelo de previsão em tempo atual deve buscar utilizar ao máximo as informações disponíveis no momento da previsão, atualizando parâmetros e/ou variáveis.
- **Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento:** conhecida a precipitação, e o risco de sua ocorrência, é possível estimar a vazão resultante para cenários de uso e modificação da bacia, visando ao dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema. Nesse caso, os modelos hidrológicos utilizados podem ter algumas limitações, quanto à simulação de certos cenários de desenvolvimento diferentes daquele do ajuste, como, por exemplo, a modificação do uso do solo.
- **Efeitos resultantes da modificação do uso do solo:** a análise do escoamento resultante da modificação do uso do solo é um problema complexo, que requer uma metodologia mais sofisticada que as utilizadas nas aplicações anteriores. Os modelos existentes para modificações do solo são, em sua maioria conceituais, possuem muitas formulações empíricas para

representar os processos e logo os parâmetros acabam se relacionando mais qualitativamente do que quantitativamente com a física da bacia. Mesmo nessas condições, os parâmetros englobam várias características da bacia, o que dificulta qualquer análise quanto ao resultado da modificação de qualquer característica da bacia. Isso ocorre, por exemplo, com o desmatamento de grandes áreas, com a urbanização acentuada da bacia, entre outros. Modelos que representam o processo físico em maior detalhe e com menor empirismo, apresentam sérias limitações devido à heterogeneidade da bacia.

### **2.2.3 Principais Modelos Hidrossedimentológicos**

Como dito anteriormente, modelos hidrossedimentológicos são modelos hidrológicos capazes de representar os processos sedimentológicos por meio de equações matemáticas que reproduzem os efeitos de agentes ambientais como clima, solo, topografia e uso e cobertura do solo. Tais modelos foram desenvolvidos tendo como fundamento a *USLE* (*Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo*).

A *USLE* é uma equação empírica desenvolvida em 1954 pelo *USDA* (*United States Department of Agriculture – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos*), a partir da adaptação de algumas equações desenvolvidas na década de 1940 para as condições dos solos dos *EUA* (*Estados Unidos da América*). Posteriormente foi revisada e sistematizada por Wischmeier e Smith (1965, 1978). Essa equação, de base empírica, não leva em consideração, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte de sedimentos. Na *USLE* são apenas discriminadas as significâncias dos diferentes fatores que regem o processo erosivo, dentre os quais estão incluídos precipitação, comprimento da encosta/vertente, declividade da encosta/vertente, erodibilidade do solo, cultivo (uso do solo) e as práticas agrícolas (AMORIM *et al.*, 2009; ALEWELL *et al.*, 2019).

Williams (1975) apresentou uma modificação da *USLE*, a denominada *MUSLE* (*Modified Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo Modificada*), utilizada na estimativa da contribuição dos sedimentos na escala de bacias hidrográficas, por meio de eventos individuais de chuva. Consiste em um modelo empírico, cujo fator erosividade da chuva, utilizado na *USLE*, é substituído pelo fator de escoamento superficial, permitindo estimar a produção de sedimentos no exutório em decorrência de um evento chuvoso (SADEGHI; MIZUYAMA; VANGAH, 2007; ADEGEDE; MBAJIORGU, 2019).

Novas pesquisas continuaram sendo realizadas com o intuito de melhorar as estimativas das perdas de solo pela utilização da *USLE*, e após detalhada revisão dessas pesquisas, resultou no desenvolvimento da *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation – Equação Universal de Perda de Solo Revisada*). Este modelo empírico/conceitual desenvolvido por Renard *et al.* (1997), manteve a estrutura original do modelo da *USLE*, mas modificou as metodologias de determinação dos fatores que a compõe, ao fazer uso de novos algoritmos para calcular o comprimento da vertente e a inclinação da vertente (declividade), o chamado fator topográfico *LS* (*slope Length and slope Steepness fator*), além de considerar a sazonalidade das chuvas anuais o que permite considerar a variabilidade do fator de erodibilidade para o período simulado (AMORIM *et al.*, 2009; MAURY *et al.*, 2019).

De acordo com Hajigholizadeh, Melesse e Fuentes (2018), vários modelos hidrossedimentológicos foram desenvolvidos a partir da *USLE*. A seguir, são apresentados os principais modelos existentes, listados em ordem alfabética:

***AGNPS*** (*Agricultural Non Point Source Pollution Model – Modelo de Fonte Difusa Para a Poluição na Agricultura*), foi delineado por Young *et al.* (1989), e constitui-se em um modelo conceitual e distribuído, acoplado a um Sistema de Informação Geográfica, desenvolvido para avaliar práticas relacionadas ao manejo do solo pela agricultura. O modelo simula um único evento (não contínuo) de precipitação em bacias de grande porte, e os principais produtos do modelo são o transporte de sedimentos e a qualidade das águas, incluindo a demanda de nitrogênio, fósforo e oxigênio. O escoamento é dado através do método da curva-número e a produção de sedimentos a partir da *MUSLE* (SOUTO; CRESTANA, 2000; NAIK; KUMAR; DESHMUKH, 2018).

***ANSWERS*** (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – Simulação de Resposta para Fonte de Área Difusa no Ambiente de Bacia Hidrográfica*), foi apresentado por Beasley, Huggins e Monke (1980), sendo um modelo distribuído elaborado para simular o comportamento hidrossedimentológico de sub-bacias de drenagem, tendo a agricultura como principal categoria de uso do solo durante e imediatamente após um evento de precipitação (SINGH; TIWARI; MAL, 2006).

***EUROSEM*** (*European Soil Erosion Model – Modelo de Erosão do Solo Europeu*), foi apresentado por Morgan *et al.* (1998), e analisa eventos únicos, com base em processos, com a finalidade de prever a erosão hídrica em parcelas de campo e pequenas sub-bacias. É um modelo de predição

da erosão, onde por meio da Equação do Balanço de Massa é capaz de computar o transporte, a erosão e a deposição dos sedimentos sobre a superfície (SMETS *et al.*, 2011; OBETA; ADEWUMI, 2013).

**KINEROS** (*Kinematic Runoff and Erosion Model – Modelo de Erosão e de Escoamento Superficial Cinemático*), foi apresentado por Woolhiser, Smith e Goodrich (1990), que incorporaram ao modelo hidrológico de Rovey, Woolhiser e Smith (1977) componentes de erosão, transporte e deposição para pequenas bacias urbanas e rurais. O **KINEROS** é um modelo de eventos, distribuído, não linear, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento, cujas equações diferenciais se orientam pelo método das diferenças finitas. O modelo simula parâmetros hidrossedimentológicos para um único evento (não contínuo) de precipitação e avalia os efeitos das práticas de manejo sobre a erosão e produção de sedimentos. O escoamento superficial é calculado pelo método da propagação de cheias, a desagregação pelo impacto da gota da chuva, enquanto o transporte de sedimentos e a deposição são determinados com base na capacidade de transporte de sedimentos. Nesse modelo, a equação geral utilizada para descrever a dinâmica dos sedimentos em qualquer ponto ao longo do percurso do fluxo superficial é a Equação do Balanço de Massa (PAIVA; SILVA; SANTOS, 2005; TAJBAKHSI *et al.*, 2018).

**LISEM** (*Limburg Soil Erosion Model – Modelo de Erosão do Solo de Limburg*), foi desenvolvido por De Roo *et al.* (1996a, 1996b), sendo um modelo de base física, distribuído, aplicado para simulações de erosão, transporte e deposição de sedimentos durante e imediatamente após um evento chuvoso. O modelo simula o escoamento superficial direto e o transporte de sedimentos após um evento de precipitação, gerando, além dos dados de perdas de solo e deposição, mapas pontuais dos locais com maior suscetibilidade aos processos erosivos, sendo uma importante ferramenta de estudo de planejamento de conservação do solo (BARROS *et al.*, 2014; GRUM *et al.*, 2017).

**WEPP** (*Water Erosion Prediction Project – Projeto de Predição da Erosão Hídrica*), é resultado de um esforço multidisciplinar, iniciado na metade da década de 1980, envolvendo pesquisadores de várias agências e universidades americanas. Apresentado por Nearing *et al.* (1989), é um modelo de base física e contínuo para ser aplicado às grandes bacias. Baseia-se nos fundamentos das teorias de infiltração, física do solo, fitotecnia, hidráulica e mecânica da erosão. Estima as distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição na vertente ou em cada ponto dela, tanto em nível diário, quanto mensal ou anual. Além da opção de simulação contínua, o modelo

pode também ser usado na opção evento a evento. Este modelo foi proposto para a escala de sub-bacia, representando um exemplo da nova geração de modelagem sobre erosão dos solos, podendo ser rodado como modelo de simulação contínua e/ou sobre a base de precipitação individualizada. O modelo ainda inclui a geração de precipitação estocástica de erosão, escoamento superficial, percolação, entre outros fatores (FLANAGAN; GILLEY; FRANTI, 2007; BROOKS *et al.*, 2016).

*WESP (Watershed Erosion Simulation Program – Programa de Simulação da Erosão em Bacias Hidrográficas)*, desenvolvido por Lopes (1987), é um modelo de base física, distribuído e contínuo aplicado, em geral, para pequenas bacias, com o intuito de fornecer subsídios para um melhor entendimento dos processos de escoamento superficial e erosão do solo. Considera a erosão por meio do impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial, sendo estes fatores considerados não permanentes e variados. É capaz de prever mudanças de topografia, superfície de rugosidade, propriedades do solo e a geometria dos canais de fluxo. Nele o fluxo superficial é considerado variado e unidimensional, cada plano é representado por valores médios do comprimento, largura, inclinação e rugosidade, representando o fluxo por cada zona do solo. (SRINIVASAN; GALVÃO, 1995; SILVA; SANTOS; SANTOS, 2018).

*SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água)*, é um modelo de base física, de parâmetro semi-distribuído e contínuo, desenvolvido para prever o efeito, a longo prazo, das práticas de uso e manejo do solo sobre a qualidade da água, produção de sedimentos e carga de poluentes agrícolas em bacias hidrográficas complexas com variados solos e condições de uso da terra (ARNOLD *et al.*, 1998; NEITSCH *et al.*, 2011). A produção de sedimentos é calculada no *SWAT* aplicando a *MUSLE*. Escolheu-se esta ferramenta de modelagem para ser utilizada neste trabalho devido a sua integração com as ferramentas de *SIG (Sistemas de Informações Geográficas)* e sua farta documentação e biblioteca disponível no site oficial (<http://swat.tamu.edu/>).

Em seguida são apresentados em maiores detalhes as especificações do *SWAT*, incluindo conceito, fundamentação, estrutura, equacionamento, procedimentos de modelagem, e principais aplicações.

## 2.3 FERRAMENTA DE MODELAGEM SWAT

### 2.3.1 Conceito, Fundamentação e Estrutura

O *SWAT* é uma ferramenta de modelagem desenvolvido pelo *USDA/ARS (Agricultural Research Service of United States Department of Agriculture – Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)* em parceria com a *TAMU (Texas A&M University – Universidade Agrícola e Mecânica do Texas)*.

Foi criado para permitir a simulação de vários processos físicos na escala de bacia hidrográfica, com o intuito de prever e avaliar os efeitos/impactos causados pelas ações antrópicas (alterações do uso e cobertura do solo) sobre os recursos hídricos de bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas (ciclo hidrológico, produção de sedimentos e qualidade da água), possibilitando a obtenção de prognósticos acerca de cada uma dessas situações por meio da geração de cenários. Ou seja, o modelo trabalha principalmente com parâmetros relacionados ao solo e ao sistema hidrológico da região de estudo. O *SWAT* simula os processos de forma sequencial dentro do sistema físico, num intervalo de tempo, e fornece séries temporais de saída do modelo (ARNOLD *et al.*, 1998; GASSMAN *et al.*, 2007; NEITSCH *et al.*, 2011; ARNOLD *et al.* 2012a, 2012b).

Segundo Neitsch *et al.* (2011), para atender a esses propósitos o *SWAT* tem as seguintes características:

- Possui base física: o modelo requer dados e parametrização sobre clima, relevo, solo, uso e cobertura presentes na bacia;
- É semi-distribuído: que possibilita a divisão da bacia em sub-bacias e essas em *HRUs (Hydrologic Response Units – Unidades de Resposta Hidrológica)*, a fim de considerar a variação espacial das características hidrológicas;
- É computacionalmente eficiente: sendo possível simular longos períodos, a passo diário ou mensal, em bacias de diferentes escalas com grande variedade de usos e manejos.

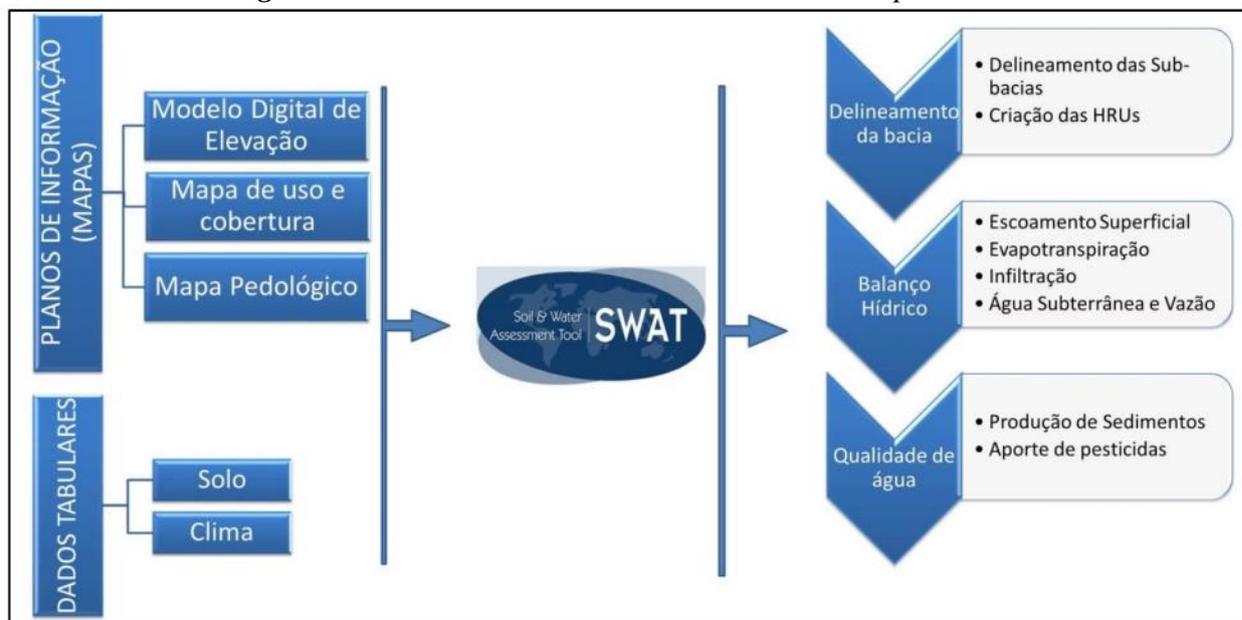
O *SWAT*, devido a sua base conceitual, exige informações precisas da bacia estudada, requerendo vários dados de entrada relacionados com as características físicas da bacia, tais como informações sobre propriedades do solo, topografia, vegetação e uso e cobertura do solo, além de dados climáticos. De acordo com Arnold *et al.* (2012a), os principais dados de entrada do *SWAT*, são:

- Dados Topográficos/Relevo: *MDE (Modelo Digital de Elevação)*;

- Dados de Solo: Mapa Pedológico;
- Dados de Uso: Mapa de Uso e Cobertura do Solo;
- Dados Climáticos: dados diários de precipitação, temperatura máxima/mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar;
- Parâmetros de Solos: propriedades físicas e químicas dos solos;
- Parâmetros de Uso/Cobertura do Solo e de Vegetação: dados de espécies vegetais, crescimento vegetal, índice foliar, fator de uso e manejo do solo ( $C_{USLE}$ ), entre outros.

A **Figura 2** ilustra os dados necessários (Mapas e Dados Tabulares) para o funcionamento do *SWAT* e os processos existentes (Delineamento da Bacia, Balanço Hídrico e Qualidade da Água).

**Figura 2:** Dados de entrada no *SWAT* e resumo de processos



Fonte: Carvalho (2014).

Por ser semi-distribuído, o *SWAT* procura representar a variabilidade espacial da bacia hidrográfica por meio de diferentes níveis de discretização do espaço, possibilitando dividir a bacia em várias sub-bacias, e estas em áreas ainda menores, chamadas de *HRUs* (*Hydrologic Response Units – Unidades de Resposta Hidrológica*). Essas unidades representam combinações de características comuns de solo, uso do solo e declividade dentro de cada sub-bacia, fornecendo uma descrição física melhor das unidades homogêneas, onde parte dos processos são calculados (ARNOLD *et al.*, 1998, 2012a; GASSMAN *et al.*, 2007).

O *SWAT* é uma ferramenta que funciona acoplada a um Sistema de Informações Geográficas chamado *ArcGIS*, por meio da interface *ArcSWAT*. Esta interface 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, solos e uso do solo. O processamento do Modelo Digital de Elevação permite a delimitação da bacia, das sub-bacias e das *HRUs*.

A modelagem é realizada no *ArcSWAT* de acordo com as seguintes etapas: primeiramente, o programa faz o delineamento da área de interesse. Essa etapa utiliza ferramentas do próprio *ArcGIS* para realizar os processamentos com base no Modelo Digital de Elevação fornecido. Os produtos gerados nessa etapa são a demarcação da área da bacia, divisão em sub-bacias e delimitação dos cursos d'água. Após, tendo o usuário definido as classes de declividade e inserido os mapas de pedologia e uso do solo, o modelo delimitará as *HRUs*. Em seguida, inicia-se a simulação hidrológica propriamente dita: utilizando informações de clima, de manejo e das características da área da bacia, o modelo calcula os fluxos de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticida de cada *HRU* por unidade de área. Na sequência esses resultados são agregados para computar o que foi gerado pelas sub-bacias, de acordo com as frações de *HRU* existentes. Em seguida, as respostas geradas pelas sub-bacias são direcionadas para as calhas dos rios de acordo com a rede hídrica existente (ARNOLD *et al.*, 1998).

### **2.3.2 Caracterização e Equacionamento**

Arnold *et al.* (1998) comenta que os principais componentes do *SWAT* são hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, agroquímicos e manejo do solo. Segundo Machado e Vettorazzi (2003), o ciclo hidrossedimentológico é modelado por meio de diversas sub-rotinas que simulam os processos de escoamento superficial e subsuperficial, infiltração, evaporação, evapotranspiração, fluxo lateral, fluxo de base, fluxo de retorno do aquífero raso, percolação e produção de sedimentos.

A concepção utilizada pelo *SWAT* distingue os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica em duas partes. Na primeira parte, estão aqueles que pertencem à fase terrestre do ciclo hidrológico. Nessa fase são definidas as quantidades de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticidas que serão carregadas para a calha principal do rio em cada sub-bacia. Nesta fase é quantificado o escoamento superficial, evapotranspiração real e potencial, deslocamento da água pelas camadas do solo, fluxo de base, níveis de erosão, entre outros. Na segunda parte, a chamada

fase aquática, estão aqueles processos que se referem ao movimento da água, sedimentos, pesticidas, nutrientes, através da rede hídrica, do ponto de lançamento até o exutório da bacia (ARNOLD *et al.*, 1998; NEITSCH *et al.*, 2011).

Todas as informações constantes dos itens 2.3.2.1 e 2.3.2.2 a seguir foram retiradas do manual do SWAT elaborado por Neitsch *et al.* (2011) e, por vezes, complementadas com informações de outros autores como Uzeika (2009), Silva (2010), Carvalho (2014) e Nunes (2018).

### 2.3.2.1 Fase Terrestre do Ciclo Hidrológico

#### Equação do Balanço Hídrico

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

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

Em que:  $SW_t$  é quantidade de água no solo no fim do dia (mm);  $SW_0$  é quantidade de água no início do dia (mm);  $t$  é o intervalo de tempo (dias);  $R_{day}$  é a precipitação no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $E_a$  é a evaporação no dia  $i$  (mm);  $w_{seep}$  é a percolação (quantidade de água que entrou na zona vadosa) no dia  $i$  (mm); e  $Q_{gw}$  é o fluxo de retorno (quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo) no dia  $i$  (mm).

#### Escoamento Superficial

A determinação do volume do escoamento superficial diário é definida no modelo SWAT para cada sub-bacia utilizando o Método CN (Curve Number- Curva Número) do SCS (Soil Conservation Service – Serviço de Conservação do Solo):

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

Em que:  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $R_{day}$  é a precipitação no dia  $i$  (mm);  $S$  é o parâmetro de retenção (capacidade máxima de armazenamento) do solo (mm);  $I_a$  é a condição antecedente de umidade que inclui o armazenamento na superfície, interceptação e infiltração antes do escoamento superficial (mm).

O parâmetro de retenção  $S$ , que representa principalmente a infiltração, varia espacialmente de acordo com o solo, declividade, uso do solo e mudanças na quantidade de água neste. O parâmetro de retenção é definido como:

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

Em que:  $CN$  é o valor de curva-número para o dia, que corresponde à capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo. O valor de  $CN$  é diretamente proporcional ao escoamento superficial e é atribuído em função da capacidade de infiltração do solo e da cobertura.

O SWAT insere um recurso de armazenamento do escoamento superficial com o intuito de simular seu retardamento até o canal principal. Já que o escoamento superficial é calculado, o volume de água que chega ao canal principal é dado pela seguinte equação:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{arm,i-1}) \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{SURLAG}{t_{conc}}\right) \right] \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo que:  $Q_{surf}$  é a quantidade de água que chega ao canal principal por escoamento superficial (mm);  $Q'_{surf}$  é a quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm);  $Q_{arm,i-1}$  é a quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm);  $SURLAG$  é o coeficiente de atraso do escoamento superficial (horas); e  $t_{conc}$  é o tempo de concentração (horas).

### Evapotranspiração

Existe uma diversidade de métodos para se calcular a  $PET$  (Potential Evapotranspiration – Evapotranspiração Potencial), porém o SWAT disponibiliza três métodos específicos, que são: (1) Penman-Monteith (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965), (2) Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972), e (3) Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1985).

Logo que a  $PET$  é determinada, o modelo trata de calcular a evapotranspiração real. O SWAT inicialmente calcula a evaporação de toda a chuva interceptada pela cobertura vegetal (dossel). Em seguida, calcula a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de evaporação/sublimação do solo.

## Armazenamento na Cobertura Vegetal

Entre as variáveis que influenciam de forma importante os processos de mudança da precipitação, podemos destacar a cobertura vegetal que tem a capacidade de reduzir a quantidade de água que cai sobre a superfície e diminuir o impacto das gotas da chuva sobre os solos.

Para se calcular a quantidade máxima de água que pode ser retida na copa, é necessário o índice de área foliar, dado pela seguinte equação:

$$COP_{dia} = COP_{mx} \frac{IAF}{IAF_{mx}} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo que:  $COP_{dia}$  é a quantidade máxima de água que pode ser armazenada na copa em um dado dia;  $COP_{mx}$  é a quantidade máxima de água armazenada na copa quando está completamente desenvolvida;  $IAF$  é o índice de área foliar para um determinado dia; e  $IAF_{mx}$  é o índice de área foliar máximo quando do completo desenvolvimento do vegetal.

## Evaporação do Solo

Para se estimar a quantidade de água evaporada do solo o modelo usa uma função exponencial, levando em consideração a profundidade do solo e a quantidade de água existente, dado pela seguinte equação:

$$E_{solo,z} = E_z^n \times \frac{Z}{(Z + \exp(2,374 + 0,00713 \times Z))} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:  $E_{solo,z}$  é a demanda evaporativa na profundidade (mm);  $E_z$  é a evaporação máxima do solo para o dia (mm); e  $Z$  é a profundidade do solo (mm).

## Erosão do Solo e Sedimentos

A erosão causada pelo escoamento superficial é calculada pela *MUSLE* (WILLIAMS, 1975), na qual o fator de erosividade da chuva da *USLE* (WISCHMEIER; SMITH, 1965, 1978) foi substituída por um fator de escoamento superficial. Para o cálculo da produção de sedimentos o *SWAT* utiliza a seguinte equação:

$$sed = 1,18 \times (Q_{suf} \times q_{pico} \times area_{hru})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:  $sed$  é a produção de sedimentos após evento de precipitação no dia (ton/dia);  $Q_{suf}$  é o escoamento superficial (mm/ha);  $q_{pico}$  é a vazão de pico do escoamento ( $m^3/s$ );  $area_{hu}$  é a área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha);  $K$  é a erodibilidade do solo [ $(0,013 \text{ ton } m^2 \text{ hr}) / (m^3 \text{ ton } cm)$ ];  $C$  é o fator de uso e manejo do solo (adimensional);  $LS$  é o fator topográfico (adimensional);  $P$  é o fator de práticas conservacionistas (adimensional);  $CFRG$  é o fator de fragmentação esparsa (adimensional).

### Vazão de Pico

A vazão de pico é a vazão máxima que aconteceu durante um evento chuvoso. A mesma é um indicador da intensidade do processo erosivo usado para calcular a perda de sedimentos. A vazão de pico no modelo SWAT é calculada através do Método Racional Modificado:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{suf} \times A}{3,6 \times t_{conc}} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo que:  $q_{pico}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $\alpha_{tc}$  é a fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração da bacia (adimensional);  $Q_{suf}$  é o escoamento superficial (mm);  $A$  é a área da sub-bacia ( $km^2$ );  $t_{conc}$  é o tempo de concentração da sub-bacia (hr).

#### 2.3.2.2 Fase Aquática (Propagação na Rede Hídrica)

##### Propagação da Vazão Líquida no Canal

O SWAT realiza a propagação da água pelo método de armazenamento variável desenvolvido por Williams (1969). O modelo necessita de dados como: comprimento, declividade, profundidade, declividade lateral e  $n$  (coeficiente de rugosidade de Manning para o curso d'água ( $m^{-1/3} \cdot s$ )).

Para calcular a vazão e a velocidade é utilizado a equação de Manning e o tempo de propagação, calculado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade, supondo que o canal seja de seção trapezoidal.

Levando em conta a equação da continuidade, o volume armazenado em um trecho para um intervalo de tempo estabelecido, é dado pela seguinte equação:

$$V_{arm} = V_{ent} - V_{saida} \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo que:  $V_{arm}$  é o volume armazenado no trecho ( $m^3$ );  $V_{ent}$  é o volume de entrada no trecho ( $m^3$ ); e  $V_{saída}$  é o volume de saída no trecho ( $m^3$ ).

Assim, utilizando o coeficiente de armazenamento, pode-se calcular o volume de água que sai do trecho em um determinado intervalo de tempo, por meio da equação:

$$V_{saída,2} = SC (V_{in} + V_{arm,1}) \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:  $V_{saída,2}$  é o volume que sai do trecho no fim do intervalo de tempo ( $m^3$ );  $SC$  é o coeficiente de armazenamento;  $V_{in}$  é o volume de água que entra no início do intervalo de tempo ( $m^3$ ); e  $V_{arm,1}$  é o volume armazenado no início do intervalo de tempo ( $m^3$ ).

### Propagação da Vazão Sólida no Canal

O transporte de sedimento na rede de drenagem ocorre em função de dois processos, deposição e degradação, que ocorrem simultaneamente no canal. A quantidade máxima de sedimentos que pode ser transportada de um segmento do canal é função da velocidade de pico do canal, calculada pela equação:

$$v_{ch,pk} = \frac{q_{ch,pk}}{A_{ch}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:  $v_{ch,pk}$  é a velocidade de pico do canal ( $m/s$ );  $q_{ch,pk}$  é a vazão ( $m^3/s$ ), e  $A_{ch}$  é a área da seção do canal ( $m^2$ ).

A quantidade máxima de sedimentos que pode ser transportada de um segmento do canal é calculada por:

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} \times v_{ch,pk}^{spexp} \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo que:  $conc_{sed,ch,mx}$  é a concentração máxima de sedimentos que pode ser transportado pela água ( $ton/m^3$  ou  $kg/L$ );  $v_{ch,pk}$  é velocidade de pico ( $m/s$ );  $c_{sp}$  e  $spexp$  são coeficientes de ajuste, variando entre 0,0001 a 0,01 e entre 1 a 2.

A concentração máxima  $conc_{sed,ch,mx}$  é comparada com a concentração inicial de sedimento no canal  $conc_{sed,ch,i}$ . Se a  $conc_{sed,ch,i}$  for maior que a  $conc_{sed,ch,mx}$  calculada, a deposição é o processo dominante e o total de sedimento depositado é dado por:

$$sed_{dep} = (conc_{sed,ch,i} - conc_{sed,ch,mx}) \times V_{ch} \quad \text{(Equação 13)}$$

Sendo que:  $sed_{dep}$  é a quantidade total de sedimento depositado (ton);  $conc_{sed,ch,i}$  é a concentração de sedimentos no início do intervalo de tempo (ton/m<sup>3</sup> ou kg/L);  $V_{ch}$  é o volume de água (m<sup>3</sup>).

Se a  $conc_{sed,ch,i}$  for menor que a  $conc_{sed,ch,mx}$  calculada, o processo dominante é a desagregação de sedimentos do canal, calculada pela equação:

$$sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) \times V_{ch} \times K_{ch} \times C_{ch} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde:  $sed_{deg}$  é o total de sedimento degradado do canal (ton);  $K_{ch}$  é o fator de erodibilidade do canal (adm); e  $C_{ch}$  é o fator de cobertura do canal (adm).

Após o cálculo de sedimento depositado e degradado, é determinado o total de sedimento suspenso no canal:

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad \text{(Equação 15)}$$

Sendo que:  $sed_{ch}$  é o total de sedimento suspenso no canal (ton); e  $sed_{ch,i}$  quantidade de sedimento inicial no canal (ton).

O total de sedimento transportado para fora da seção do canal é calculado pela equação:

$$sed_{out} = sed_{ch} \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad \text{(Equação 16)}$$

Em que:  $sed_{out}$  é o total de sedimentos transportado para fora da seção (ton);  $V_{out}$  é o volume de água saído no espaço de tempo (m<sup>3</sup>);  $V_{ch}$  é o volume de água no segmento do canal (m<sup>3</sup>).

### 2.3.3 Principais Parâmetros do SWAT

A identificação e seleção dos parâmetros mais influentes (sensíveis) no processo de simulação é um procedimento inicial importante para a análise de desempenho do modelo, pois racionaliza e otimiza os processamentos realizados na modelagem. O resultado disso se reflete, especialmente, na etapa de calibração, em que a identificação desses parâmetros é muito importante para o bom ajuste dos valores simulados aos valores medidos (SILVA, 2010).

Os parâmetros do *SWAT* utilizados neste trabalho para a simulação da vazão e da descarga sólida total de sedimentos, com seus intervalos de variação padrão (default) e os processos que representam são mostrados nos **Quadro 4**. Uma breve discussão sobre estes parâmetros e suas funções nos cálculos dos processos simulados, baseada em Silva (2010), é apresentada no **Apêndice A**.

**Quadro 4:** Parâmetros do *SWAT* para simulação da vazão<sup>1</sup> e da carga de sedimentos<sup>2</sup>

Processo	Parâmetro	Limite inferior	Limite superior	Unidades
Água no solo	SOL_AWC	0,0	1,0	mm H <sub>2</sub> O/ mm solo
	SOL_K	0,0	2.000,0	mm/hr
Água subterrânea	ALPHA_BF	0,0	1,0	dias
	GW_DELAY	0,0	500	dias
	GWHT	0,0	25	m
	GW_REVAP	0,02	0,2	adm
	GWQMN	0,0	5.000,0	mm
	REVAPMN	0,0	500,0	mm
	RCHRG_DP	0,0	1,0	mm
	SHALLST	0,0	5.000,0	mm
Escoamento superficial	CH_N2	0,0	0,3	m <sup>-1/3</sup> .s
	CN2	0,0	100	adm
	SURLAG	0,05	24	adm
Evapo-transpiração	ESCO	0,0	1,0	adm
Perda de água por transmissão	CH_K2	0,0	500	mm/hr
Produção de sedimentos	ADJ_PKR	0,5	2,0	adm
	CH_COV1	0,0	1,0	adm
	CH_COV2	0,0	1,0	adm
	LAT_SED	0,0	5.000,0	mg/L
	PRF	0,0	2,0	adm
	SLSUBBSN	10	150	m
	SPCON	0,0001	0,01	adm
	SPEXP	1,0	1,5	adm
	USLE_C	0,0	0,5	adm
	USLE_K	0,0	0,65	0,013 (ton m <sup>2</sup> hr)/ (m <sup>3</sup> ton cm)
USLE_P	0,0	1,0	adm	

Fonte: Adaptado de Silva (2010).

<sup>1</sup> ALPHA\_BF = Constante de recessão do fluxo de base (dias); CH\_K2 = Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/hr); CH\_N2 = Coeficiente de Manning para o canal principal (m<sup>-1/3</sup>.s); CN2 = Curva Número para a condição de umidade II (adm); ESCO = Coeficiente de compensação da evaporação do solo (adm); GW\_DELAY = Intervalo de tempo de atraso para recarga do aquífero (dias); GWHT = Altura inicial do aquífero (metros); GW\_REVAP = Coeficiente "revap" da água subterrânea (adm); GWQMN = Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm); RCHRG\_DP = Coeficiente de percolação do aquífero (mm); REVAPMN = Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do "revap" (mm); SHALLST = Quantidade de água inicial no aquífero raso (mm); SOL\_AWC = Capacidade de água disponível da camada de solo (mm H<sub>2</sub>O/mm solo); SOL\_K = Condutividade hidráulica saturada (mm/hr); SURLAG = Coeficiente de atraso do escoamento superficial (adm).

<sup>2</sup> ADJ\_PKR = Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos nos canais tributários (adm); CH\_COV1 = Fator de erodibilidade do canal (adm); CH\_COV2 = Fator de cobertura do canal (adm); LAT\_SED = Concentração de sedimento no escoamento subsuperficial (mg/L); PRF = Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos no canal principal (adm); SLSUBBSN = Comprimento médio da encosta (m); SPCON = Parâmetro linear para reentrada de sedimento durante o transporte no canal (adm); SPEXP = Parâmetro exponencial para reentrada de sedimento durante o transporte no canal (adm); USLE\_C = Fator C da MUSLE (fator de cobertura do solo); USLE\_K = Fator K da MUSLE (fator de erodibilidade do solo); USLE\_P = Fator P da MUSLE (fator de práticas conservacionistas).

### **2.3.4 Análise de Sensibilidade, Calibração, Verificação e Análise de Incerteza**

Os modelos não são representações fiéis dos sistemas reais. As simplificações que são feitas na modelagem e a ausência de conhecimento pleno dos parâmetros e dos dados de campo, fornecem incertezas aos resultados produzidos pelo modelo (SILVA, 2010).

Sendo assim, análise de sensibilidade, calibração, verificação e análise de incerteza são procedimentos importantes no processo de modelagem, pois fornecem informações sobre o grau de confiabilidade dos resultados gerados e permitem quantificar e representar um intervalo possível de valores de parâmetros que representam o fenômeno modelado. As incertezas nos dados de entrada, nos parâmetros e na estrutura do modelo fornecem aos resultados da modelagem limites de adoção que devem ser bem avaliados. A necessidade de se avaliar essas incertezas é importante para tornar claros os limites de aplicabilidade dos resultados simulados e, principalmente, para atribuir maior confiabilidade aos resultados da modelagem (SILVA, 2010).

Segundo Arnold *et al.* (2012a), as técnicas de calibração, análise de sensibilidade e incertezas são geralmente referidas como manuais ou automatizadas e podem ser avaliadas por uma ampla gama de procedimentos gráficos e / ou estatísticos. De acordo com Abbaspour *et al.* (2015), a calibração deve ser condicionada à estrutura do modelo, às entradas do modelo, aos pressupostos do analista, ao algoritmo de calibração e aos dados de calibração, sendo a análise de incerteza essencial para avaliar a força do modelo calibrado.

As versões mais recentes da ferramenta *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* (*Calibration and Uncertain Program – Programa de Calibração e Incerteza*), desenvolvido para a análise de sensibilidade, calibração e análise de incertezas do *SWAT*. Esse programa tem vários algoritmos de otimização embutidos, como *SUF12* (*Sequential Uncertainty Fitting Algorithm Version 2 – Algoritmo Sequencial de Ajuste de Incerteza Versão2*), *GLUE* (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation – Estimativa da Incerteza de Probabilidade Generalizada*), *PARASOL* (*Parameter Solution - Solução de Parâmetros*), *PSO* (*Particle Swarm Optimization – Otimização por Enxame de Partículas*), *MCMC* (*Markov Chain Monte Carlo – Monte Carlo via Cadeias de Markov*) (ABBASPOUR, 2015).

Dentre os algoritmos de otimização presentes no *SWAT-CUP*, o mais utilizado atualmente é o *SUFI2*, que foi desenvolvido para modelagem inversa e usa uma sequência de etapas em que as incertezas iniciais (grandes) nos parâmetros do modelo são progressivamente reduzidas até que um determinado requisito de calibração baseado na incerteza de previsão seja atingido. O programa *SUFI-2* é limitado a encontrar uma de muitas regiões em um espaço multidimensional do parâmetro (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004).

#### 2.3.4.1 *Análise de Sensibilidade*

A análise de sensibilidade consiste no processo que avalia a variabilidade dos dados de saída, ou seja, as magnitudes das respostas do modelo, em função de alterações nos parâmetros de entrada. Na prática, trata-se de um procedimento para identificação dos parâmetros de entrada que mais contribuem para a geração e alterações dos resultados da modelagem, ou seja, os parâmetros mais sensíveis. Consequentemente, possibilita que a etapa posterior, a calibração do modelo, seja conduzida mais facilmente, pois se perceberá que muitos dos parâmetros não têm peso significativo na geração dos resultados e, portanto, não necessitam serem calibrados (ARNOLD *et al.*, 2012b, ABBASPOUR, 2015).

Segundo Saltelli *et al.* (2004), a análise de sensibilidade é realizada para:

- a) Determinar se o modelo representa o sistema em estudo;
- b) Verificar quais os fatores que mais contribuem para a variação nos resultados simulados pelo modelo e que, por isso, sugerem pesquisa adicional para fortalecer a base de conhecimento;
- c) Determinar os parâmetros (ou partes) do modelo que são pouco influentes e que podem ser eliminados do modelo final;
- d) Verificar quais grupos de dados interagem entre si.

Com relação a este último ponto (interação entre os dados), observa-se que a análise de sensibilidade pode ser feita de forma local ou global.

Nos métodos locais, as respostas do modelo são analisadas variando cada parâmetro e fixando todos os outros. É uma forma rápida de análise, pois não é exigente computacionalmente. O problema 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.*, 2012b). Um exemplo de um método local é o *OAT (One-Factor-At-a-Time)*, onde somente um dos parâmetros tem seu valor alterado a cada simulação.

Já no método global, todos os dados de entrada são simultaneamente variados, permitindo investigar a possível interação da variação dos parâmetros de entrada nos resultados fornecidos pelos modelos. A análise de sensibilidade global é feita com a utilização de complexos algoritmos construídos para esse fim (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006).

Segundo Arnold *et al.* (2012b), diferentemente da análise local que altera o valor de cada parâmetro, a análise global permite que todos sejam alterados, porém isso cria uma desvantagem que é o longo tempo de execução, pois necessita de muitas simulações, sendo exigente computacionalmente.

Um exemplo de análise global que tem sido utilizada em modelos hidrológicos é o método de Monte Carlo, o qual é baseado em amostragens aleatórias das possibilidades de ocorrência dos inputs, seguido da avaliação dos valores amostrados e da transformação dos parâmetros conforme equações pré-estabelecidas (VAN GRIENSVEN; BAUWENS, 2003).

Tradicionalmente, a análise de sensibilidade no *SWAT* tem sido feita com a junção de dois métodos estatísticos: o *LH (Latin Hipercube – Hipercubo Latino)*, que é um método global, e o *OAT (One-Factor-At-a-Time)*, que é um método local, formando o método *LH-OAT*.

A forma que os algoritmos de análise de sensibilidade adotam para poupar tempo e processamento computacional é a seleção de amostragens aleatórias dos possíveis valores que os parâmetros podem assumir. Assim, no método *LH* cada parâmetro tem sua distribuição de probabilidades dividida em *n* blocos, cada qual com a probabilidade de ocorrência igual a  $1/n$ . Valores aleatórios de cada bloco são gerados sendo que cada bloco é amostrado somente uma vez. Para cada *n* combinação dos parâmetros, o modelo roda uma vez conforme o método *OAT* (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006).

O método *LH* é considerado um aperfeiçoamento do método de Monte Carlo, pois a estratificação dos valores dos parâmetros em blocos, agiliza muito o processamento, diminuindo o número de simulações necessárias. Esta análise conjunta (*LH-OAT*) 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).

De acordo com Carvalho (2014), a análise de sensibilidade necessita de um valor inicial para comparação, por consistir num procedimento que compara respostas geradas pelo modelo (vazão, sedimentação etc.) de acordo com as variações nos valores de seus parâmetros. Esse valor pode ser obtido a partir das próprias simulações do modelo (feitas com valores default dos parâmetros) ou a partir de dados observados da variável que se pretende simular. Em todos os casos, faz-se necessária a utilização de uma “função objetivo”, que é a métrica utilizada pelos algoritmos de otimização para determinar o quão distante a nova simulação está da simulação original ou dos dados observados.

Ao contrário do que era feito em antigas versões do *SWAT*, nas quais havia um módulo específico para a análise de sensibilidade e esta era feita previamente à calibração, o *SWAT-CUP* realiza a análise de sensibilidade concomitantemente à calibração de forma automática por meio de seus algoritmos de otimização (*SUF12*, *GLUE*, *PARASOL*, etc.). Para tanto, a função objetivo definida pelo usuário é aplicada a cada parâmetro em cada simulação. Quanto maior a variação no valor da função devido a alterações nos valores do parâmetro, mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

Segundo Abbaspour *et al.* (2007), o algoritmo de otimização *SUF12* realiza o cálculo da sensibilidade global dos parâmetros por meio de um sistema de regressão múltipla (*Equação 17*), que regride os parâmetros gerados pelo *LH* em relação aos valores da função objetivo.

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i * b_i \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:  $g$  é a variável dependente;  $\alpha$  é o coeficiente técnico fixo;  $\beta_i$  é coeficiente técnico atrelado à variável  $b_i$ ;  $b_i$  é variável independente (parâmetros); e  $m$  é o número de parâmetros.

A sensibilidade global dos parâmetros é avaliada no *SUF12* pelos valores de *t-stat* e *p-value*, onde quanto maior o valor absoluto de *t-stat* e menor o valor de *p-value*, mais sensível o parâmetro é classificado. A razão do coeficiente de regressão de um parâmetro por seu erro padrão é nomeado como *t-stat*, onde se o valor do coeficiente é maior que o seu erro padrão, então o valor de *t-stat* é maior que zero, ou seja, o parâmetro é sensível. Já para o cálculo de *p-value* é necessário comparar o valor de *t-stat* com os valores da tabela de distribuição de *t* de *Student*. Essa distribuição é muito

similar à distribuição normal, com a diferença que o desvio padrão da população nesse tipo de teste é desconhecido e deve, portanto, ser estimado. O *p-value* de cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente de regressão é igual a zero, sendo que um valor pequeno de *p-value* (menor que 0,05) indica que é possível rejeitar a hipótese nula, ou seja, o parâmetro exerce influência na variável dependente, sendo, portanto, sensível. O valor de 0,05 refere-se à existência de uma probabilidade de 95% da variável dependente estar sofrendo algum efeito com a mudança do valor do parâmetro. O *t-stat* fornece uma medida da sensibilidade (os maiores valores em módulo indicam maior sensibilidade), enquanto o *p-value* determina a significância da sensibilidade (valores próximos a zero indicam maior significância) (ABBASPOUR, 2015).

Deve-se ressaltar, também, a importância de uma correta delimitação dos intervalos para a variação dos parâmetros durante a análise de sensibilidade do modelo. Os limites de variação devem ser definidos de acordo com a realidade do parâmetro para a bacia estudada, caso contrário, parâmetros que não são sensíveis podem apresentar alta sensibilidade e parâmetros que são realmente importantes podem ser desconsiderados por apresentarem baixa sensibilidade, o que implica posteriormente numa calibração que irá desconsiderar os critérios físicos da bacia, fugindo da realidade do local (CASTRO, 2013)

Por fim, o *SWAT* é sensível a mais de 100 parâmetros de entrada relacionados à vegetação, manejo e tipo dos solos, clima, aquífero, canal e reservatório. Devido a esse grande número de parâmetros de entrada, é importante que se identifiquem os parâmetros que mais influenciam o modelo e sua importância nos resultados gerados. Cada um desses parâmetros influencia o modelo de forma diferente. Assim, é possível conseguir resultados similares com distintas combinações dos parâmetros (ARNOLD *et al.*, 1998).

#### 2.3.4.2 Calibração do Modelo e Análise de Incertezas

Calibração é o processo de ajuste dos valores dos parâmetros de entrada do modelo (dentro de suas respectivas faixas de incerteza) para um determinado conjunto de condições locais, por meio da comparação entre os valores simulados (saída) e os dados observados, reduzindo assim a incerteza da previsão do modelo (MORIASI *et al.*, 2007; ARNOLD *et al.*, 2012b; ABBASPOUR, 2015).

A calibração e a análise de incertezas estão intimamente ligadas e nenhum resultado de calibração deve ser apresentado sem uma quantificação do grau de incerteza na previsão do modelo. A

incerteza na modelagem surge devido às informações incompletas utilizadas na simulação que estão na estrutura do programa de modelagem, nos parâmetros e nos dados de entrada. Diante disso autores sugerem que cada esforço de modelagem seja acompanhado de uma análise de incertezas com o objetivo de se determinar os intervalos de confiança das previsões do modelo, considerando as várias fontes de incerteza (SILVA, 2010; ABBASPOUR *et al.*, 2015).

O processo de calibração do modelo pode ser realizado manual ou automaticamente. De forma manual o ajuste de cada variável é feito individualmente a fim de igualar o máximo possível aos dados reais. Já de forma automática o ajuste é feito por meio do uso de uma função objetivo, onde utiliza-se de uma equação para determinar o desvio entre os valores de saída do modelo e os dados observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1998, 1999).

A função objetivo é um elemento muito importante na calibração automática de modelos hidrológicos, sendo a métrica utilizada pelos algoritmos de otimização para determinar a qualidade da simulação hidrológica, ou seja, o quão distante a nova simulação está da simulação original ou dos dados observados (SALLES, 2012). De acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), a função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a “distância” entre a resposta do modelo e os valores reais observados em campo.

Existem diferentes funções objetivo encontradas na literatura para avaliar a eficiência das simulações de modelos hidrológicos, as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para otimizar a simulação de vazões ou aporte de sedimentos. As mais usuais são: *NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe)*; *R<sup>2</sup> (Coefficient of Determination – Coeficiente de Determinação)*, *PBIAS (Percent Bias – Percentual de Tendência)*; *RSR (RMSE-observations Standard deviation Ratio – Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações)*; *MNS (Modified Nash-Sutcliffe Efficiency – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado)*; *KGE (Kling-Gupta Efficiency – Coeficiente de Eficiência Kling-Gupta)*; entres outras. Gupta, Sorooshian e Yapo (1998), Silva (2010) e Tucci (2012) apresentam tabelas com exemplos de funções objetivos que podem ser utilizadas na calibração de modelos hidrológicos.

Moriasi *et al.* (2007) desenvolveram um estudo com os diferentes métodos para análise da modelagem hidrológica, explicando cada um desses métodos e definindo uma classificação, que abrange os mais utilizados e os que mais se adequam para a análise de determinados modelos. De

acordo com esse estudo, os resultados do *SWAT* para estimativas mensais, quando utilizadas as funções objetivos *NSE*, *PBIAS* e *RSR*, podem ser classificados conforme a **Tabela 1**.

**Tabela 1:** Classificação dos resultados do *SWAT* por índice de eficiência

Classificação	NSE	PBIAS	RSR
Muito Bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,60$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS > \pm 25$	$RSR \geq 0,70$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

*NSE* é largamente utilizado na análise de modelos hidrológicos. Esse índice varia entre 1 e - infinito. Uma simulação cujos resultados tenham perfeita adesão aos dados observados recebe o índice 1. Quanto menor o valor do *NSE*, pior é a simulação. Um  $NSE = 0$  indica que as previsões do modelo são tão exatas como a média dos dados observados. *PBIAS* mede a tendência média dos dados simulados em ser maior ou menor que os correspondentes observados. O valor ideal do *PBIAS* é 0 (zero), com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo. Valores positivos indicam tendência de subestimação do modelo e valores negativos indicam tendência de superestimação do modelo.  $R^2$  descreve a proporção da variação nos dados medidos explicada pelo modelo.  $R^2$  varia de 0 a 1, com valores mais altos indicando menor variação de erro e geralmente valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis (MORIASI et al.; 2007).

Neste trabalho utilizou-se as funções objetivo *NSE* (Equação 18), *PBIAS* (Equação 19) e  $R^2$  (Equação 20) para avaliar a eficiência das simulações do modelo hidrossedimentológico gerado.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})^2} \right] \quad (\text{Equação 18})$$

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs})} \right] \quad (\text{Equação 19})$$

$$R^2 = \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs}) (y_i^{obs} - y_i^{med,sim}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_i^{med,sim})^2} \right] \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:  $y_i^{obs}$  é a vazão observada;  $y_i^{sim}$  é a vazão simulada;  $y_{med,obs}$  é a média da vazão observada; e  $y_{med,sim}$  é a média da vazão simulada.

No que diz respeito ao processo de calibração realizado no *SWAT-CUP* por meio do algoritmo *SUF12*, o mesmo consiste no desenvolvimento de duas etapas principais, primeiro tem-se a definição da função objetivo e em seguida a definição das faixas mínimas e máximas para os parâmetros que serão otimizados. As faixas de incerteza iniciais são atribuídas com valores próximos aos valores dos parâmetros da primeira rodada da amostragem *LH*, dessa forma, essa amostragem é realizada levando a  $n$  combinações de valores dos parâmetros. Na sequência avalia-se as iterações por meio da função objetivo, onde uma série de medidas é calculada com o objetivo de avaliar cada rodada de amostragem. Por fim, avalia-se as incertezas considerando o cálculo com predição de 95% de incertezas (*95PPU*) para todas as variáveis na função objetivo. O *95PPU* é calculado nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída obtida por meio da amostragem *LH*. Vale frisar que na primeira iteração as incertezas dos parâmetros são altas, o que faz com que novas interações sejam necessárias atribuindo assim novos intervalos para cada parâmetro (ABBASPOUR *et al.*, 2004, 2007).

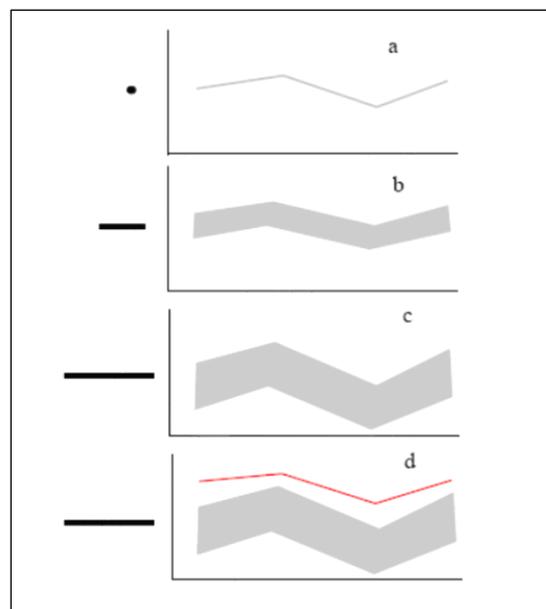
Para representar os efeitos das incertezas dos parâmetros de entrada, o *SUF12* quantifica o ajuste entre o resultado da simulação, expresso com predição de 95% de incertezas (*95PPU*), e a observação, expressa como um único sinal (com algum erro associado a ele), por meio da estimativa de duas estatísticas: fator P (*p-factor*) e fator R (*r-factor*). O *p-factor* é a porcentagem entre os dados medidos e a faixa de incerteza de predição de 95% (*95PPU*). O *r-factor* é a razão entre a largura dessa faixa de *95PPU* e o desvio padrão dos dados observados. A qualidade de ajuste e a incerteza da calibração são examinadas em cada iteração pelo balanço entre o *p-factor* e o *r-factor* (ABBASPOUR, 2015).

O conceito por trás da análise de incerteza do algoritmo *SUF1-2* é ilustrado na **Figura 3**. A figura ilustra que um único valor de parâmetro (representado pelo ponto preto), leva a uma única resposta do modelo (Figura 3a – representando uma saída de vazão); enquanto a propagação da incerteza

do parâmetro (a linha preta da Figura 3b, representa o intervalo de variação do parâmetro) leva à faixa de 95PPU, representada pela região cinza. A incerteza do parâmetro aumenta (maior linha em preto), e a saída do modelo também (Figura 3c). Na Figura 3d, os intervalos dos parâmetros não explicam o modelo conceitual, uma vez que a vazão (linha vermelha) não foi envelopada pela faixa de 95PPU, e assim, o modelo deve ser reavaliado (ABBASPOUR *et al.*, 2007).

No *SUFI-2*, o objetivo é que o 95PPU seja capaz de envelopar a maioria dos registros observados e que o envelope seja pequeno. Não existem números exatos que expressam o melhor valor para os dois fatores. Para simulações de vazão, admite-se um *p-factor* superior a 70%, e um *r-factor* próximo de 1 (um) (ABBASPOUR *et al.*, 2004, 2007).

**Figura 3:** Relação entre a incerteza do parâmetro e da predição



Fonte: Abbaspour *et al.* (2007).

A operação do *SUFI-2* atua por meio de poucas iterações, usualmente até 5 iterações (recomenda-se que cada iteração seja de 500 simulações). A cada iteração, os intervalos dos parâmetros são reduzidos e se aproximam do valor de parâmetro que produziu os melhores resultados da iteração anterior. Naturalmente, à medida que as faixas de valores ficam menores, o envelope do 95PPU se estreita, e por consequência, o *r-factor* fica menor. Isto é, se o *NSE* é a estatística de referência (função objetivo), as iterações subsequentes gerarão melhores índices *NSE*, porém o *p-factor* poderá ser menor levando a redução da porcentagem de registros observados envelopados e à inabilidade do modelo em explicar os processos internos à bacia. Por isso há que se avaliar juntos os valores de *NSE*, *p-factor* e *r-factor*, para identificar o melhor resultado para calibração (ABBASPOUR, 2015).

### 2.3.4.3 Verificação do Modelo

Grande parte dos trabalhos de modelagem com o *SWAT* realizados no Brasil não descrevem os processos de calibração e de verificação (confirmação) do modelo, devido principalmente a ausência de séries de dados medidos nas bacias modeladas (BRESSIANI *et al.*, 2015).

De acordo com Arnold *et al.* (2012b), a confirmação do ajuste dos parâmetros é a última etapa de verificação de um modelo hidrológico e trata-se da execução do modelo usando valores de parâmetros que foram determinados durante o processo de calibração e a comparação das previsões com dados observados de um período não utilizados na calibração. Segundo os autores, em geral, uma boa calibração e verificação de um modelo deve envolver: (1) dados observados que incluem anos úmidos, médios e secos; (2) múltiplas técnicas de avaliação; (3) calibração de todos os constituintes a serem avaliados; (4) verificação de que outros resultados importantes do modelo são razoáveis. Em geral, métodos gráficos e estatísticos com alguma forma de critério estatístico objetivo são usados para determinar quando o modelo foi calibrado e verificado (confirmado).

Assim a verificação do modelo é o procedimento que mede o quão bem o ajustamento dos parâmetros realizado na etapa da calibração fornece dados coerentes com a realidade. Ela é a garantia da qualidade dos resultados obtidos por modelos, uma vez que se comparam as respostas modeladas com os valores observados de um período não utilizados na calibração (SILVA, 2010).

Nesta fase o que se busca é verificar como se comporta o modelo já calibrado quando se compara os resultados a dados medidos. Os dados utilizados para calibração devem ser independentes dos que serão utilizados na verificação. Se os mesmos dados forem utilizados para ambos os processos, não será surpresa se o modelo for considerado perfeito. A divisão da série de dados disponíveis em “série para calibração” e “série para verificação” geralmente é a solução para esse problema. (ABBASPOUR, 2015).

Quando, ao final do processo, não se consegue obter uma redução satisfatória do erro, é conveniente que se retorne ao início do processo de modelagem, uma vez que pode ter havido algum equívoco na preparação do modelo, isto é, inserção de informações inadequadas etc. (ABBASPOUR, 2015).

### 2.3.5 Principais Aplicações do SWAT

O SWAT vem sendo amplamente empregado entre pesquisadores da área de hidrologia. A sua utilização pode estar vinculada a diversos propósitos, de acordo com o objetivo de cada trabalho. Uns visam avaliar o comportamento hidrológico, outros visam simular a produção de sedimentos, baseando-se em diferentes usos e manejos do solo, outros, ainda, podem estar interessados em avaliar a propagação de nutrientes e pesticidas (UZEIKA, 2009).

Gassman *et al.* (2007) realizaram uma ampla revisão da utilização do SWAT em âmbito global, identificando mais de 250 artigos publicados que relatam aplicações, revisões de componentes ou outras pesquisas que incluam o SWAT. Nesse levantamento, os artigos foram organizados em diversas categorias relevantes, tais como: técnicas de calibração e análise de sensibilidade; impactos das mudanças climáticas na hidrologia; descrições da interface SIG; análises hidrológicas; comparações com outros modelos e técnicas; interfaces com outros modelos; e avaliações de carga de poluentes. Foram também relatados os pontos fortes e fracos do modelo, suas vantagens e desvantagens, e as necessidades de ampliação das pesquisas.

Arnold *et al.* (2009) realizaram uma descrição detalhada do SWAT, com uma abordagem geral da ferramenta de modelagem, desenvolvimento histórico, aplicações mundiais, interfaces computacionais, e diretrizes para pesquisas futuras. De acordo com os autores, o SWAT tem sido amplamente aplicado para entender o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de água, sedimentos e agricultura em grandes bacias hidrográficas complexas com solos variados, uso da terra e condições de manejo por longos períodos.

Garbossa *et al.* (2011) apresentaram uma ampla revisão sobre a utilização do SWAT no Brasil, apresentando uma compilação dos trabalhos realizados e os valores estatísticos empregados para as calibrações e validações, bem como o período e o intervalo de observação (diário, mensal e anual) utilizados. Os autores encontraram 74 publicações sobre o assunto entre dissertações, teses e artigos publicados em revistas científicas, reuniões e conferências entre 1999 e 2010. O foco da maioria dos estudos foi verificar a viabilidade da utilização do SWAT.

Bressiani *et al.* (2015) em seu artigo de revisão dos trabalhos realizados com o SWAT no Brasil identificaram 102 estudos publicados entre 1999 e 2015 em periódicos nacionais, internacionais, conferências, simpósios, workshops, teses e dissertações. Segundo os autores a maioria dos estudos foi realizada em bacias hidrográficas localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (67%)

e foi conduzida no âmbito de pesquisas acadêmicas, sendo que cerca de 50% dos estudos relatou apenas resultados hidrológicos (vazão), o restante abordou as previsões de sedimentos, nutrientes/pesticidas, evapotranspiração, revisões teóricas ou apenas o delineamento de bacias hidrográficas. Para os autores as principais dificuldades para aplicação do *SWAT* no Brasil estão relacionadas com a falta de disponibilidade de dados de entrada de qualidade.

Krysanova e White (2015) apresentaram uma visão geral de 10 trabalhos de pesquisa que utilizaram o *SWAT* para avaliação de recursos hídricos. Os artigos abordaram os seguintes tópicos: nutrientes; sedimentos; irrigação; culturas de bioenergia; impacto das mudanças climáticas; e impactos da mudança no uso do solo. Em seguida, os trabalhos foram brevemente descritos, cobrindo os temas: escoamento superficial e sedimentos; poluição não pontual; águas superficiais e subterrâneas; impactos das mudanças climáticas e de uso do solo; e aplicações *SWAT* em larga escala. Esta revisão demonstrou que as aplicações do *SWAT* para avaliação de recursos hídricos são realizadas em uma variedade de escalas espaciais, regiões fisiográficas e zonas climáticas, e estão crescendo em número e cobrem bacias de drenagem em muitas regiões do mundo.

Nesse contexto, foram selecionados da literatura alguns trabalhos que aplicaram o *SWAT* no Brasil e no Mundo nos últimos 7 anos (2012 a 2019), com foco em erosão e produção de sedimentos. São listadas no **Apêndice B** as dissertações e teses e no **Apêndice C** os artigos científicos. Dos trabalhos listados no **Apêndice C** (artigos científicos), foram destacados os que aplicaram o *SWAT* para modelagem hidrossedimentológica no Bioma Cerrado:

Ferrigo *et al.* (2012) aplicaram o *SWAT* em uma sub-bacia contribuinte ao Lago do Descoberto, responsável por 60% do abastecimento de água do Distrito Federal. O estudo teve como objetivo analisar a sensibilidade e a viabilidade do modelo *SWAT* em simular a carga de sedimentos quando calibrado unicamente por vazão. Esse tipo de estudo é de grande utilidade, visto que no Brasil os dados de vazão são muito mais comumente registrados do que os de descarga sólida. O modelo demonstrou confiabilidade em simular a vazão obtendo resultados estatísticos condizentes para realizar a simulação hidrossedimentológica. Essa, por sua vez, apresentou resultados satisfatórios ao reproduzir a carga de sedimentos. A carga sólida total observada foi de 1552,7 toneladas, enquanto a carga simulada foi de 1334,8 toneladas para o ano hidrológico 2008/2009.

Lima *et al.* (2013a) apresentaram uma base de dados de solo de referência para aplicação do *SWAT* em bacias hidrográficas do Cerrado. Com base em amostras de solo e análises realizadas pelo

menos em triplicata, foram medidas as seguintes características de solo: densidade aparente; curva de retenção de água no solo; condutividade hidráulica; matéria orgânica; e textura do solo. Utilizando dados do solo coletados em 66 locais e em três profundidades, na Bacia Experimental do Alto Jardim, Distrito Federal, foi proposto um modelo conceitual para a introdução desses dados no *SWAT*, além de uma tabela resumida mostrando os valores médios e os intervalos de variação (calibração) de cada um dos parâmetros de solo considerados pelo modelo. Sete solos representativos da região foram cobertos por este estudo. Os autores esperam que, tendo em vista as limitações dos dados utilizados em estudos anteriores na região do cerrado, os resultados do trabalho representem um avanço na busca por modelos hidrológicos mais realísticos.

Strauch *et al.* (2013) utilizaram o *SWAT* para estudar o impacto das práticas de conservação de solo na alteração da vazão e produção de sedimentos da bacia do Ribeirão Pipiripau. Por meio de simulações de cenários, verificou-se que as práticas conservacionistas de natureza estrutural, como terraços e barraginhas, podem levar a reduções de carga de sedimentos em até 40%. A implementação dessas medidas não afetou a produção de água. Por outro lado, rotações de culturas diversas, incluindo culturas irrigadas na estação seca, foram consideradas desvantajosas em termos de disponibilidade de água, reduzindo significativamente a vazão durante períodos de seca. O estudo considerou a incerteza das chuvas usando um conjunto de dados de precipitação, mas destacou a importância de sistemas de monitoramento bem estabelecidos devido a deficiências relacionadas na calibração do modelo. Apesar das incertezas existentes, os resultados do modelo se mostraram úteis para os gestores de recursos hídricos, pois possibilitou desenvolverem estratégias de proteção da água e do solo para a bacia do Rio Pipiripau e para bacias hidrográficas com características semelhantes.

Ferrigo *et al.* (2014) aplicaram o *SWAT* para avaliar os possíveis impactos das alterações na precipitação, que podem ser causadas pelas mudanças climáticas, e no uso do solo sobre a produção de sedimentos na bacia experimental do Córrego Capão Comprido (~16 km<sup>2</sup>) no Distrito Federal. A simulação apresentou, com base em dados experimentais, resultados satisfatórios ao reproduzir a carga de sedimentos. Foram avaliados quatro cenários de alteração na precipitação baseados no relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas e dois cenários de mudanças de uso do solo baseados na intensificação da urbanização e do desenvolvimento agrícola. Em média, a relação entre a mudança na precipitação e a produção de sedimentos foi diretamente proporcional na razão de 1:2. Para estimativa da produção de sedimentos na bacia

estudada, os resultados do modelo foram menos sensíveis às mudanças no uso do solo do que às mudanças no regime de chuva.

Silva, Pinto e Soares (2016) realizaram a modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Córrego Samambaia por meio da aplicação do modelo *SWAT*. Foram monitorados, durante 18 meses, vazões e concentração de sedimentos em suspensão diários em uma seção no curso d'água. Tais dados foram utilizados para a análise da influência de distintos parâmetros no ajuste do modelo *SWAT*. Os resultados da análise de sensibilidade apontaram que parâmetros de fator de compensação da evaporação do solo (*ESCO*), profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer o fluxo de retorno (*GWQMIN*), capacidade de água disponível (*SOL\_AWC*) e a profundidade da camada do solo (*SOL\_Z*) como os mais sensíveis para as simulações em termos da vazão, e a prática de manejo e conservação do solo (*USLE\_P*) para as simulações com ajuste em termos da concentração de sedimentos em suspensão. Os melhores ajustes obtidos na estatística de precisão *NSE* foram de 0,56 a 0,72 para as simulações em termos da vazão e de 0,56 a 0,69 para as simulações em termos do sedimento em suspensão.

Mingoti *et al.* (2019) analisaram o efeito da alteração do uso e cobertura do solo na estimativa de produção de sedimentos da sub-bacia do alto Rio São Lourenço, localizada na Bacia do Alto Paraguai, entre os anos de 1985 e 2017. Verificou-se que no período analisado a supressão de vegetação nativa foi de 26,7%. Utilizando o modelo hidrológico *SWAT* e analisando os resultados estimados de maneira comparativa, foi estimado que as alterações de uso e cobertura do solo promoveram aumento médio de 8% na produção de sedimentos. As sub-bacias com maiores aumentos de carga de sedimentos apresentaram avanço de “Alteração Antrópica”, enquanto as com maiores diminuições tiveram acréscimo de “Savana Florestada” e “Savana Arborizada”.

#### *2.3.5.1 Limitações/Obstáculos e Dificuldades da Aplicação do SWAT no Brasil*

Diante do levantamento realizado, pode-se afirmar que no Brasil as análises realizadas pelo *SWAT* são bem promissoras, em virtude da demonstração do excelente potencial do seu uso como ferramenta de avaliação das características hidrossedimentológicas, das análises e monitoramentos ambientais, bem como da flexibilidade do modelo (mesmo para regiões continentais).

Porém existem limitações e dificuldades para aplicação do *SWAT* de forma rotineira nas bacias hidrográficas brasileiras, uma vez que a base de dados original do modelo é elaborada para a

realidade dos *EUA*, e não considera tipos de solo e uso/cobertura do solo do Brasil, por exemplo. De acordo com Garbossa *et al.* (2011), Ferrigo (2014), Bressiani *et al.* (2015), os principais obstáculos em território nacional são:

- Inexistência de uma base de dados de solo e uso do *SWAT* que contenha tipos de solo e uso e cobertura do solo do Brasil, necessitando de vários ajustes para a nossa realidade nacional;
- Inexistência ou insuficiência de dados espaciais de entrada. Ex: falta de levantamento básicos atualizados e rotineiros de Solo, Uso do Solo e Topográficos na região a ser modelada;
- Falta de disponibilidade de dados de entrada de qualidade (pouco confiáveis, precisos ou detalhados). Ex: séries com muitas falhas exigindo preenchimento e correções; Mapas de Solos, de Uso do Solo ou Topográficos com baixa resolução ou desatualizados;
- Inexistência ou insuficiência de informações detalhadas que descrevam satisfatoriamente a variabilidade espacial e temporal das regiões analisadas: Ex: inexistência de valores de parâmetros das propriedades físico-hídricas das classes de Solo e Uso do Solo da região a ser modelada, exigindo adaptações para realidade local;
- Dados existentes desorganizados ou em formatos que não são prontamente utilizáveis para a interface do *SIG ArcSWAT* ou para outras ferramentas de pré-processamento que são usadas para construir os conjuntos de dados de entrada do *SWAT*;
- Falta de disponibilidade de estrutura computacional (hardware) adequada para processamento de grande volume de dados. Ex: processamento de séries diárias que exigem muita memória;
- Dificuldade em modelar grandes áreas, com enorme quantidade e heterogeneidade de dados que descrevem os sistemas naturais. Ex: grandes bacias que abrangem vários biomas como a bacia do Rio São Francisco;
- Falta de experiência ou treinamento adequado para se trabalhar com a ferramenta de modelagem *SWAT*, uma vez que ela é exigente, complexa e tem muitos detalhes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos propostos no Capítulo 1 e o levantamento bibliográfico apresentado no Capítulo 2, o presente capítulo está dividido em 3 (três) itens correspondentes as etapas metodológicas desenvolvidas neste estudo (*Figura 4*), sendo eles:

- **3.1 Caracterização da Área de Estudo** – descreve sucintamente as características da área de estudo, como aspectos físicos, naturais e antrópicos da bacia do rio Indaiá;
- **3.2 Materiais Utilizados** – apresenta os materiais utilizados, como o sistema computacional (*software/hardware*) e os dados necessários para realizar a modelagem;
- **3.3 Modelagem Hidrossedimentológica** – aborda todas as etapas da modelagem hidrossedimentológica realizada no estudo.

*Figura 4: Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas no estudo*



Fonte: Autor (2019)

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

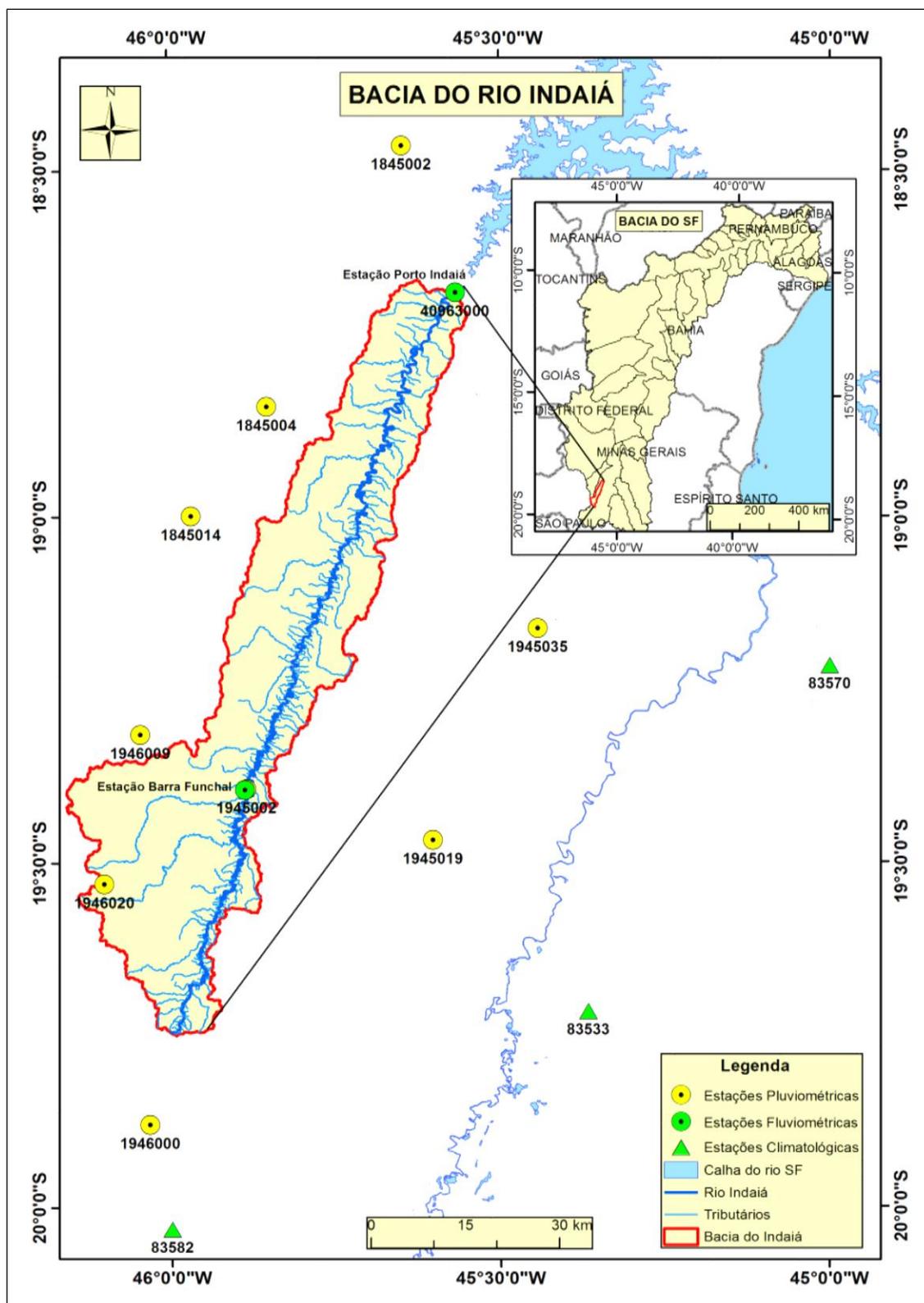
##### Bacia Hidrográfica do rio Indaiá

A bacia do rio Indaiá está localizada na bacia do rio São Francisco, no estado de Minas Gerais (MG), entre os meridianos 45°30'30" e 46°09'00" de longitude oeste e os paralelos 18°37'00" e 19°45'00" de latitude sul (*Figura 5*), compreendendo uma área de aproximadamente 2300 km<sup>2</sup>.

O rio Indaiá é um dos principais afluentes do rio São Francisco em Minas Gerais, que, em conjunto com os rios Abaeté, Borrachudo, Pará e Paraopeba, formam a bacia do Alto São Francisco. Possui o comprimento de cerca de 262 km, nascendo no município de Córrego Danta-MG na cota de 1.170 m, e desaguando no reservatório da UHE Três Marias, cuja operação está sob o controle da CEMIG. Em ambas as margens, possui muitos afluentes, dos quais os mais importantes são os rios

Funchal e Indaiazinho, que deságuam na sua margem esquerda (OLIVEIRA, 2007; MACÊDO, 2009).

*Figura 5: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Indaia*



Fonte: Autor (2019).

## Variáveis Morfométricas da Bacia

As variáveis utilizadas para análise e descrição física da bacia do Indaiá foram baseadas nos trabalhos realizados por Salgado *et al.* (2009), Macêdo (2009) e Rocha *et al.* (2014), onde são apresentados conceitos e equações. Os resultados da análise morfométrica da bacia foram obtidos de Macêdo (2009) e expostos na **Tabela 2**.

**Tabela 2:** Características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Indaiá

Variável morfométrica	Símbolo	Unidade	Valor
Área da bacia	A	km <sup>2</sup>	2324,00
Perímetro	P	km	377,92
Amplitude altimétrica	Hm	m	631,00
Coefficiente de compacidade	Kc	adm	2,20
Coefficiente de manutenção	Cm	m	438,84
Comprimento do canal principal	L	km	262
Comprimento total dos canais	Lt	km	5295,72
Densidade de drenagem	Dd	km/km <sup>2</sup>	2,28
Densidade hidrográfica	Dh	canais/km <sup>2</sup>	1,97
Extensão do percurso superficial	Eps	m	219,42
Fator de forma	F	adm	0,13
Índice de circularidade	Ic	adm	0,20
Índice de sinuosidade	Is	adm	1,96
Ordem do canal principal	N	adm	6 <sup>a</sup>
Razão de textura	T	canais/km	12,10
Relação de relevo	Rr	%	0,24

Fonte: Adaptado de Macêdo (2009).

De acordo com características morfométricas apresentadas na **Tabela 2** a bacia do rio Indaiá apresenta: um formato alongado e estreito, na direção sudoeste-norte; média densidade de drenagem, com baixo potencial à infiltração e um maior favorecimento a escoamentos superficiais, confirmado ao analisar a razão de textura; densidade hidrográfica com relevante capacidade para gerar novos cursos d'água; boa capacidade para formação e manutenção de seus cursos d'água; baixos coeficiente de compacidade e fator de forma indicando baixa propensão da bacia em sofrer inundações, confirmado pelo baixo índice de circularidade; índice de sinuosidade e relação de relevo que indicam um rio meândrico, não retilíneo, devido em parte a grande quantidade de sedimentos transportada pelo rio Indaiá ao longo dos anos.

## Clima

O clima da região é tropical e temperado úmido com duas estações bem definidas: verão chuvoso (dezembro a fevereiro) e inverno seco (junho a agosto). A região apresenta altas taxas pluviométricas, com valores que variam entre 1.000 e 2000 mm anuais e a temperatura média

situa-se em torno de 23 °C. O trimestre mais chuvoso contribui com cerca de 55 a 60 % do total anual precipitado, correspondendo aos meses de novembro, dezembro e janeiro. O trimestre mais seco, que corresponde aos meses de junho, julho e agosto, contribui com menos de 5 % da precipitação anual. A região possui insolação média anual de 2400 horas, evaporação média anual de 1000 mm, e umidade relativa média anual em torno de 70 a 80 %, com os valores mais elevados ocorrendo nas áreas de maior altitude (LOPES; BARROS; BRANDÃO, 2002; BRASIL, 2006).

São encontradas na região duas tipologias climáticas, de acordo com a classificação de Wladimir Köppen:

- *Cwa* – clima temperado úmido com verão quente e inverno seco.
- *Aw* – clima tropical com verão chuvoso e inverno seco.

### **Solos**

A partir da análise do mapa de solos produzido pelo *Projeto RadamBrasil (1987)* e disponibilizado pelo *IBGE (2018)* por meio da Folha SE-23 (Belo Horizonte) na escala 1:250.000, foram identificadas na bacia do rio Indaiá 4 (quatro) classes de solos: *Cambissolo (CX)*, *Latossolo Vermelho (LV)*, *Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)* e *Neossolo Litólico (RL)*.

A seguir são descritas por ordem de importância quanto às suas distribuições espaciais de acordo com Santos *et al.* (2013):

- *Cambissolo (CX)*: solo de fertilidade natural variável, com textura argilosa, média e cascalhenta. Apresenta como principal limitação para uso, o relevo com declives acentuados, a pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa do solo. Este solo ocorre praticamente ao longo de toda a bacia.
- *Latossolo Vermelho (LV)*: solo de baixa fertilidade, com textura argilosa, média, e muita argilosa. Este solo está distribuído nas porções sudoeste da bacia.
- *Neossolo Litólico (RL)*: solo de baixa fertilidade, com textura argilosa e siltosa, ou textura argilosa cascalhenta e siltosa cascalhenta. Este solo está distribuído na porção média da bacia.
- *Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)*: solo de baixa fertilidade, com textura argilosa e média, ou textura média. Abrange a região norte da bacia.

## **Uso e Cobertura do Solo**

A vegetação nativa da região era constituída predominantemente pelo cerrado. Esse tipo de vegetação é característico de regiões de clima semiúmido, constituindo-se principalmente de gramíneas, arbustos e árvores de médio porte, tendo como principais características os troncos e galhos retorcidos e as folhas espessas e coriáceas (DNAEE, 1995).

Em decorrência da alta pressão antrópica, a maior parte dessa vegetação original foi substituída, dando lugar a pastagens cultivadas e, nas áreas com declividades mais baixas, a lavouras mecanizadas. Somente em áreas com relevo mais acidentado é que são encontrados pequenos remanescentes de vegetação nativa. A produção de carvão para atender à demanda das indústrias siderúrgicas instaladas na região foi um fator que serviu para acelerar essa destruição da cobertura original (MACÊDO, 2009).

De acordo com mapeamento do bioma Cerrado realizado pelo *Projeto MapBiomias (2019)*, Coleção 2 (SOUZA; AZEVEDO, 2017), para o ano base 2007, a bacia do rio Indaiá apresenta as seguintes classes de uso e cobertura do solo: Pastagem, Mata de Galeria, Cerrado, Campo, Culturas Anuais, Culturas Semi-Perene, Silvicultura e Corpos d'Água.

## **Municípios**

A bacia do rio Indaiá engloba áreas de 12 municípios (*Tabela 3*) do estado de Minas Gerais, os quais ocupam uma superfície territorial de 8.510 km<sup>2</sup>, correspondente a cerca de 1,5 % da área total do estado. Destes, somente os municípios de Cedro do Abaeté e de Santa Rosa da Serra tem áreas urbanas dentro da bacia, porém apresentam densidade populacional baixa.

Segundo o último Censo Demográfico do *IBGE* do ano 2010, vivem nesses 12 municípios um total de 73.461 habitantes, numa densidade demográfica média de 8,84 hab/km<sup>2</sup>, e *IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal)* médio igual a 0,691, com estimativa para 2019 de 77.135 habitantes (*Tabela 3*).

**Tabela 3:** Dados demográficos e econômicos dos municípios que englobam a bacia

Município	População estimada (2019) n° hab	População (Censo 2010) n° hab	Densidade demográfica (Censo 2010) hab/km <sup>2</sup>	IDHM (Censo 2010)
Biquinhas	2.515	2.630	5,73	0,688
Cedro do Abaeté	1.164	1.210	4,27	0,678
Córrego Danta	3.215	3.391	5,16	0,692
Estrela do Indaiá	3.500	3.516	5,53	0,676
Matutina	3.749	3.761	14,41	0,707
Morada Nova de Minas	8.863	8.255	3,96	0,696
Paineiras	4.486	4.631	7,27	0,669
Quartel Geral	3.563	3.303	5,94	0,683
Santa Rosa da Serra	3.350	3.224	11,34	0,705
São Gotardo	35.469	31.819	36,74	0,736
Serra da Saudade	781	815	2,43	0,677
Tiros	6.480	6.906	3,30	0,683
<b>TOTAL</b>	<b>77.135</b>	<b>73.461</b>	<b>8,84</b>	<b>0,691</b>

Fonte: IBGE (<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sao-gotardo/panorama>)

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Sistema Computacional

Os principais programas (*softwares*) e computador (*hardware*) utilizados no presente estudo para a realização das etapas relacionadas a modelagem hidrossedimentológica foram:

- *ArcGIS*: versão 10.2.1 com extensão *Spatial Analyst* (análise espacial e geração de mapas);
- *ArcSWAT*: versão 2012.10\_2.19 (interface *ArcGIS* do *SWAT* para modelagem hidrológica);
- *SWAT-CUP 2012*: versão 5.1.6.2 (análise de sensibilidade, calibração e verificação do modelo);
- *WeatherDatabase*: versão 2018 (cálculos de parâmetros estatísticos de dados climáticos diários);
- *PcpSTAT*: versão 2003 (cálculos de parâmetros estatísticos de precipitação);
- *Microsoft Excel*: versão 2013 (tabulação de dados e gráficos);
- *Microsoft Word*: versão 2013 (desenvolvimento do texto da dissertação);
- *Notebook Samsung*: Intel Core i5-3230M; 2,6 GHz; 8,0 GB RAM; Intel HD Graphics 4000 (processamento dos dados).

### 3.2.2 Dados de Entrada do SWAT

Para elaborar a modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Indaiá, realizou-se, preliminarmente, um levantamento dos dados de entrada (input) necessários para executar o *SWAT*. Basicamente, coletou-se dados relativos à fisiografia e ao clima da bacia, os quais são apresentados nos *Quadro 5* e *Quadro 6* a seguir:

**Quadro 5: Informações técnicas dos dados espaciais levantados**

Tema	Informações Gerais	Sistema de Coordenadas	Sistema de Referência (Datum)	Escala Resolução	Ano Base	Fonte
<b>Modelo Digital de Elevação</b>	SRTM Global versão 3 (raster): S19W047V3, S19W046V3, S20W047V3, S20W046V3.	Geográfica	WGS-84 Altitude ortométrica EGM 96	30m	2014	SRTM/NASA USGS
<b>Solo</b>	Dado vetorial ( <i>shapefile</i> ) Folha SE-23	Geográfica	SIRGAS 2000	1:250.000	1987	RADAM BRASIL IBGE
<b>Uso e Cobertura do Solo</b>	Dado matricial ( <i>raster</i> ) Mosaico Cerrado Coleção 2 <i>MapBiomass</i>	Geográfica	SIRGAS 2000	30m 1:250.000	2007	LANDSAT MAPBIOMAS

Fonte: Autor (2019).

**Quadro 6: Informações técnicas dos dados alfanuméricos levantados**

Tema	Informações Gerais	Data da Série	Fonte
<b>Dados Climáticos</b>	Dados diários de temperatura máxima/mínima do ar (graus Celsius), insolação (horas) velocidade média do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%), de 3 (três) estações climatológicas convencionais do <i>INMET (Instituto Nacional de Meteorologia)</i> : Estação 83582 – Bambuí, Estação 83533 – Bom Despacho, Estação 83570 – Pompeu.	1988-2017	<i>INMET</i>
<b>Dados de Precipitação</b>	Dados diários de precipitação (mm) de 9 (nove) estações pluviométricas da <i>ANA (Agência Nacional de Águas)</i> : Estação 1845002 – Faz. São Félix, Estação 1845004 – Lagoa do Gouveia, Estação 1845014 – Tiros, Estação 1945002 – Barra do Funchal, Estação 1945019 – Dores do Indaiá, Estação 1945035 – Abaeté, Estação 1946000 – Tapiraí, Estação 1946009 – São Gotardo, Estação 1946020 – São José da Bela Vista.	1988-2017	<i>ANA</i>
<b>Dados de Descarga Líquida</b>	Dados diários de vazão (m <sup>3</sup> /s) de duas estações fluviométricas Estação 40930000 – Barra do Funchal ( <i>ANA</i> ) Estação 40963000 – Porto Indaiá ( <i>CEMIG</i> )	1988-2017	<i>ANA/CEMIG</i>
<b>Dados de concentração de sedimentos em suspensão</b>	Dados amostrais diários de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) de uma estação sedimentométrica da <i>CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais)</i> : Estação 40963000 – Porto Indaiá	1974-2013	<i>CEMIG</i>
<b>Parâmetros do Solo</b>	Propriedade físicas e químicas do solo: granulometria, profundidade, densidade, condutividade hidráulica etc., dos perfis de cada classe de solo da bacia.		Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013a), Ferrigo (2014),
<b>Parâmetros de Uso do Solo</b>	Características de uso e cobertura do solo e vegetação: crescimento vegetal, índice foliar etc., de cada classe de uso do solo da bacia.		Strauch e Volk (2013) Ferrigo (2014)

Fonte: Autor (2019).

### 3.3 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

O processo de modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Indaiá se iniciou com a construção da base de dados (espaciais e alfanuméricos) de entrada e parametrização dos bancos de dados internos do *SWAT*. Em seguida, inseriu-se estes dados na interface *ArcSWAT* para realizar a simulação em escala mensal das variáveis de interesse (vazão e descarga sólida total). Após a simulação inicial, procedeu-se no *SWAT-CUP* as etapas de análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e verificação do modelo. A **Figura 6** resume todo o processo conduzido neste trabalho.

**Figura 6:** Fluxograma das etapas de modelagem



Fonte: Autor (2019).

#### 3.3.1 Construção da Base de Dados (Espaciais e Alfanuméricos)

De posse de todos os dados espaciais levantados (*MDE*, Solo e Uso do Solo), realizou-se um pré-processamento no programa *ArcGIS* para compatibilização e integração dos dados, transformando-os de coordenadas geográficas para coordenadas planas métricas no sistema de projeção *UTM* (*Universal Transversa de Mercator*), Fuso 23 Sul, e datum *SIRGAS 2000* (*Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas*). De acordo com os dados disponíveis, definiu-se como escala de trabalho a escala 1:250.000.

Os dados alfanuméricos levantados (clima, precipitação, vazão, sedimentos, parâmetros de solo e parâmetros de uso e cobertura do solo) foram primeiramente editados, tabulados e organizados segundo o padrão do *ArcSWAT*. Os dados climáticos/pluviométricos foram transformados em tabelas apropriadas no formato *.txt*, que é o formato exigido pelo *ArcSWAT* para inserção desses dados. Já os dados de vazão e sedimentos foram editados e organizados em formatos adequados para serem utilizados no *SWAT-CUP* nas etapas de calibração e verificação do modelo. As

informações relativas às propriedades físicas e químicas dos solos e ao crescimento vegetal de cada uso do solo da bacia, pesquisadas na literatura, foram organizadas e transferidas para os bancos de entrada internos do *SWAT* (tabelas *UserSoil e Crop*), que contêm os valores dos parâmetros de solos e usos do solo da bacia em estudo. Esta etapa corresponde a parametrização do *SWAT* e foi tratado em item posterior.

A Base de Dados Espaciais/Georreferenciados foi organizada da seguinte forma:

- Dados Vetoriais (*Shapefile*): localização das estações climatológicas (*INMET*), pluviométricas (*ANA*), fluviométricas (*ANA*), e sedimentométrica (*CEMIG*), em coordenadas planas métricas no sistema de projeção *UTM*, Fuso 23 Sul, e *datum SIRGAS 2000*.
- Dados Matriciais (*Raster*): *MDE (SRTM/NASA)*; Mapa de Solo (*RadamBrasil/IBGE*); Mapa de Uso do Solo (*MapBiomass*), no mesmo sistema de referência e projeção dos dados vetoriais.

A Base de Dados Alfanuméricos foi organizada seguinte forma:

- Dados Climáticos: Série histórica de dados diários de temperatura máxima/mínima do ar (graus Celsius), radiação solar ( $\text{MJ/m}^2$ ), velocidade média do vento ( $\text{m/s}$ ) e umidade relativa do ar (%), de 3 (três) estações climatológicas convencionais do *INMET* localizadas próximas a bacia do rio Indaiá, do período de 1988 a 2017;
- Dados Pluviométricos: Série histórica de dados diários de precipitação ( $\text{mm}$ ), de 9 (nove) estações pluviométricas da *ANA*, do período de 1988 a 2017;
- Dados Fluviométricos: Série histórica de dados diários de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), de 2 (duas) estações fluviométricas (*ANA e CEMIG*), do período de 1988 a 2017;
- Dados Sedimentométricos: Dados amostrais diários de concentração de sedimentos em suspensão ( $\text{mg/L}$ ) de uma estação sedimentométrica da *CEMIG*, do período de 1974 a 2013.

A seguir, são apresentados os procedimentos realizados para garantir que a base de dados estivesse consistente com a realidade da área de estudo, ou seja, são descritos o pré-processamento realizado, as edições e transformações necessárias para compatibilização e integração dos dados, a organização e estruturação efetuada, entre outras informações relevantes.

### 3.3.1.1 Base de Dados Espaciais

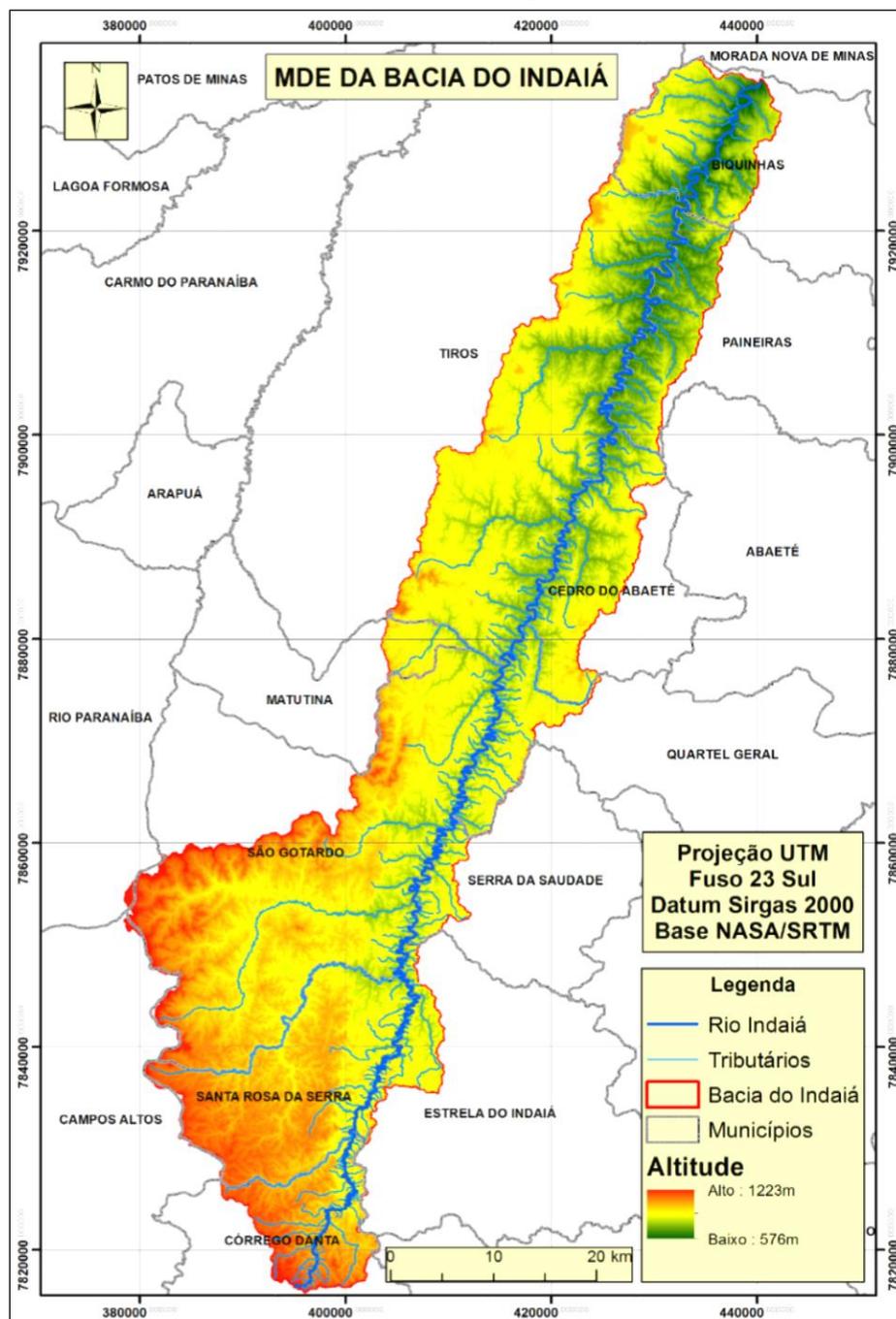
#### **Modelo Digital de Elevação**

Utilizou-se como *MDE (Modelo Digital de Elevação)* as imagens *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)* da *NASA (National Aeronautics and Space Administration)*,

disponibilizadas pela *USGS (United States Geological Survey)*, com resolução espacial de 30 m e coordenadas geográficas no sistema de referência *WGS-84*.

Para o recobrimento da área de estudo foram obtidas 4 (quatro) cenas do *SRTM Global – versão 3* (ano 2014). Primeiramente, gerou-se um mosaico no *ArcGIS* com estas cenas, em seguida realizou-se um recorte da área de estudo (bacia do rio Indaiá). E por fim, reprojetoou-se o *MDE* recortado para o sistema adotado neste projeto (*UTM, Fuso 23 Sul, SIRGAS 2000*), o qual é apresentado na *Figura 7*.

**Figura 7: Modelo digital de elevação da bacia do Indaiá**



Fonte: Autor (2019) utilizando SRTM/NASA (2014) disponibilizado pela USGS.

Com relação ao *MDE (Modelo Digital de Elevação)* gerado para bacia do rio Indaiá, cabe destacar que os dados *SRTM/NASA* são gerados com interferometria de radar das bandas C e X, e os valores de elevação só representam o terreno em espaços abertos. Em áreas com vegetação ou edificações, as ondas de radar (nesses comprimentos de onda) não penetram, de modo que a elevação do *SRTM* é da superfície acrescida da altura do objeto (árvore ou edificação). Desse modo, não é correto dizer que o *SRTM* seja um *MDE*, mas sim um *MDS* (GROHMANN, 2015).

Segundo vários autores, entre eles Correa *et al.* (2017), o *MDT (Modelo Digital do Terreno)* que reflete especificamente a superfície topográfica do terreno é chamado de *MDE (Modelo Digital de Elevação)*. Já o *MDS (Modelo Digital de Superfície)* representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela e que influencia no valor da reflectância do pixel (como dosséis de vegetação, construções etc.). Como a bacia do rio Indaiá pertence ao bioma Cerrado, e a vegetação arbustiva é baixa, é possível que a influência desta no delineamento da rede de drenagem utilizando o *SRTM* seja mínimo, porém isto não foi avaliado neste trabalho.

### Mapa de Solos

Utilizou-se como dado espacial de solo o arquivo vetorial (*shapefile*) do *Projeto RadamBrasil* (1987), disponibilizado pelo *IBGE* (2018) por meio da Folha SE-23 (Belo Horizonte) na escala 1:250.000, com coordenadas geográficas no sistema de referência *SIRGAS 2000*. Escolheu-se este arquivo vetorial por abranger a região do Alto São Francisco, onde está inserida a bacia do rio Indaiá.

De posse da Folha SE-23, realizou-se no *ArcGIS* um recorte da área de estudo (bacia do Indaiá). Em seguida, reprojeteu-se o arquivo recortado para o sistema adotado neste projeto (*UTM, Fuso 23 Sul, SIRGAS 2000*). Depois, efetuou-se a junção das feições de mesma classe por meio da função *Merge* do *ArcGIS* para gerar polígonos homogêneos de solo. Em seguida, realizou-se a reclassificação das classes de solos do *RadamBrasil* para as classes associadas ao *SWAT*, renomeando adequadamente as classes de solo existentes na bacia do rio Indaiá (**Tabela 4**).

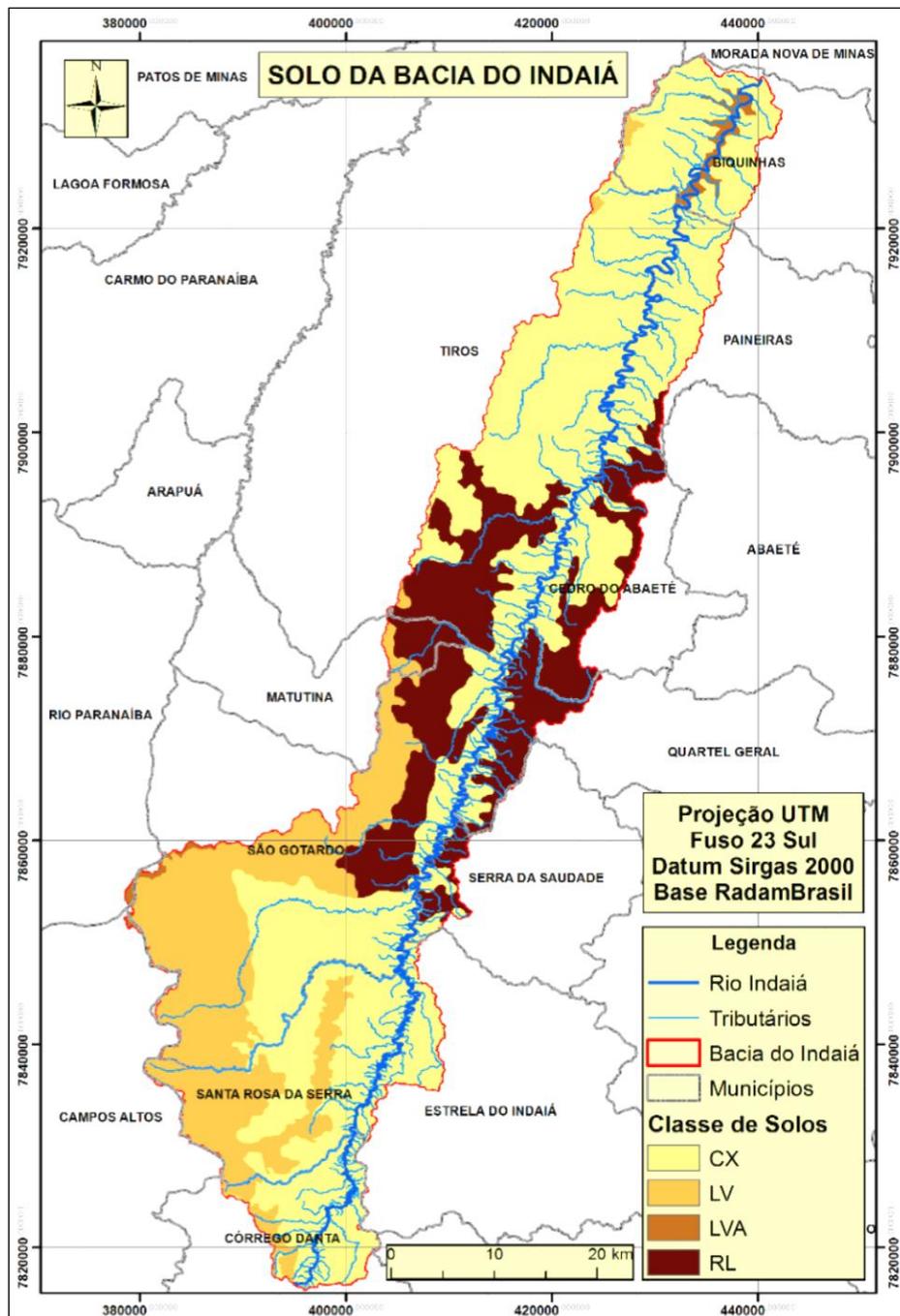
**Tabela 4:** Reclassificação dos solos para as classes do *SWAT*

Classes Solo RadamBrasil	Classes Solo SWAT	Valor Pixel	Porcentagem (%)	Área (km <sup>2</sup> )
Cambissolo	CX	1	59	1314
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	2	1	29
Latossolo Vermelho	LV	3	21	459
Neossolo Litólico	RL	4	19	421

Fonte: Autor (2019).

Por último, transformou-se o arquivo vetorial editado (*shapefile*) para o formato matricial (*raster*), com resolução espacial de 30 m, o qual é apresentado na **Figura 8**.

**Figura 8:** Mapa de solos da bacia do Indaiá



Fonte: Autor (2019) utilizando RadamBrasil (1986) disponibilizado pelo IBGE.

Constatou-se que em torno de 59 % (1314 km<sup>2</sup>) do solo da bacia do rio Indaiá é da classe *Cambissolo* (CX), 21 % (459 km<sup>2</sup>) da classe *Latossolo Vermelho* (LV), 19 % (421 km<sup>2</sup>) de *Neossolo Litólico* (RL), e somente um 1 % (29 km<sup>2</sup>) de *Latossolo Vermelho-Amarelo* (LVA).

## Mapa de Uso e Cobertura do Solo

Utilizou-se como dado espacial de uso e cobertura do solo o arquivo matricial (*raster*) do *Projeto MapBiomias (2019)*, Bioma Cerrado, Coleção 2 (SOUZA; AZEVEDO, 2017), para o ano base 2007, com resolução espacial de 30 m e coordenadas geográficas no sistema de referência *SIRGAS 2000*.

O *MapBiomias (Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil)* é um projeto interinstitucional de mapeamento e quantificação das mudanças na cobertura do solo dos biomas brasileiros. Todos os mapas anuais de cobertura e uso do solo são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens das séries Landsat 5, 7 e 8 (sensores TM, ETM+ e OLI, respectivamente), e disponibilizados com resolução espacial de 30m. O processamento é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) por meio da plataforma *Google Earth Engine* que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem (SOUZA; AZEVEDO, 2017).

Assim, de posse do mosaico do Cerrado, realizou-se no *ArcGIS* um recorte da área de estudo (bacia do Indaiá). Em seguida, efetuou-se a reclassificação das classes de uso e cobertura do solo do *MapBiomias* para as classes associadas ao *SWAT (Tabela 5)*.

**Tabela 5:** *Reclassificação do uso do solo para as classes do SWAT*

Classes Uso MapBiomias	Classes Uso SWAT	Valor Pixel	Porcentagem (%)	Área (km <sup>2</sup> )
Floresta Densa – Mata de Galeria	MATA	3	36,8	818
Floresta Aberta – Cerrado	CERR	4	13,4	298
Silvicultura – Eucalipto	EUCA	9	0,01	0,3
Vegetação Campestre – Campo	CAMP	12	11,1	248
Pastagem	PAST	15	38,5	855
Culturas Anuais	AGRL	19	0,13	2,8
Culturas Semi-Perene – Cana de Açúcar	SUGC	20	0,01	0,25
Corpos D'água	WATR	26	0,04	0,95

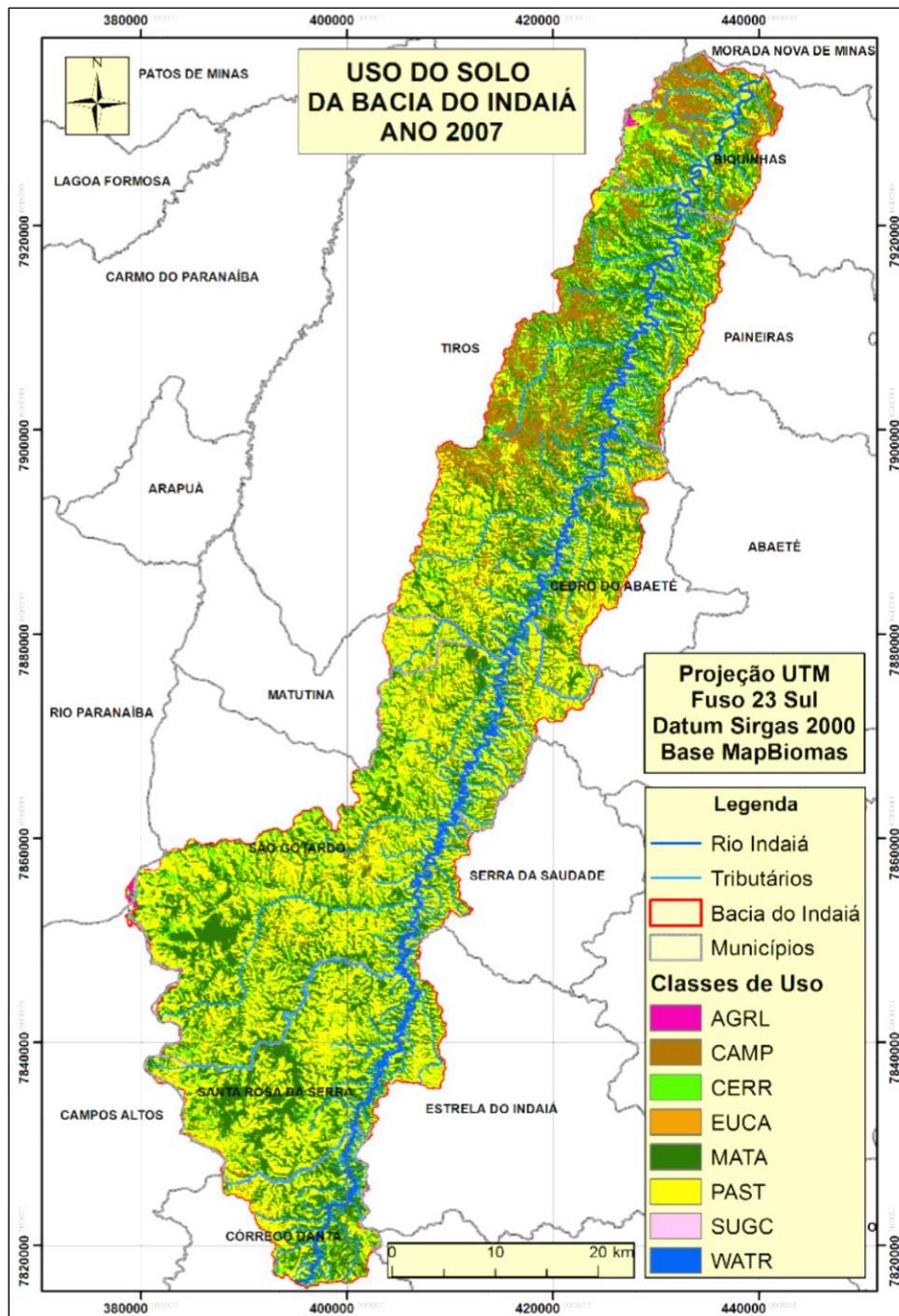
Fonte: Autor (2019).

Por fim, reprojeteu-se o arquivo matricial recortado e editado para o sistema adotado neste projeto (*UTM, Fuso 23 Sul, SIRGAS 2000*), o qual é apresentado na **Figura 9**.

Constatou-se que para o ano de 2007, as classes que mais se destacavam eram: Pastagem (39 %), Mata de Galeria (37 %); Cerrado (13 %) e Campo (11 %). As classes Culturas Anuais, Culturas Semi-Perene, Silvicultura e Corpos d'Água foi de apenas 1%. É necessário considerar que a classe

Pastagem foi superestimada, pois na classificação do *MapBiomias* esta classe muitas vezes se mistura com agricultura, e a classe de cultura anuais foi subestimada.

**Figura 9:** Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do Indaiá



Fonte: Autor (2019) utilizando MapBiomias (ano 2007).

A seleção da imagem do ano de 2007 foi baseada no intervalo temporal dos dados pluviométricos (precipitação) e fluviométricos (vazão) disponíveis na região, uma vez que os dados estavam consistidos somente até esse ano.

### 3.3.1.2 Base de Dados Alfanuméricos

#### Dados Climatológicos

Utilizou-se como dados climatológicos a série histórica de dados diários de temperatura máxima/mínima do ar (graus Celsius), radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>), velocidade média do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%), obtidos de 3 (três) estações climatológicas convencionais do *INMET* (*Instituto Nacional de Meteorologia*) localizadas próximas a bacia do rio Indaiá (**Figura 5**), do período de 01/01/1988 a 31/12/2017. Informações sobre as estações climatológicas utilizadas neste estudo podem ser vistas na **Tabela 6**.

**Tabela 6:** Estações climatológicas do *INMET* utilizados no estudo

Estação (nº)	Estação (código)	Estação (nome)	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Elevação (m)
1	83533	Bom Despacho	-19,68	-45,36	695,00
2	83570	Pompeu	-19,21	-45,00	690,91
3	83582	Bambuí	-20,03	-45,00	661,27

Fonte: Autor (2019).

Cabe salientar que estas estações convencionais só tinham dados a partir de 1988, por isso que o período da série de dados climatológicos utilizado neste estudo foi de 01/01/1988 a 31/12/2017. Outro ponto importante a destacar é que as estações convencionais do *INMET* não fornecem dados de radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>), o qual é necessário no *SWAT*, e sim de insolação diária (horas), o que exigiu uma transformação de unidades, realizada por meio da equação apresentada por Dantas, Carvalho e Ferreira (2003):

$$R_s = R_a * \left( a + b * \frac{n}{N} \right) \quad (\text{Equação 21})$$

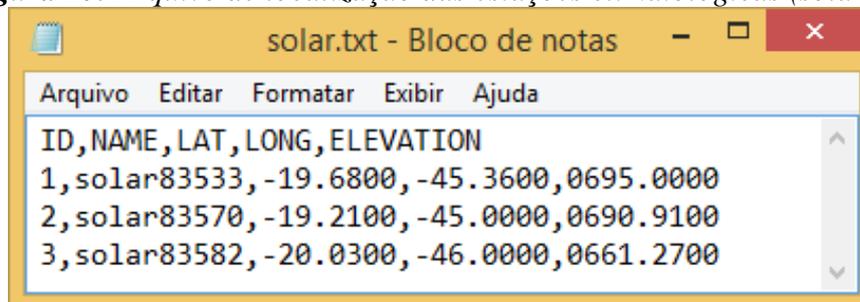
Onde:  $R_s$  é a radiação solar global recebida na superfície terrestre (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $R_a$  é a radiação total recebida em uma superfície plana e horizontal, na ausência da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $n$  é insolação diária (horas);  $N$  é o comprimento astronômico do dia (horas);  $a$  e  $b$  são parâmetros de regressão do modelo que caracterizam a transmitância atmosférica. Foi utilizado os valores propostos pela FAO ( $a = 0,25$  e  $b = 0,50$ ).

Após realizar a edição, transformação de unidades e organização desses dados, verificou-se que algumas datas da série histórica apresentavam falhas (valores sem registro), as quais foram preenchidas com valores médios obtidos de estações vizinhas, seguindo a metodologia apresentada por Tucci (2012). Porém, em algumas datas sem registro, não foi possível realizar o procedimento de preenchimento de falhas com valores médios, devido a inexistência de dados vizinhos. Nestes casos, o preenchimento foi realizado posteriormente, na etapa de inserção dos dados

climatológicos, por meio do Gerador Climático do *SWAT*, o qual utiliza parâmetros estatísticos climáticos locais para simular dados diários inexistentes. Estes parâmetros são detalhados no item *3.3.2.3 Bancos de Dados Climáticos (WGEN)*.

Depois de realizado o preenchimento de falhas, criou-se vários arquivos no formato *.txt* para serem utilizados no *SWAT* na etapa de inserção dos dados climatológicos. Para cada fenômeno climático (radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento), criou-se um arquivo de entrada *.txt* contendo informações das estações utilizadas como: identificação, nome, localização e elevação. Gerou-se os seguintes arquivos: *solar.txt*; *tmp.txt*, *ur.txt* e *vento.txt*. Um exemplo do arquivo gerado para radiação solar é mostrado na **Figura 10**.

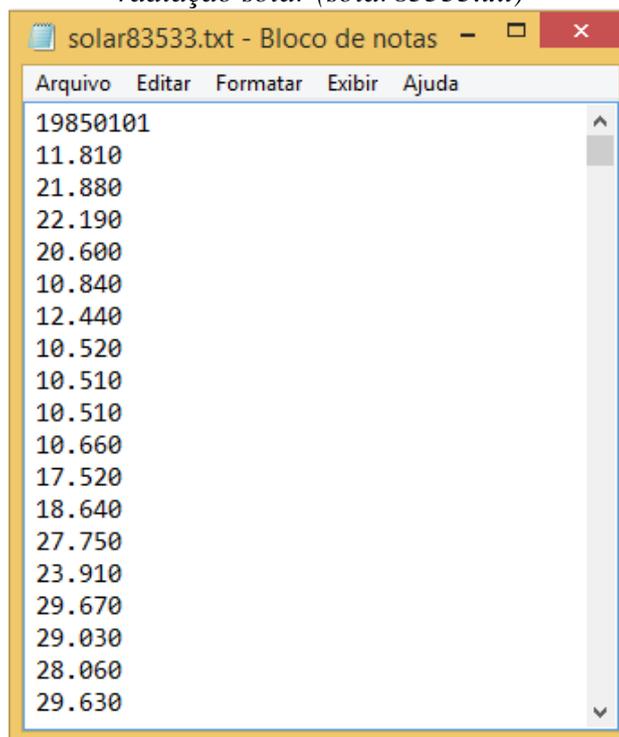
**Figura 10:** Arquivo de localização das estações climatológicas (*solar.txt*)



Para cada estação climatológica, criou-se 4 (quatro) arquivos de entrada *.txt* referentes à série de dados climatológicos diários dos 4 (quatro) fenômenos climáticos no período de 01/01/1985 a 31/12/2017. Como pode se ver, foi acrescentado mais 3 anos de dados no início da série para serem utilizados na etapa de aquecimento do modelo (*warm up*). Como esse período serve para retirar das variáveis de entrada a influência das condições iniciais, e não influi nos valores da função objetivo escolhida, foi repetido os dados climatológicos de 1988 a 1990 nos 3 (três) anos de aquecimento (1985 a 1987).

Assim, gerou-se ao todo 12 arquivos: *solar83533.txt*; *solar83570.txt*; *solar83582.txt*; *tmp83533.txt*; *tmp83570.txt*; *tmp83582.txt*; *ur83533.txt*, *ur83570.txt*; *ur83582.txt*; *vento83533.txt*, *vento83570.txt*; e *vento83582.txt*. Um exemplo de parte do arquivo gerado para série de dados diários de radiação solar obtidos da estação climatológica Bom Despacho (83533) é mostrado na **Figura 11**.

**Figura 11:** Arquivo da série de dados diários de radiação solar (*solar83533.txt*)



### Dados Pluviométricos

Utilizou-se como dados pluviométricos a série histórica de dados diários de precipitação (mm), obtidos de 9 (nove) estações pluviométricas da ANA (*Agência Nacional de Águas*) localizadas dentro ou próximas da bacia do rio Indaiá (*Figura 5*), do período de 01/01/1988 a 31/12/2017. Informações sobre as estações pluviométricas utilizadas são apresentadas na *Tabela 7*.

**Tabela 7:** Estações pluviométricas da ANA utilizados no estudo

Estação (nº)	Estação (código)	Estação (nome)	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Elevação (m)
1	1845002	Faz. São Félix	-18,46	-45,65	760,00
2	1845004	Lagoa do Gouveia	-18,84	-45,85	1035,00
3	1845014	Tiros	-19,00	-45,97	1030,00
4	1945002	Barra do Funchal	-19,39	-45,88	720,00
5	1945019	Dores do Indaiá	-19,47	-45,60	692,00
6	1945035	Abaeté	-19,16	-45,44	565,00
7	1946000	Tapiraí	-19,88	-46,03	670,00
8	1946009	São Gotardo	-19,32	-46,04	1087,00
9	1946020	São José da Bela Vista	-19,53	-46,10	1150,00

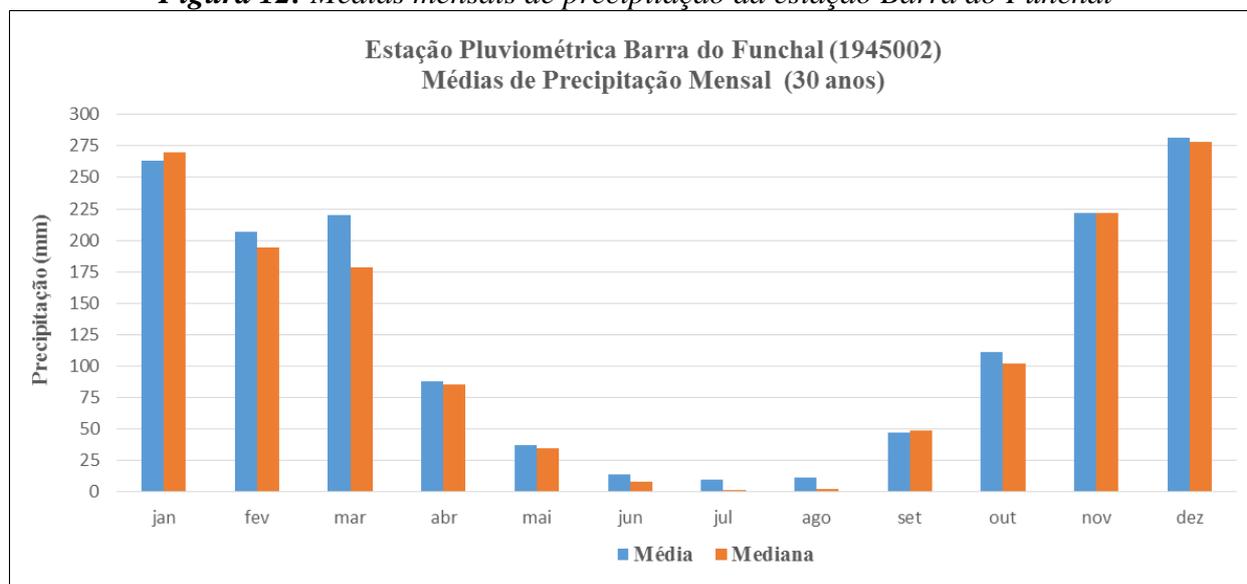
Fonte: Autor (2019).

Realizou-se o mesmo procedimento de preenchimento de falhas das lacunas dos dados pluviométricos, as quais foram preenchidas com valores médios obtidos de estações vizinhas,

seguindo a metodologia apresentada por Tucci (2012). Da mesma forma, gerou-se também vários arquivos no formato *.txt* para serem utilizados no *SWAT* na etapa de inserção dos dados de chuva. Criou-se um arquivo de entrada, chamado *pcp.txt*, contendo informações das estações pluviométricas utilizadas, como: identificação, nome, localização e elevação. Para cada estação pluviométrica, criou-se um arquivo de entrada *.txt* referente a série de dados diários de precipitação no período de 01/01/1985 a 31/12/2017 (com o período de aquecimento de 3 anos acrescentado). Assim, gerou-se ao todo 9 arquivos: *p1845002.txt*; *p1845004.txt*; *p1845014.txt*; *p1945002.txt*; *p1945019.txt*; *p1945035.txt*; *p1946000.txt*; *p1946009.txt*; e *p1946020.txt*.

Como exemplo, é apresentado na **Figura 12** as médias mensais de precipitação (mm) dos últimos 30 anos (1987-2017) da estação pluviométrica Barra do Funchal. Das estações pluviométricas utilizadas no estudo, somente a estação Barra do Funchal localiza-se na margem do rio Indaiá. Percebe-se que os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro, e os meses mais secos são junho, julho e agosto. Esta distribuição pluviométrica é típica do bioma cerrado, no qual a bacia do rio Indaiá está inserida.

**Figura 12:** Médias mensais de precipitação da estação Barra do Funchal



Fonte: Autor (2019).

### Dados de Descarga Líquida (Vazão)

Utilizou-se como dados fluviométricos (descarga líquida) a série histórica de dados diários de vazão ( $m^3/s$ ), obtidos de 2 (duas) estações fluviométricas (**Figura 5**): Barra do Funchal (40930000) pertencente a ANA (Agência Nacional de Águas), e Porto Indaiá (40963000), localizada próximo ao exutório da bacia do rio Indaiá, sob cuidados da CEMIG (Companhia Energética de Minas

*Gerais*), do período de 01/01/1988 a 31/12/2017, definido com base no período da série de dados climatológicos disponíveis na região.

Como a vazão não é um dado de entrada do *SWAT*, e sim uma variável que é simulada a partir dos dados climatológicos e pluviométricos da região da bacia, este dado foi utilizado somente na etapa de calibração (1988 a 2007) e verificação (2008 a 2017) do modelo hidrossedimentológico, por meio da comparação e ajuste do valor simulado com o valor observado.

### **Dados de Descarga Sólida Total de Sedimentos**

Assim como a vazão, a descarga sólida total de sedimentos (ton/mês) não é um dado de entrada do *SWAT*, e sim uma variável que também é simulada. Este dado foi utilizado somente na etapa de calibração (1988 a 2007) e verificação (2008 a 2017) do modelo hidrossedimentológico depois de ter sido calibrado e validado o modelo para simulação da variável vazão.

Porém, ocorre que não existiam na bacia do rio Indaiá dados observados de descarga sólida total de sedimentos, e isto foi um grande entrave no desenvolvimento deste trabalho. Para contornar este problema foi solicitado à *CEMIG* dados amostrais de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) da estação sedimentométrica Porto Indaiá (40963000), os quais foram disponibilizados somente no período de 1974 a 2013, não existindo dados mais recentes.

Assim, por meio das amostras de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) e dos dados de vazão (m<sup>3</sup>/s) correspondente ao dia da coleta da amostra, utilizou-se a metodologia apresentada por Carvalho (2008) para obter os dados diários de descarga sólida em suspensão (ton/dia).

$$Q_{ss}=0,0864*C_{ss}*Q \quad (\text{Equação 22})$$

$$Q_{ss}=a*Q^b \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:  $Q_{ss}$  é a descarga sólida em suspensão diária (ton/dia);  $C_{ss}$  é a amostra diária de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L);  $Q$  é vazão diária (m<sup>3</sup>/s);  $a$  e  $b$  são constantes obtidas pela curva-chave de sedimentos.

Com os dados observados de vazão ( $Q$ ) e os dados de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) calculados pela **Equação 22** para algumas amostras diárias, gerou-se um gráfico que corresponde a curva-chave de sedimentos em suspensão. Por meio desta curva encontrou-se uma equação, similar a **Equação 23**, que possibilitou determinar a *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) com base na *vazão* ( $Q$ ) e nas constantes da curva ( $a$  e  $b$ ). Assim, calculou-se para a toda série histórica de

dados diários de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) disponível (1985 a 2017) os dados diários de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ).

Para realizar a calibração hidrossedimentológica (vazão e sedimentos) no *SWAT-CUP*, é necessário utilizar os dados de *descarga sólida total* ( $Q_{st}$ ), os quais foram obtidos aplicando uma relação de 10% de *descarga sólida de fundo* ( $Q_{sf}$ ) e 90% de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ), sendo a *descarga sólida total* ( $Q_{st}$ ) igual a soma de  $Q_{ss}$  e  $Q_{sf}$ , conforme explica Carvalho (2008).

Os dados diários de *descarga sólida total* (ton/dia) foram então transformados para dados mensais (ton/mês), somando os valores diários de cada mês, para serem utilizados na calibração e verificação hidrossedimentológica.

### 3.3.2 Parametrização dos Bancos de Dados de Entrada do SWAT

Para poder utilizar o *SWAT* de forma eficiente e obter bons resultados nas simulações hidrológicas, é necessário que os seus bancos de dados internos sejam adaptados para as condições ambientais e climáticas da área de estudo proposta, neste caso, a bacia do rio Indaiá, uma vez que o banco de dados original do programa, na extensão *MDB* (*Microsoft Access Database*), contém somente informações climáticas e pedológicas dos *EUA*.

Esta adaptação do *MDB* original para realidade local da região de estudo, corresponde a etapa de parametrização do *SWAT*, onde novos valores das propriedades físicas e químicas de solos e de usos e coberturas do solo, além de parâmetros climáticos estatísticos, são incluídos nos respectivos bancos de dados internos do *SWAT*.

A adaptação dos parâmetros foi realizada nos seguintes bancos do *SWAT*:

- *UserSoil*: parâmetros das propriedades físicas e químicas dos perfis de solos;
- *Crop*: parâmetros de crescimento da vegetação de cada tipo de uso e cobertura do solo;
- *Wgen*: parâmetros climáticos estatísticos necessários para utilizar o gerador de clima do *SWAT*.

#### 3.3.2.1 Bancos de Dados de Solos (*UserSoil*)

O banco de dados *UserSoil* contém os parâmetros relacionados às propriedades físicas e químicas dos solos (**Quadro 7**).

**Quadro 7: Parâmetros de solos do banco de dados do SWAT (UserSoil)**

Parâmetro	Definição	Unidade	Referências
NLAYERS	Número de camadas do solo	na	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
HYDGRP	Grupo Hidrológico do Solo (A, B, C ou D)	na	Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005)
SOL_ZMX	Profundidade máxima de enraizamento	(mm)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
ANION_EXCL	Potencial de fraturamento do solo (espaço vazio)	(fração)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
SOL_CRK	Volume de rachaduras potenciais	(fração)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
TEXTURE	Textura da camada do Solo	na	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
SOL_Z	Profundidade da superfície do solo até o fundo da camada	(mm)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
SOL_BD	Densidade do volume úmido	(g/cm <sup>3</sup> )	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada do solo	(mm/mm)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada	(mm/hr)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico	(%)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
CLAY	Teor de argila	(%)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
SILT	Teor de silte	(%)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
SAND	Teor de areia	(%)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
ROCK	Teor de fragmentos de rocha	(%)	RadamBrasil (1987), Baldissera (2005)
SOL_ALB	Albedo do solo úmido	(adm)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo da equação USLE (K)	0,013 (ton m <sup>2</sup> hr) / (m <sup>3</sup> ton cm)	Baldissera (2005), Lima <i>et al.</i> (2013), Ferrigo (2014)

Fonte: Adaptado de Neitsch *et al.* (2011).

Os valores desses parâmetros correspondentes aos 4 tipos de solos presentes na bacia do rio Indaiá (Cambissolo (CX), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Neossolo Litólico (RL)), foram obtidos de publicações relacionadas a estudos do solo do Bioma Cerrado, e inseridos no Banco de Dados de Solos do SWAT (UserSoil).

Para agrupar os solos de acordo com as características hidrológicas foi utilizada a classificação apresentada por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para os solos brasileiros. Os autores agregam as classes de solos em quatro grupos hidrológicos distintos (A, B, C e D). Pela classificação apresentada, os 4 tipos de solos presentes na bacia do Indaiá foram agrupados nas seguintes classes: A (Latosolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo), C (Cambissolo) e D (Neossolo Litólico). Não há solos na bacia pertencentes ao grupo hidrológico B.

Os valores dos parâmetros de profundidade de enraizamento (*SOL\_ZMX*), profundidade do solo (*SOL\_Z*), teor de carbono (*SOL\_CBN*), teor de argila (*CLAY*), teor de silte (*SILT*), teor de areia (*SAND*), teor de rocha (*ROCK*) foram retirados de RadamBrasil (1987) para Cambissolo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, e de Baldissera (2005) para o Neossolo Litólico.

Os valores dos parâmetros de porosidade (*ANION\_EXCL*), potencial de fraturamento (*SOL\_CRK*), Textura (*TEXTURE*), densidade (*SOL\_BD*), capacidade de água disponível (*SOL\_AWC*), condutividade hidráulica saturada (*SOL\_K*), albedo (*SOL\_ALB*), fator de erodibilidade do solo (*USLE\_K*), foram obtidos de Baldissera (2005) para o Neossolo Litólico, e de Lima *et al.* (2013) e Ferrigo (2014) para Cambissolo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo.

Os valores dos parâmetros físicos e químicos dos solos da bacia do rio Indaiá (*UserSoil*) são apresentados no **APÊNDICE D**.

### 3.3.2.2 Bancos de Dados de Uso do Solo (Crop)

O banco de dados *Crop* contém os parâmetros relacionados ao crescimento da vegetação dos diversos usos e coberturas de solo existentes (**Quadro 8 e Quadro 9**).

**Quadro 8: Parâmetros de crescimento vegetal do banco de dados do SWAT (Crop) - Continua**

Parâmetro	Definição	Unidade	Referências
<b>CROPNAME</b>	Nome do Uso ou cultura	na	
<b>BIO_E</b>	Eficiência do uso da radiação ou taxa de energia-biomassa	(kg/ha)/(MJ/m <sup>2</sup> )	Strauch e Volk (2013)
<b>HVSTI</b>	Índice de colheita para condições ideais de crescimento	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>BLAI</b>	Índice máximo de área foliar potencial	(adm)	Strauch e Volk (2013)
<b>FRGRW1</b>	Fração da época de crescimento da planta ou fração do total de unidades de calor potencial correspondentes ao 1º ponto na curva ideal de desenvolvimento da área foliar	(fração)	Strauch e Volk (2013)
<b>LAIMX1</b>	Fração do índice máximo de área foliar correspondente ao 1º ponto na curva ótima de desenvolvimento da área foliar	(fração)	Strauch e Volk (2013)
<b>FRGRW2</b>	Fração da época de crescimento da planta ou fração do total de unidades de calor em potencial correspondente ao 2º ponto na curva ideal de desenvolvimento da área foliar	(fração)	Strauch e Volk (2013)
<b>LAIMX2</b>	Fração do índice máximo de área foliar correspondente ao 2º ponto na curva ótima de desenvolvimento da área foliar	(fração)	Strauch e Volk (2013)
<b>DLAI</b>	Fração da época de crescimento, quando a área foliar começa a declinar.	(fração)	Strauch e Volk (2013)
<b>CHTMX</b>	Altura máxima do dossel	(m)	Ferrigo (2014)
<b>RDMX</b>	Profundidade máxima da raiz	(m)	Ferrigo (2014)
<b>T_OPT</b>	Temperatura ideal para o crescimento das plantas	(°C)	Ferrigo (2014)
<b>T_BASE</b>	Temperatura mínima (base) para o crescimento das plantas	(°C)	Strauch e Volk (2013)
<b>CNYLD</b>	Fração normal de nitrogênio na colheita	(kg N/kg colheita)	Ferrigo (2014)
<b>CPYLD</b>	Fração normal de fósforo na colheita	(kg P/kg colheita)	Ferrigo (2014)
<b>BN1</b>	Parâmetro de absorção de nitrogênio #1: fração normal de nitrogênio na biomassa da planta no período de emergência da mesma	(kg N/kg biomassa)	Ferrigo (2014)
<b>BN2</b>	Parâmetro de absorção de nitrogênio #2: fração normal de nitrogênio na biomassa da planta no período de 50% de maturidade da mesma	(kg N/kg biomassa)	Ferrigo (2014)

**Quadro 9: Parâmetros de crescimento vegetal do banco de dados do SWAT (Crop) - Conclusão**

Parâmetro	Definição	Unidade	Referências
<b>BN3</b>	Parâmetro de absorção de nitrogênio #3: fração normal de nitrogênio na biomassa da planta no período de maturidade da mesma	(kg N/kg biomassa)	Ferrigo (2014)
<b>BP1</b>	Parâmetro de absorção de fósforo #1: fração normal de fósforo na biomassa da planta no período de emergência da mesma	(kg P/kg biomassa)	Ferrigo (2014)
<b>BP2</b>	Parâmetro de absorção de fósforo #2: fração normal de fósforo na biomassa da planta no período de 50% de maturidade da mesma	(kg P/kg biomassa)	Ferrigo (2014)
<b>BP3</b>	Parâmetro de absorção de fósforo #3: fração normal de fósforo na biomassa da planta no período de maturidade da mesma	(kg P/kg biomassa)	Ferrigo (2014)
<b>WSYF</b>	Limite inferior do índice de colheita	((kg/ha)/(kg/ha))	Ferrigo (2014)
<b>USLE_C</b>	Valor mínimo do fator C da USLE para a erosão hídrica aplicável à cobertura do solo ou tipo de planta	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>GSI</b>	Condutância estomatal máxima em alta radiação solar e baixo déficit de pressão de vapor	(m·s <sup>-1</sup> )	Strauch e Volk (2013)
<b>VPDFR</b>	Déficit de pressão de vapor correspondente ao segundo ponto na curva de condutância estomatal	(kPa)	Strauch e Volk (2013)
<b>FRGMAX</b>	Fração da condutância estomatal máxima correspondente ao segundo ponto na curva de condutância estomatal	(fração)	Ferrigo (2014)
<b>WAVP</b>	Taxa de declínio na eficiência do uso de radiação por unidade de aumento no déficit de pressão de vapor	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>CO2HI</b>	Concentração atmosférica elevada de CO <sub>2</sub> correspondente ao 2º ponto na curva de eficiência do uso de radiação	(μL CO <sub>2</sub> /L de ar)	Ferrigo (2014)
<b>BIOEHI</b>	Relação biomassa-energia correspondente ao 2º ponto na curva de eficiência do uso de radiação	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>RSDCO_PL</b>	Coefficiente de decomposição de resíduos vegetais	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>OV_N</b>	Coefficiente de Manning para escoamento superficial	(m <sup>-1/3</sup> .s)	Ferrigo (2014)
<b>CN2A</b>	Variações da Curva-Número	(adm)	Strauch e Volk (2013)
<b>CN2B</b>			
<b>CN2C</b>			
<b>CN2D</b>			
<b>FERTFIELD</b>	Indica quando há fertilização da cultura	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>ALAI_MIN</b>	Índice mínimo de área foliar para plantas durante período de dormência	(m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Strauch e Volk (2013)
<b>BIO_LEAF</b>	Fração da biomassa acumulada a cada ano que é convertida em resíduo durante a dormência	(fração)	Ferrigo (2014)
<b>MAT_YRS</b>	Número de anos necessários para as espécies arbóreas atingirem o pleno desenvolvimento	(anos)	Ferrigo (2014)
<b>BMX_TREES</b>	Biomassa máxima para uma floresta	(ton/ha)	Ferrigo (2014)
<b>EXT_COEF</b>	Coefficiente de radiação fotossintética interceptada	(adm)	Ferrigo (2014)
<b>BM_DIEOFF</b>	Fração de morte da biomassa	(fração)	Ferrigo (2014)

Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011).

Os valores desses parâmetros correspondentes aos 8 tipos de uso e cobertura do solo presentes na bacia do rio Indaiá (Mata de Galeria (MATA), Cerrado (CERR), Campo (CAMP), Pastagem (PAST), Silvicultura (EUCA), Culturas Anuais (AGRL), Culturas Semi-Perene (SUGC), e Corpos D'água (WATR)), foram obtidos de publicações relacionadas a estudos da vegetação do Bioma Cerrado, e inseridos no Banco de Dados de Uso do Solo do SWAT (Crop).

Para as classes de Mata de Galeria (MATA), Cerrado (CERR) e Campo (CAMP), os valores dos parâmetros *BIO\_E*, *BLAI*, *FRGRW1*, *LAIMX1*, *FRGRW2*, *LAIMX2*, *DLAI*, *T\_BASE*, *GSI*, *VPDFR*, *CN* e *ALAI\_MIN* foram retirados de Strauch e Volk (2013), o restante dos valores dos parâmetros foi obtido de Ferrigo (2014).

Para as classes de Pastagem (PAST), Silvicultura (EUCA), Culturas Anuais (AGRL), Culturas Semi-Perene (SUGC), e Corpos D'água (WATR), utilizou-se os valores padrão (*default*) da base original do SWAT. Os valores dos parâmetros de crescimento vegetal dos usos e coberturas de solo da bacia do rio Indaiá (*Crop*) são apresentados no **APÊNDICE E**.

### 3.3.2.3 Bancos de Dados Climáticos (WGEN)

O SWAT possui um modelo Gerador Climático capaz de simular dados climatológicos inexistentes a partir de parâmetros estatísticos climáticos locais. O banco de dados de entrada do Gerador Climático, o WGEN, deve conter vários dados estatísticos de estações locais necessários para simular os dados climatológicos diários (**Quadro 10**), os quais são gerados em duas situações: quando é especificado que os dados irão ser gerados, ou quando algum dado é inexistente.

**Quadro 10:** Parâmetros estatísticos climáticos do gerador de clima do SWAT (WGEN)

Parâmetro	Descrição
<b>Temperatura</b>	
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
<b>Precipitação</b>	
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
<b>Outros</b>	
SOLARAV	Radiação solar média por mês
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho
WDAV	Velocidade média do vento

Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011).

Essas estatísticas foram obtidas por meio de ferramentas disponibilizadas no site oficial do SWAT (*WeatherDatabase e PcpSTAT*), que utilizam informações básicas das estações climatológicas e pluviométricas existentes na região de estudo para calcular os dados estatísticos climáticos. As estatísticas calculadas foram inseridas no Banco de Dados Climáticos do SWAT (WGEN). Os valores dos parâmetros estatísticos climáticos das estações utilizadas na bacia (WGEN) são apresentados no **APÊNDICE F**.

### 3.3.3 Delineamento da Bacia e Geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs)

Os primeiros processamentos realizados pelo *SWAT* são relacionados ao delineamento da bacia estudada, feito a partir do *MDE (Modelo Digital de Elevação)* da área de estudo (**Figura 7**). O *SWAT* executa esta etapa utilizando ferramentas de hidrologia do *ArcGIS*. Assim, basta o usuário informar o ponto do exutório da bacia para que o *SWAT* realize o processamento da área e formato da bacia, delimitação dos cursos d'água, divisão em sub-bacias, declividade, direção do fluxo e pontos de acumulação de água.

Em relação ao delineamento da rede hídrica, seu nível de detalhamento pode ser configurado pelo usuário. No nível máximo de detalhamento a ferramenta inclui trechos efêmeros dos rios modelados, gerando grande quantidade de sub-bacias. Há uma série de estudos com *SWAT* que aproveitam essa ferramenta para comparar os resultados da simulação com maior ou menor quantidade de sub-bacias dentro da área estudada. Jha *et al.* (2004) elaboraram estudo exclusivamente para avaliar o efeito da discretização da bacia nos resultados do *SWAT*. Segundo esses autores, a divisão ótima indica que as sub-bacias devem ter entre 2 e 6% do tamanho da área estudada.

No presente trabalho, para fins de análise comparativa foram testados 3 (três níveis) de detalhamento da rede hídrica: com maior detalhamento (18 sub-bacias), com menor (apenas 2 sub-bacias), e com 14 sub-bacias. Na **Tabela 8** é apresentado o resultado da qualidade das simulações de vazão de acordo com o número de sub-bacias utilizado. Foi empregado o *Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)* para avaliar os valores simulados com os valores observados de vazão mensal das duas estações fluviométricas de controle utilizadas neste estudo: Barra do Funchal (BF) e Porto Indaiá (PI).

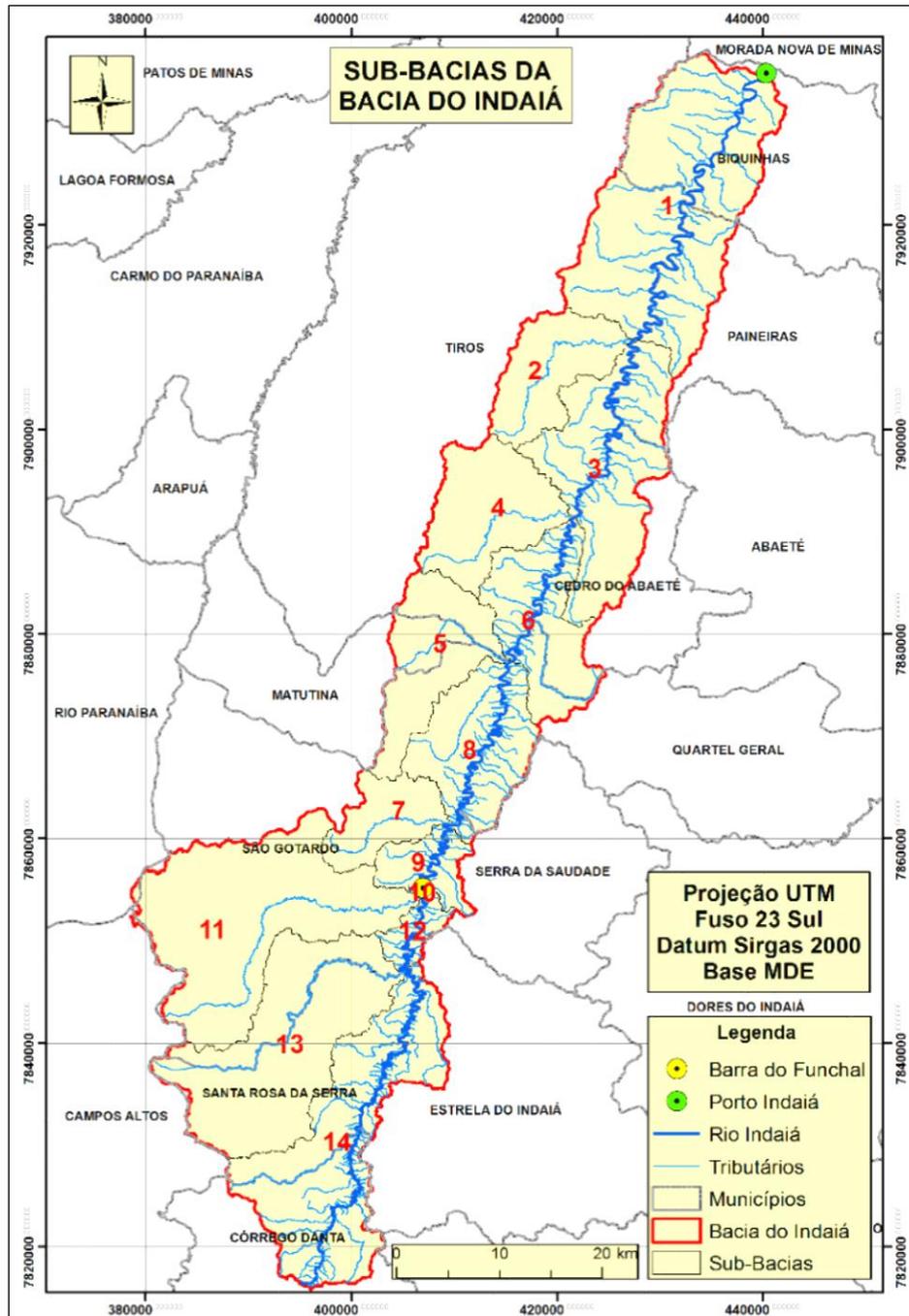
**Tabela 8:** Coeficiente de eficiência de acordo com o detalhamento da bacia do Indaiá

Nº de Sub-Bacias	Valor do NSE Simulação Mensal
18 sub-bacias	BF= +0,2919 PI = +0,0042
14 sub-bacias	BF= +0,3706 PI = +0,0545
2 sub-bacias	BF= +0,1645 PI = -0,1033

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto o pior resultado foi obtido quando se utilizou apenas 2 (duas) sub-bacias, e o melhor resultado foi com 14 (quatorze) sub-bacias, com *NSE* igual a 0,37 para estação Barra do Funchal e 0,05 para estação Porto Indaiá. Cabe salientar que este resultado foi somente um comparativo, e que não foi realizada a calibração do modelo para estas configurações de 2 (duas) sub-bacias e 18 (dezoito) sub-bacias, somente para 14 (quatorze) sub-bacias. Deste modo, utilizou-se neste estudo o delineamento com 14 sub-bacias (*Figura 13*).

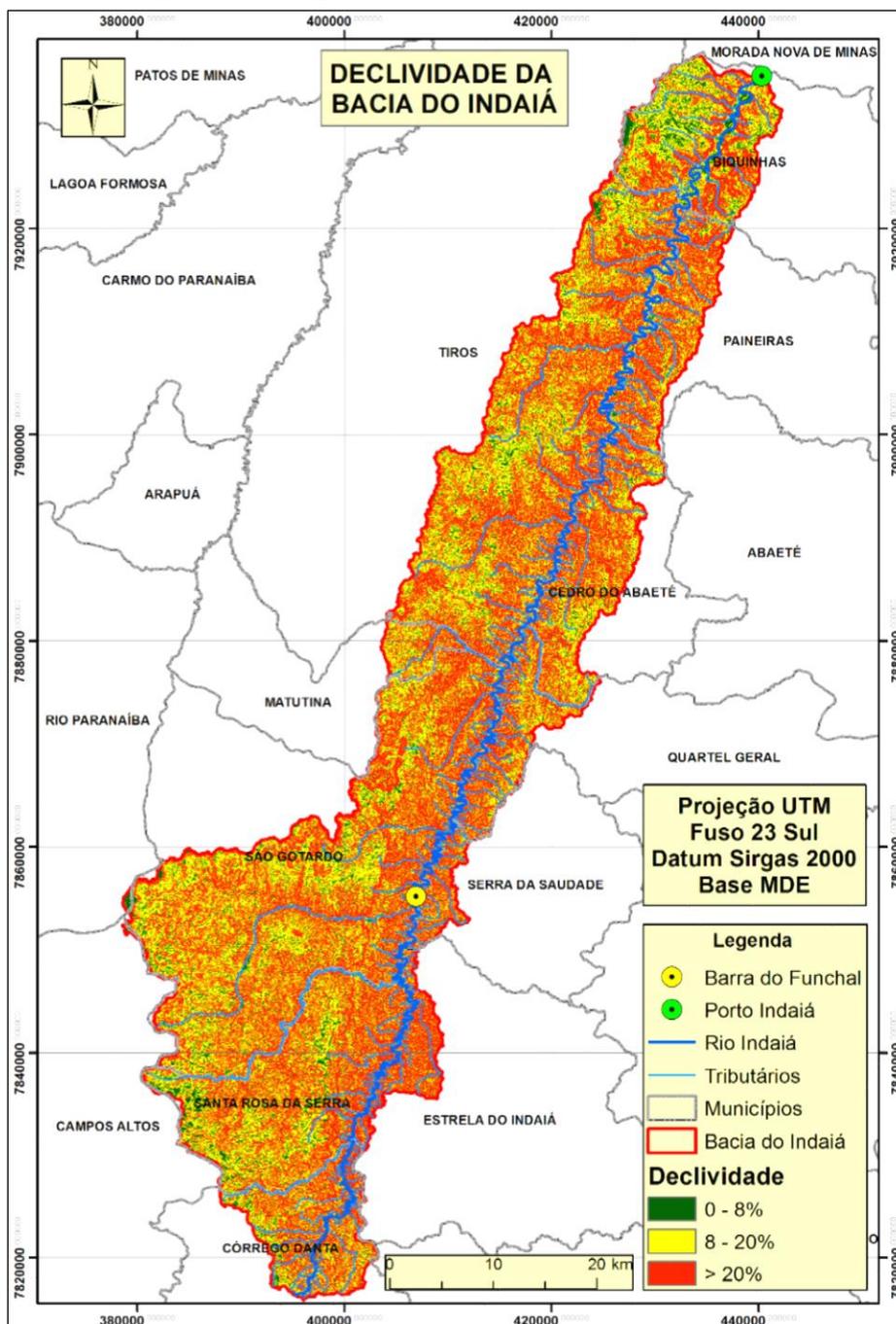
**Figura 13:** Sub-bacias geradas pelo SWAT na bacia do Indaiá



Fonte: Autor (2019) utilizando MDE do Indaiá.

Após a subdivisão da bacia em 14 sub-bacias, a próxima etapa foi a inserção dos mapas de solos, uso e cobertura do solo, e declividade. O mapa de declividade foi criado por meio de processamentos sobre o *MDE* após definir a quantidade de classes de declividade. Neste estudo foram definidas 3 (três) classes: de 0 a 8%, de 8 a 20%, e valores acima de 20%. O mapa de declividade gerado pode ser visto na **Figura 14**.

**Figura 14:** Mapa de declividade da bacia do Indaiá



Fonte: Autor (2019) utilizando MDE do Indaiá.

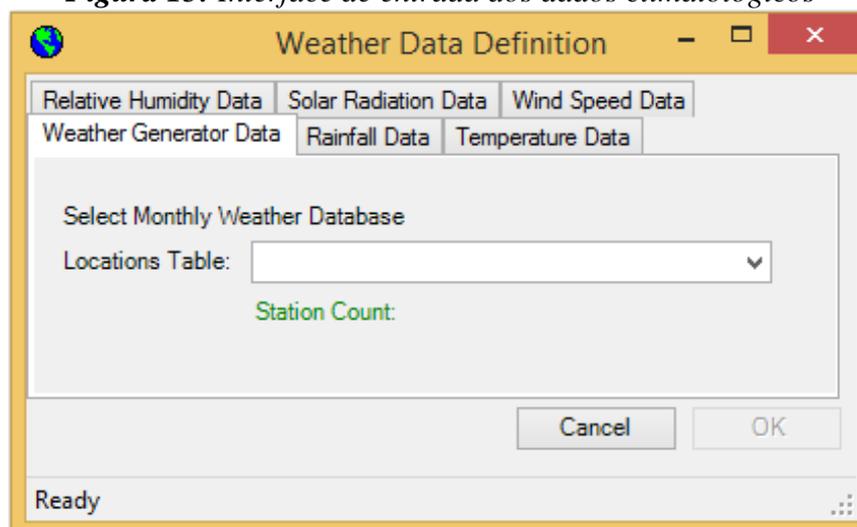
Em seguida foram criadas as *HRUs* (Unidades de Resposta Hidrológica), que correspondem a polígonos homogêneos com as mesmas características de solo, uso do solo e declividade. Foram gerados neste trabalho 471 *HRUs*.

### 3.3.4 Inserção dos Dados Climatológicos

Finalizado o delineamento da bacia e a geração das *HRUs*, efetuou-se no *ArcSWAT* a inserção dos dados climatológicos diários: precipitação, radiação solar, temperatura máxima e mínima, umidade relativa e velocidade média do vento.

Por meio da interface de entrada de dados climatológicos (*Figura 15*), foram inseridos os arquivos *.txt* de localização das estações e das séries de dados diários. Também foi selecionado o Banco de Dados Climáticos (*WGEN*) para poder utilizar o Gerador Climático do *SWAT*.

*Figura 15: Interface de entrada dos dados climatológicos*



Cabe destacar que o *SWAT* possui uma metodologia própria de espacialização dos dados de chuva dentro da bacia hidrográfica, onde considera a série de precipitação por sub-bacia, vinculando os valores de determinada estação à sub-bacia mais próxima. Esse vínculo é estabelecido em relação à localização da estação pluviométrica e o centróide de cada sub-bacia. A *Tabela 9* mostra qual estação foi vinculada a qual sub-bacia. Percebe-se que a estação pluviométrica Barra do Funchal foi a estação que teve mais sub-bacias vinculadas, ao todo 5 (cinco) sub-bacias (*Figura 5*).

**Tabela 9:** Estações pluviométricas vinculadas as sub-bacias geradas

Sub-bacia	Estação Vinculada (código)	Estação Vinculada (nome)	Distância ao centróide (km)
1	1845004	Lagoa do Gouveia	21,8
2	1845004	Lagoa do Gouveia	14,2
3	1845004	Lagoa do Gouveia	25,1
4	1845014	Tiros	16,4
5	1946009	São Gotardo	22,1
6	1845014	Tiros	26,9
7	1945002	Barra do Funchal	7,7
8	1945002	Barra do Funchal	14,7
9	1945002	Barra do Funchal	1,9
10	1945002	Barra do Funchal	0,5
11	1946009	São Gotardo	11,8
12	1945002	Barra do Funchal	4,5
13	1946020	São José da Bela Vista	8,8
14	1946020	São José da Bela Vista	17,7

Fonte: Autor (2019).

### 3.3.5 Aquecimento do Modelo e Simulação Inicial

No início da simulação há algumas incertezas sobre o estado do sistema, devido ao desconhecimento de todas as suas condições iniciais. Assim, os valores simulados para os primeiros dias (ou meses, ou anos, dependendo da escala temporal escolhida) podem não ser confiáveis. Por isso, recomenda-se a utilização de um período de aquecimento (*warm up*), ou seja, uma parcela inicial do tempo de simulação que serve apenas para retirar das variáveis de entrada a influência das condições iniciais.

Como já dito anteriormente, o período de aquecimento do modelo foi de 3 anos. Iniciou em 01/01/1985 e terminou em 31/12/1987. O período de simulação foi de 30 anos, definido com base nos dados climatológicos disponíveis. Iniciou em 01/01/1988 e finalizou em 31/12/2017.

Os *Quadro 11 e Quadro 12* mostram de que forma foram utilizados os períodos nas etapas de simulação e pós-processamento, respectivamente. A variável utilizada pelo *SWAT* na etapa de simulação foi a *precipitação*, e na etapa de pós-processamento foi a *vazão*.

**Quadro 11:** Períodos utilizados e sua função na etapa de simulação

Período	Utilização	Anos
01/01/1985 a 31/12/1987	Aquecimento do modelo	03 anos
01/01/1988 a 31/12/2017	Período de simulação	30 anos

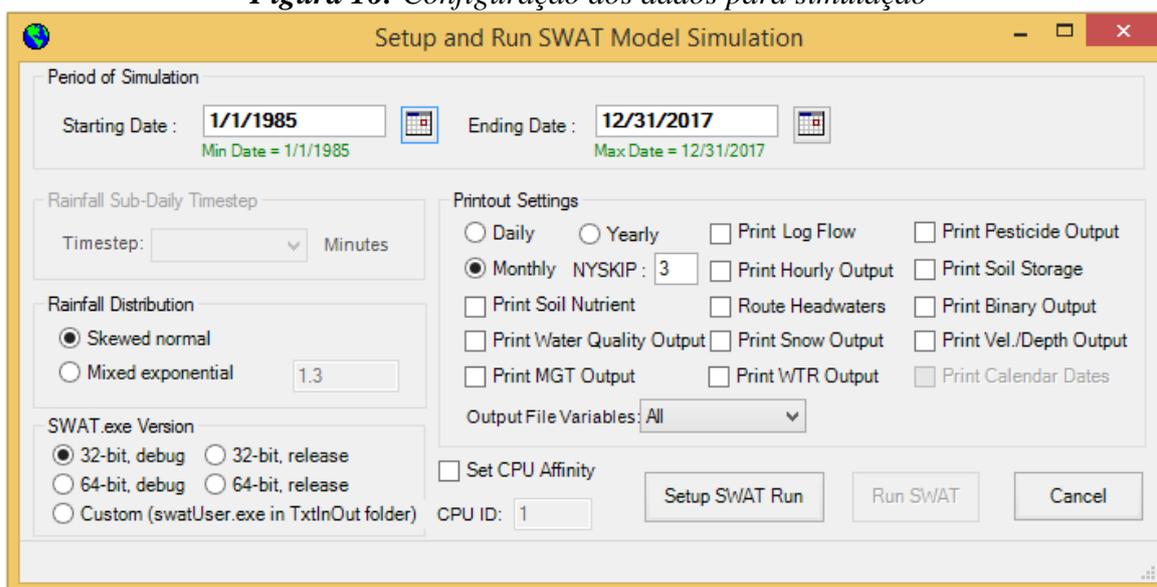
**Quadro 12:** *Períodos utilizados e sua função na etapa de pós-processamento*

Período	Utilização	Anos
01/01/1988 a 31/12/2007	Análise de Sensibilidade e Calibração do modelo	20 anos
01/01/2008 a 31/12/2017	Verificação do modelo	10 anos

Verificou-se que os dados das estações pluviométricas (precipitação) e fluviométricas (vazão) utilizados neste trabalho, estavam consistidos somente até 2007 e que a partir de 2008 só eram disponibilizados dados brutos. Por isso que o período de calibração foi definido de 1988 a 2007 (20 anos de dados) e o período de verificação de 2008 a 2017 (10 anos de dados).

Após a inserção de todos os dados de entrada (climatológicos e pluviométricos), executou-se no ArcSWAT duas simulações iniciais: a primeira na escala diária e a segunda na escala mensal, conforme a **Figura 16**.

**Figura 16:** *Configuração dos dados para simulação*



Em cada simulação o SWAT gera vários resultados que são gravados em diversos arquivos de saída (*output files*), que o usuário pode selecionar quais quer importar para visualização. Estes arquivos são armazenados na pasta *TxtInOut*, a qual é exportada para o programa *SWAT-CUP* para ser utilizada nas etapas de calibração e verificação do modelo. No presente trabalho utilizou-se apenas 2 (dois) *outputs*:

- *Output.rch*: contêm os resultados das simulações de vazão (FLOW\_OUT\_m<sup>3</sup>/s) e de descarga sólida total de sedimentos (SED\_OUT\_ton), para cada trecho (*reach*) da rede hídrica, no período de 01/01/1988 a 31/12/2017, nas escalas diária e mensal.

- *Output.sub*: contém os resultados de produção de sedimentos (SYLD\_ton/ha), para cada sub-bacia no período de 01/01/1988 a 31/12/2017, nas escalas diárias e mensal.

Finalizadas as simulações, foi executado o *SWAT Check* que consiste em algumas verificações para identificar problemas do modelo, as quais são baseadas na experiência dos desenvolvedores do *SWAT*. Porém, o aviso gerado pelo programa não significa necessariamente que há um problema real, apenas destina ser um alerta para as previsões incomuns. Esta checagem também forneceu uma representação visual do balanço hídrico anual gerado para a bacia do rio Indaiá.

Elaborou-se também gráficos da distribuição temporal dos valores simulados (registrados no banco de dados de saída *Output.rch*) versus os dados observados das estações de controle: Estação Porto Indaiá, que corresponde a saída da sub-bacia 01, e Estação Barra do Funchal, que corresponde a saída da sub-bacia 10.

Em seguida, realizou-se uma análise da qualidade dos resultados das simulações iniciais diárias e mensais de vazão e de descarga sólida total de sedimentos, por meio da comparação com os valores observados, utilizando o *Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)* e *coeficiente de determinação  $R^2$* .

### **3.3.6 Análise de sensibilidade, Calibração e Verificação**

#### *3.3.6.1 Análise de Sensibilidade*

A análise de sensibilidade é o procedimento de identificação dos parâmetros de entrada que mais contribuem para a geração e alterações dos resultados da modelagem, ou seja, os parâmetros mais sensíveis.

No âmbito deste estudo, a análise de sensibilidade e calibração foram realizadas concomitantemente e de forma automática utilizando o software *SWAT-CUP* 2012 (versão 5.1.6.2), o algoritmo de otimização *SUF2* e as funções objetivos *NSE*,  *$R^2$*  e *PBIAS*.

Como o *SWAT-CUP* fornece uma vasta lista de parâmetros (total de 651 parâmetros) que o usuário pode escolher quais quer alterar, e a fim de se racionalizar o processo de calibração do modelo, foi necessário selecionar de maneira prévia um conjunto de parâmetros para serem utilizados na análise de sensibilidade e na calibração.

Para isso, realizou-se um levantamento bibliográfico que priorizou trabalhos de modelagem hidrológica, cujas áreas de estudo fossem localizadas no Bioma Cerrado, na tentativa de indicar parâmetros com comportamento similares à área de estudo do presente trabalho (*Quadro 13*).

**Quadro 13:** Lista dos parâmetros mais sensíveis identificados em alguns estudos

Autor	Bacia	Posição do Parâmetro				
		1	2	3	4	5
Baldisserra (2005)	Rio Cuiabá	ALPHA_BF	GWQMN	GW_REVAP	REVAPMN	CN2
Silva (2010)	Descoberto	CN2	SURLAG	RCHRG_DP	GWQMN	SOL_Z
Ferrigo (2011)	Capão Comprido	ESCO	ALPHA_BF	GW_DELAY	SOL_Z	CH_K2
Strauch <i>et al.</i> (2011)	Pipiripau	CN2	ALPHA_BF	CH_K2	ESCO	GW_DELAY
Ferrigo <i>et al.</i> (2012)	Descoberto	ALPHA_BF	CN2	GW_DELAY	GWQMN	GW_REVAP
Salles (2012)	Pipiripau	CN2	CH_K2	SURLAG	ALPHA_BF	ESCO
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	Capão Comprido-Sufi2	SOL_AWC	GW_DELAY	GWHT	GW_REVAP	SOL_K
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	Capão Comprido-Glue	CN2	GW_REVAP	GW_DELAY	SOL_AWC	SOL_K
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	Capão Comprido-Parasol	GW_REVAP	CN2	GW_DELAY	SOL_AWC	ALPHA_BF
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	Capão Comprido-PSO	GW_DELAY	SHALLST	GWQMN	GW_REVAP	SOL_K
Castro (2013)	Jardim	ALPHA_BF	CH_N2	GWQMN	EPCO	CN2
Herrera (2013)	Riacho Fundo	SURLAG	CN2	CH_N2	CH_K2	ALPHA_BF
Strauch <i>et al.</i> (2013)	Pipiripau	CH_K2	CN2	ALPHA_BF	ESCO	GW_DELAY
Strauch e Volk (2013)	Torto/Santa Maria	GW_DELAY	GWQMN	CN2	CH_K2	CH_N2
Carvalho (2014)	Jardim	CN2	SOL_K	ESCO	GW_DELAY	SURLAG
Ferrigo (2014)	Descoberto	SOL_K	CN2	SOL_AWC	SHALLST	ANION_EXCL
Fernandes (2015)	São Francisco	CN2	ESCO	ALPHA_BF	REVAPMN	DEEPST
Nunes (2016)	Riacho Fundo	GW_DELAY	CANMX	ALPHA_BF	SHALLST	CN2
Nunes (2016)	Bananal	GW_DELAY	SHALLST	CANMX	GWQMN	ESCO
Nunes (2016)	Gama	GW_DELAY	ALPHA_BF	SHALLST	SOL_K	CN2
Nunes (2016)	Torto/Santa Maria	GW_DELAY	ALPHA_BF	ESCO	SOL_K	CH_K2
Nunes (2016)	Cabeça de Veado	GW_DELAY	SOL_K	ESCO	SOL_AWC	CN2
Teixeira <i>et al.</i> (2016)	Rio Preto	CN2	ALPHA_BF	GW_DELAY	ESCO	GWQMN
Castro <i>et al.</i> (2016)	Jardim	CN2	ALPHA_BF	SURLAG	SOL_K	CANMX
Ferreira (2016)	Gama	ESCO	GW_DELAY	SOL_AWC	CN2	SHALLST
Silva (2016b)	Rio Preto	SOL_AWC	CN2	SOL_K	CANMX	GW_DELAY
Teixeira e Lima (2017)	São Marcos	ALPHA_BF	CN2	CH_K2	CH_N2	ESCO
Ferreira <i>et al.</i> (2017)	Riacho Fundo	ALPHA_BF	CN2	CH_N2	SURLAG	SOL_AWC

Fonte: Autor (2019). Os parâmetros destacados na cor vermelha não foram utilizados.

De acordo com o levantamento realizado, foram utilizados no processo de análise de sensibilidade e calibração todos os parâmetros considerados importantes nos trabalhos citados no *Quadro 13*, com exceção dos parâmetros destacados na cor vermelho e que foram citados por poucos autores: *EPCO*, *ANION\_EXCL* e *DEEPST* (citados por apenas um autor), *SOL\_Z* (citado por dois autores), e *CANMX* (citado por quatro autores).

Desta forma, a lista final de parâmetros utilizada na calibração e verificação hidrológica (vazão) teve 15 parâmetros: *ALPHA\_BF*, *CH\_K2*, *CH\_N2*, *CN2*, *ESCO*, *GW\_DELAY*, *GWHT*, *GW\_REVAP*, *GWQMN*, *REVAPMN*, *RCHRG\_DP*, *SHALLST*, *SOL\_AWC*, *SOL\_K*, *SURLAG*.

Já a lista de parâmetros utilizada na calibração e verificação hidrossedimentológica (vazão e sedimentos) foi elaborada utilizando os 15 (quinze) parâmetros relacionados com a estimativa de vazão e mais outros 11 (onze) parâmetros relacionados com a estimativa da carga de sedimentos, obtidos nos estudos de Arnold *et al.* (2012), Strauch *et al.* (2013), e Carvalho (2014).

Arnold *et al.* (2012) fizeram um levantamento dos parâmetros mais utilizados em 64 trabalhos de calibração e verificação com o *SWAT*. Strauch *et al.* (2013) calibraram conjuntamente as variáveis vazão e sedimentos para a bacia do Ribeirão Pipiripau-DF. Já Carvalho (2014) realizou a calibração e verificação das variáveis vazão e sedimentos para a bacia do Alto Rio Jardim-DF.

Assim, a lista final de parâmetros utilizada na calibração e verificação hidrossedimentológica teve 26 parâmetros ao todo:

- 15 parâmetros (vazão): *ALPHA\_BF*, *CH\_K2*, *CH\_N2*, *CN2*, *ESCO*, *GW\_DELAY*, *GWHT*, *GW\_REVAP*, *GWQMN*, *REVAPMN*, *RCHRG\_DP*, *SHALLST*, *SOL\_AWC*, *SOL\_K*, *SURLAG*.
- 11 parâmetros (sedimentos): *ADJ\_PKR*, *CH\_COV1*, *CH\_COV2*, *LAT\_SED*, *PRF*, *SLSUBBSN*, *SPCON*, *SPEXP*, *USLE\_P*, *USLE\_C*, *USLE\_K*.

Desta forma, a análise de sensibilidade foi realizada para estes 26 parâmetros, permitindo a uma hierarquização e um auxílio na compreensão dos processos relevantes da bacia. De maneira geral, os resultados das análises de sensibilidade fornecidos pelo *SWAT-CUP* são dados com base nos valores gerados de *t-stat* e *p-value*. O *t-stat* fornece a sensibilidade média em que quanto maior o valor absoluto, maior será a sensibilidade do parâmetro. Já o *p-value* determina a significância da sensibilidade, em que valores próximos a zero (*p-value* < 0,05) indicam maior significância (ABBASPOUR, 2015).

Considerando os resultados do *t-stat* e do *p-value* para os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade, realizou-se uma hierarquização dos mais sensíveis ao modelo para bacia estudada. Após a realização das análises de sensibilidade, foram realizadas as etapas de calibração e verificação. Os resultados da análise de sensibilidade são mostrados no Capítulo 4.

### 3.3.6.2 Calibração e Verificação

A calibração consiste no processo de ajuste dos parâmetros de um modelo à realidade da região em estudo, onde escolhe-se um período e altera-se os parâmetros até que os resultados simulados sejam similares aos observados. A verificação é o processo de confirmação do modelo calibrado, onde se fixa os parâmetros calibrados e compara os resultados simulados com dados observados de um período não utilizados na calibração.

Como o *SWAT-CUP* realiza a análise de sensibilidade concomitantemente à calibração, e de maneira automática. Optou-se por utilizar nas etapas de calibração e verificação todos os 26 parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Verificou-se que, por convenção, a maioria dos trabalhos com *SWAT* realizam a calibração em separado quando envolvem mais de uma variável. Normalmente seguem uma ordem pré-estabelecida de calibração. Primeiramente calibra-se a vazão, depois a descarga sólida de sedimentos (uma vez que esta é dependente da vazão) e, por fim, nutrientes e pesticidas, uma vez que estes últimos, além de serem dependentes da vazão, encontram-se, muitas vezes, aderidos às partículas de solo em suspensão (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006, MORIASI *et al.*, 2007).

Há, no entanto, autores que executam a calibração conjunta de vazão e sedimentos. Esse tipo de calibração torna mais difícil a obtenção de um valor ótimo para ambas as variáveis, mas pode ser útil quando uma delas apresenta valores ruins na calibração em separado (CARVALHO, 2014).

O trabalho de Strauch *et al.* (2013) é um exemplo de pesquisa que obteve melhores resultados com a calibração conjunta do que com a feita em duas etapas separadas. No presente trabalho não foi realizado a calibração de sedimentos em separado da vazão. A estratégia foi realizar primeiramente a calibração do modelo hidrológico (somente vazão), e depois realizar a calibração conjunta do modelo hidrossedimentológico (vazão e sedimentos) utilizando os melhores intervalos de parâmetros obtidos na calibração da vazão e acrescentando os parâmetros relacionados com a estimativa da descarga sólida total. Todas as etapas de calibração e verificação do modelo foram realizadas na escala mensal.

As vazões simuladas mensalmente foram calibradas (1988-2007) e verificadas (2008-2017) com base nos valores das vazões observadas (médias mensais) das duas estações fluviométricas de controle: Porto Indaiá (Sub-bacia 01) e Barra do Funchal (Sub-bacia 10).

As descargas sólidas totais simuladas mensalmente foram calibradas (1988-2007) e verificadas (1988-2007), depois da calibração e verificação do modelo hidrológico (vazão), com base nas descargas sólidas totais calculadas por meio de amostras de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) coletadas (1985-2013) da estação sedimentométrica Porto Indaiá (sub-bacia 01).

Para realizar a calibração e a verificação no *SWAT-CUP*, definiu-se o algoritmo de otimização *SUF12* e o número de 500 simulações para cada rodada de processamento (chamada de iteração). Isso significa que cada parâmetro foi alterado 500 vezes, ou que 500 combinações dos valores dos parâmetros foram testadas. Realizou-se vários testes antes de começar a calibrar com os 26 parâmetros selecionados, alterando o número de simulações, modificando a forma de alteração, colocando menos e ou mais parâmetros.

Foram meses de testes (tentativa e erro) até começar a apresentar um resultado satisfatório, levando em conta que cada iteração de 500 simulações levava em torno 12 horas (calibração mensal). A questão tempo de processamento foi um grande gargalo no presente trabalho, pois inviabilizou a continuação de mais testes com várias combinações de parâmetros e intervalos, e até mesmo de algoritmos de otimização, pois só se utilizou o *SUF12*.

Na etapa de calibração foram realizadas 5 (cinco) iterações de 500 simulações até alcançar um resultado satisfatório na modelagem hidrossedimentológica, sendo cada simulação executada para 23 anos (1985-2007). No término de cada iteração foram avaliadas as saídas gráficas geradas pelo *SWAT-CUP*: gráficos das variáveis de interesse (vazões e descarga sólida total) com os valores medidos e simulados versus o tempo.

Foram também avaliados os valores das funções-objetivos ( $R^2$ , *NSE* e *PBIAS*), e os valores das estatísticas que medem as incertezas dos parâmetros (*p-factor* e *p-value*), bem como a amplitude dos novos intervalos gerados para os parâmetros. Os intervalos iniciais dos parâmetros e os métodos de substituição dos mesmos, utilizados na 1ª rodada (iteração 1), são mostrados na ***Tabela 10***.

**Tabela 10:** Intervalos iniciais utilizados na calibração hidrossedimentológica

Parâmetros	Forma de Alteração	Intervalo	
		Limite Inferior	Limite Superior
ALPHA_BF	Substituição direta	0,258403	0,775597
CH_K2	Substituição direta	64,854591	150,000000
CH_N2	Substituição direta	0,143575	0,300000
CN2	Multiplicação	-0,281744	0,239744
ESCO	Substituição direta	0,000000	0,500600
GW_DELAY	Substituição direta	0,000000	273,299927
GWHT	Substituição direta	9,385054	25,000000
GW_REVAP	Substituição direta	0,099452	0,200000
GWQMN	Substituição direta	161,999985	3388,000000
RCHRG_DP	Substituição direta	0,000000	0,647600
REVAPMN	Substituição direta	210,200684	500,000000
SHALLST	Substituição direta	1000,000000	3650,398926
SOL_AWC	Multiplicação	-0,226598	0,320598
SOL_K	Multiplicação	-1,000000	0,215196
SURLAG	Substituição direta	0,05	2,527966
ADJ_PKR	Substituição direta	0,5	1,0
CH_COV1	Substituição direta	0,0	1,0
CH_COV2	Substituição direta	0,0	1,0
LAT_SED	Substituição direta	0,0	2,0
PRF	Substituição direta	1,5	2,0
SLSUBBSN	Multiplicação	-1,0	1,0
SPCON	Substituição direta	0,0001	0,01
SPEXP	Substituição direta	1,0	1,5
USLE_C	Multiplicação	-1,0	1,0
USLE_K	Multiplicação	-1,0	1,0
USLE_P	Multiplicação	-1,0	1,0

Fonte: Autor (2019).

O campo “Forma de alteração” da **Tabela 10** se refere às 3 (três) formas possíveis de alteração dos parâmetros:

- Substituição direta, onde o programa faz alterações do valor diretamente (*replace*);
- Por adição, em que um valor constante, definido pelo usuário, é adicionado ao valor inicial do parâmetro (*absolute*);
- Por multiplicação, onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial por porcentagem, para mais ou para menos (*relative*).

O campo intervalo (“Limite inferior” e “Limite superior”) da **Tabela 10** se refere ao nível de liberdade que se atribui à variação de cada parâmetro. Esses limites são importantes para se evitar distorções nos modelos ou geração de resultados fictícios, inalcançáveis no mundo real. Os intervalos dos 15 parâmetros (vazão) foram ajustados na etapa de calibração do modelo hidrológico, porém tomou-se o devido cuidado de observar se os limites gerados automaticamente pelo *SWAT-CUP* estavam dentro do intervalo da realidade física do parâmetro. Já os intervalos

iniciais dos 11 parâmetros (sedimentos) foram definidos de acordo com a variação padrão (*default*) apresentada no *SWAT-CUP*.

Na etapa de verificação foi realizada somente 1 (uma) iteração de 500 simulações utilizando os melhores intervalos de parâmetros obtidos na 3ª rodada da calibração (iteração 3), sendo cada simulação executada para 10 anos (2008-2017). Os intervalos ajustados dos parâmetros utilizados na verificação, são mostrados na **Tabela 11**.

**Tabela 11:** Intervalos ajustados utilizados na verificação hidrossedimentológica

Parâmetros	Forma de Alteração	Melhor Valor Encontrado	Intervalo	
			Limite Inferior	Limite Superior
ALPHA_BF	Substituição direta	0,703707	0,258403	0,775597
CH_K2	Substituição direta	124,541519	64,854591	150,000000
CH_N2	Substituição direta	0,173765	0,143575	0,300000
CN2	Multiplificação	-0,092236	-0,281744	0,160000
ESCO	Substituição direta	0,210753	0,000000	0,500600
GW_DELAY	Substituição direta	32,522694	0,000000	273,299927
GWHT	Substituição direta	19,050705	9,385054	25,000000
GW_REVAP	Substituição direta	0,194269	0,099452	0,200000
GWQMN	Substituição direta	3223,474121	161,999985	3388,000000
RCHRG_DP	Substituição direta	0,258392	0,000000	0,647600
REVAPMN	Substituição direta	435,954346	210,200684	500,000000
SHALLST	Substituição direta	1341,901489	1000,000000	3650,398926
SOL_AWC	Multiplificação	0,118683	-0,226598	0,320598
SOL_K	Multiplificação	-0,568605	-1,000000	0,215196
SURLAG	Substituição direta	1,390580	0,050000	2,527966
ADJ_PKR	Substituição direta	0,674736	0,500000	0,777800
CH_COV1	Substituição direta	0,474510	0,044400	0,681600
CH_COV2	Substituição direta	0,621439	0,390401	1,000000
LAT_SED	Substituição direta	1,532275	0,850798	2,000000
PRF	Substituição direta	1,977531	1,692200	2,000000
SLSUBBSN	Multiplificação	-0,004299	-0,095201	1,000000
SPCON	Substituição direta	0,004445	0,002600	0,007600
SPEXP	Substituição direta	1,242120	1,146701	1,440299
USLE_C	Multiplificação	0,094012	-0,917196	0,361196
USLE_K	Multiplificação	0,375213	-0,677198	0,441198
USLE_P	Multiplificação	0,338524	-0,905203	0,365203

Fonte: Autor (2019).

O campo “Melhor valor encontrado” da **Tabela 11** informa, dentro do intervalo permitido para a alteração, qual o valor do parâmetro na melhor simulação realizada (nº 446 da iteração 3), ou seja, aquela que resultou num melhor índice da função objetivo escolhida. Cabe ressaltar que os intervalos gerados estão dentro do intervalo da realidade física de cada parâmetro.

A partir do modelo hidrossedimentológico calibrado, obteve-se os valores anuais de produção de sedimentos (ton/ha.ano) de cada sub-bacia para os anos de 1988 e 2007, bem como a média

anual de 20 anos (1988 a 2017). Foi então elaborado um mapa da distribuição da produção de sedimentos média anual da bacia do Indaiá por sub-bacia e por HRU.

A seguir são apresentados os resultados mais relevantes do presente trabalho e suas devidas discussões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

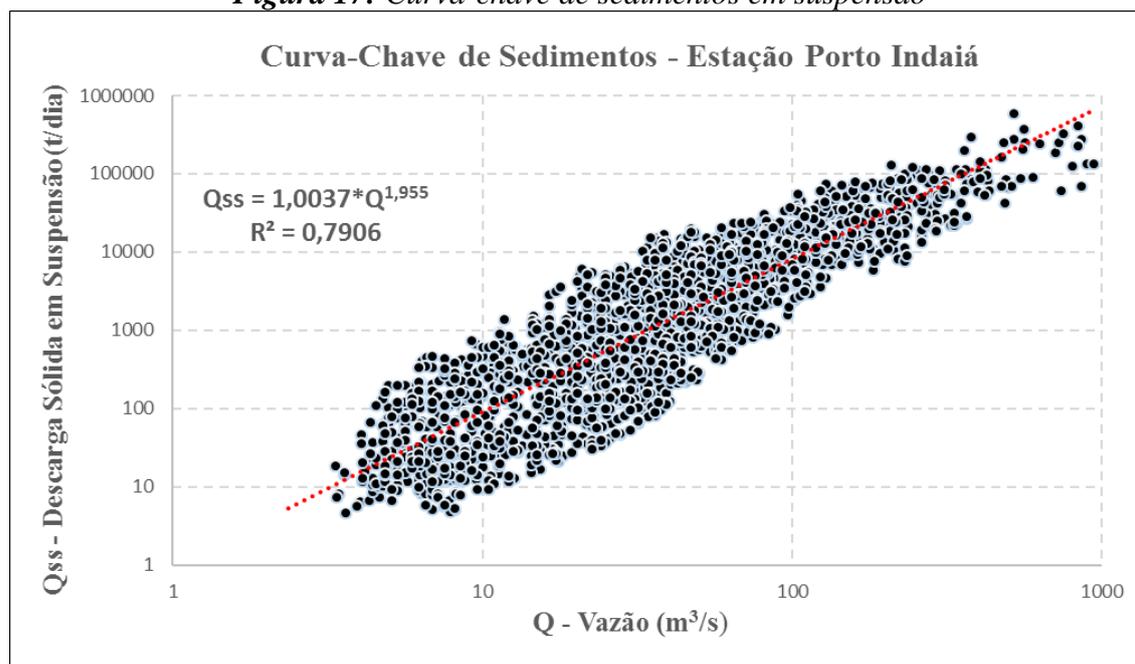
De acordo com etapas metodológicas descritas no Capítulo 3, os resultados alcançados neste estudo são apresentados e discutidos no presente capítulo conforme os 4 (quatro) itens abaixo:

- **4.1 Curva-Chave de Sedimentos** – apresenta a curva-chave de sedimentos gerada para calcular a descarga sólida em suspensão, além das análises estatísticas pertinentes;
- **4.2 Modelagem Inicial** – expõe os resultados da modelagem na etapa de simulação inicial das variáveis vazão e descarga sólida total, nas escalas diária e mensal;
- **4.3 Modelo Hidrossedimentológico** – apresenta as respostas da análise de sensibilidade, calibração e verificação do modelo hidrossedimentológico e uma discussão desses resultados, visando a compreensão dos processos representados pelo modelo e sua relação com o comportamento real da bacia do rio Indaiá;
- **4.3 Produção de Sedimentos** – exhibe os resultados obtidos de produção de sedimentos na bacia do rio Indaiá.

### 4.1 CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS

Conforme descrito no 3.3.1.2 (*Base de Dados Alfanuméricos*), a ausência de informação sobre a descarga sólida na bacia do rio Indaiá levou a necessidade de construção da curva-chave de sedimentos para que fosse possível gerar a série histórica de *descarga sólida total* ( $Q_{st}$ ) da Estação Porto Indaiá. A curva-chave de sedimentos em suspensão (**Figura 17**) foi elaborada com a utilização de 2249 pontos derivados da amostragem diária de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) e da medição de *vazão* ( $Q$ ) para o período de 1985 a 2013, após a remoção de pontos inconsistentes.

**Figura 17: Curva-chave de sedimentos em suspensão**



A remoção de alguns pontos com comportamento espúrio se deu em cerca de 5% dos elementos amostrais. Foram realizados procedimentos estatísticos para avaliar a qualidade do ajuste da reta de regressão da curva-chave de sedimentos, bem como determinados alguns parâmetros de estatística descritiva, conforme **Tabela 12**.

**Tabela 12: Parâmetros de estatística descritiva calculados para curva-chave de sedimentos**

<b>Parâmetros</b>	<b>(Q)(m³/s)</b>	<b>(Qss)(ton/dia)</b>
<b>Mínimo</b>	3,35	4,70
<b>1º Quartil</b>	16,36	181,90
<b>Mediana</b>	38,20	1273,60
<b>Média</b>	67,63	10314,40
<b>3º Quartil</b>	75,73	7829,90
<b>Máximo</b>	942,80	582853,10
<b>Desvio Padrão</b>	97,58	30952,51

Foi obtido um valor de *correlação linear* de 0,7908 e *coeficiente de determinação* ( $R^2$ ) de 0,7906, o que evidencia uma forte relação linear entre as variáveis em estudo. Para avaliar se esse resultado é significativo, realizou-se um Teste de Hipótese para o coeficiente de correlação (supondo que as suposições do teste sejam satisfeitas). Com um  $n = 2134$ ,  $p\text{-valor} < 2,2e^{-16}$  e um intervalo de confiança de 95% o valor de correlação significativa é entre 0,77 e 0,80, sendo assim, como temos um  $p\text{-valor}$  pequeno e com o valor de correlação linear dentro do intervalo podemos considerá-lo significativo. Quanto a normalidade dos resíduos, a partir do teste *Shapiro-Wilk*, como o  $p\text{-valor}$

do teste é pequeno, rejeita-se a hipótese de normalidade dos resíduos e, por consequência, conclui-se que os erros não são normalmente distribuídos.

No presente estudo, obteve-se a curva-chave de sedimentos em suspensão por meio da equação exponencial apresentada abaixo:

$$Q_{ss} = 1,0037 * Q^{1.955} \quad \text{(Equação 24)}$$

Utilizando a **Equação 24** e a relação de 10% de *descarga sólida de fundo* ( $Q_{sf}$ ) e 90% de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ), obteve-se a série histórica mensal (1988 a 2017) de *descarga sólida total* ( $Q_{st}$ ) utilizada nas etapas de calibração e validação hidrossedimentológica mensal.

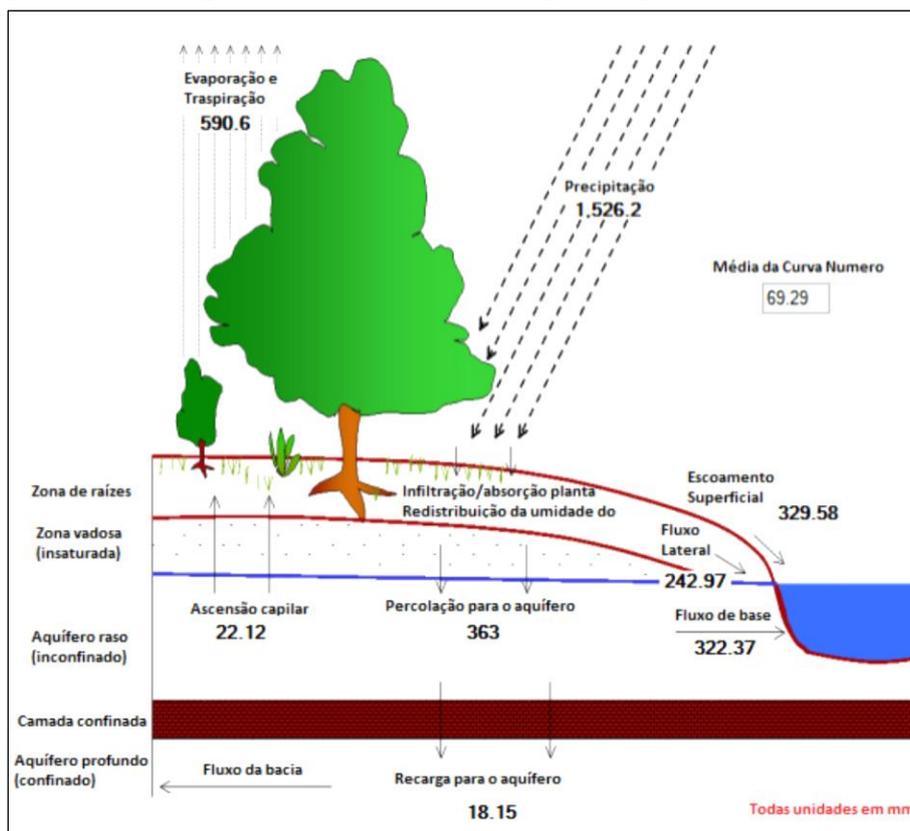
Ainda que não calculado o intervalo de confiança da equação de regressão resultante ficou evidente que os dados que geraram a curva-chave de sedimentos (amostragem diária de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) e medição de *vazão* ( $Q$ )) apresentaram uma grande dispersão, com grandes desvios entre o valor medido e o valor calculado pela curva-chave, que pode ser resultante do intervalo temporal de 30 anos de dados (1988 a 2017). Assim, adicionalmente, o trabalho poderia ter analisado o comportamento dos dados (dispersão) ao longo da série histórica, com objetivo de detectar tendências temporais que poderiam alterar a curva ou até mesmo definir curva-chaves parciais.

## 4.2 MODELAGEM INICIAL

Este capítulo apresenta os resultados da modelagem na etapa de simulação inicial das variáveis vazão e descarga sólida total para a bacia do rio Indaiá, nas escalas diária e mensal, no período de 1988 a 2017.

As simulações iniciais de vazão puderam ser avaliadas por meio da interface do *SWAT Check*, que permite visualizar dados de saída de vários componentes do ciclo hidrológico (**Figura 18**).

**Figura 18:** Balanço hídrico anual simulado para o período de 1988 a 2017



Fonte: Adaptado do Projeto SWAT Indaiá (2019).

Observando o esquema do balanço hídrico anual na fase terrestre, simulado pelo SWAT para o período de 01/01/1988 a 31/12/2017, a precipitação total anual foi de 1.526,2 mm, a evapotranspiração real calculada foi cerca de 590,6 mm. Obteve-se um escoamento superficial de 329,58 mm, um fluxo lateral de 242,97 mm e uma transferência de 363,0 mm para o aquífero raso, com retorno de 22,12 mm para a zona vadosa por ascensão capilar do aquífero raso, 18,15 mm para o aquífero profundo e 322,37 mm para o canal do rio devido ao fluxo de base.

Estes dados também foram sumarizados na **Tabela 13**, com os valores em mm e suas respectivas porcentagens.

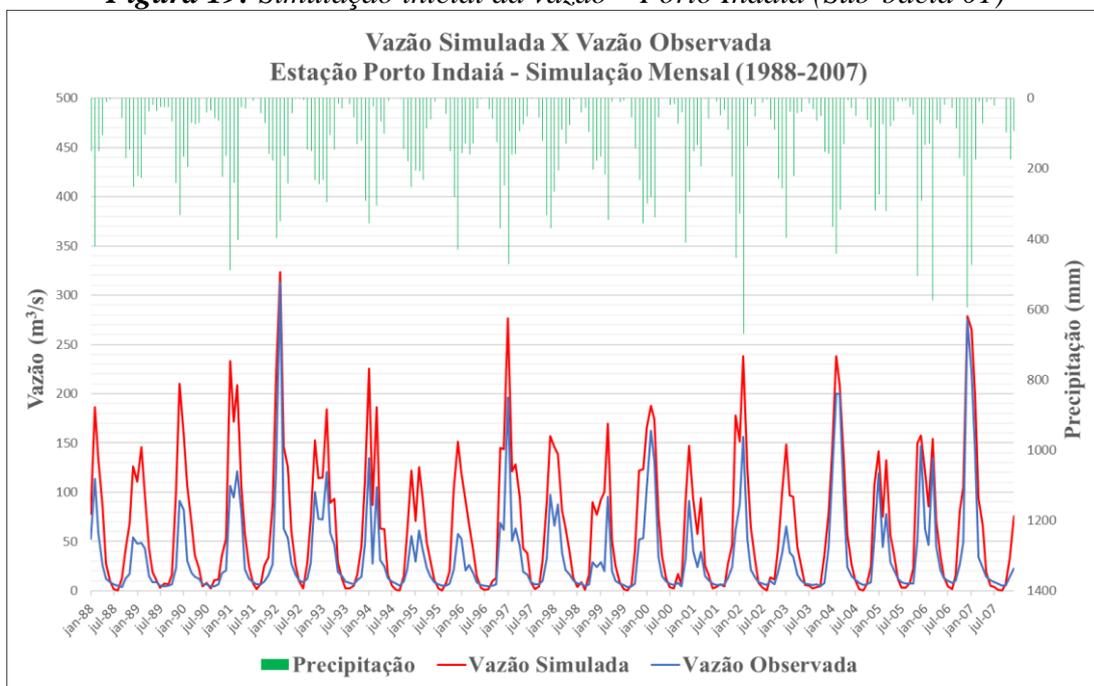
**Tabela 13:** Balanço hídrico anual simulado para o período de 1988 a 2017

Variável	mm.ano	%
Precipitação	1526,20	100,00
Escoamento superficial	329,58	21,60
Fluxo de base	322,37	21,13
Fluxo lateral	242,97	15,92
Recarga para o aquífero profundo	18,15	1,20
Ascensão capilar do aquífero raso	22,12	1,45
Evapotranspiração real	590,60	38,70

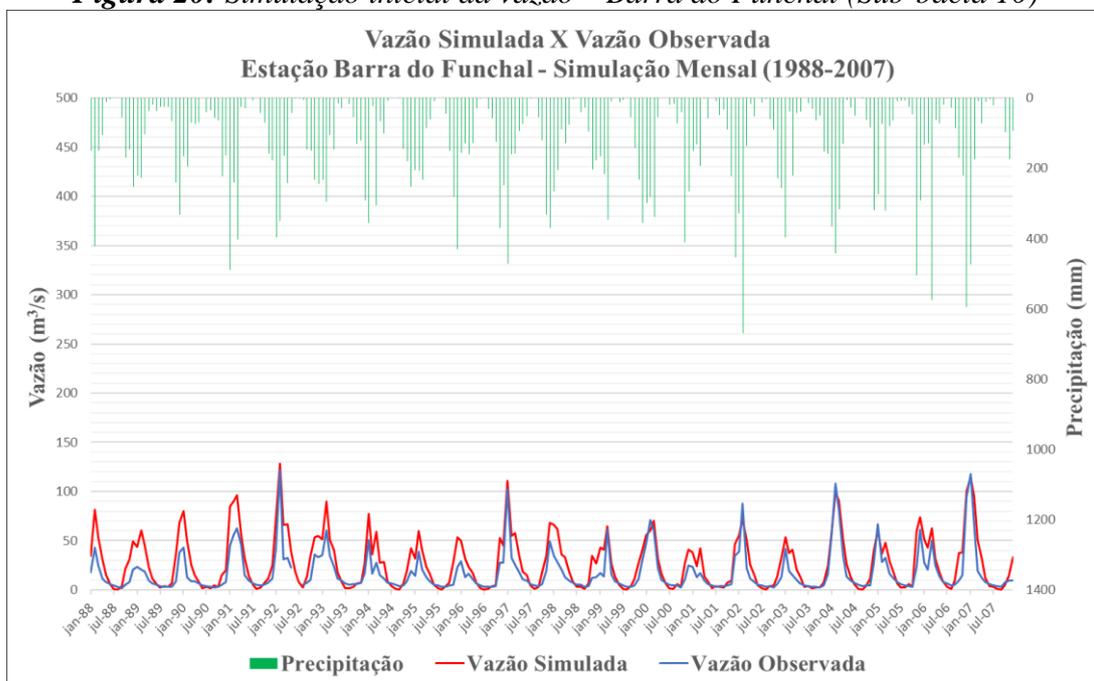
Fonte: Autor (2019).

Foram também elaborados gráficos da série histórica das vazões médias mensais simuladas e observadas da Estação Porto Indaiá (**Figura 19**) e da Estação Barra do Funchal (**Figura 20**), Onde percebe-se a tendência da simulação inicial em superestimar o escoamento superficial nos meses chuvosos (picos) e subestimar o fluxo de base na época da estiagem (vales).

**Figura 19: Simulação inicial da vazão – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)**



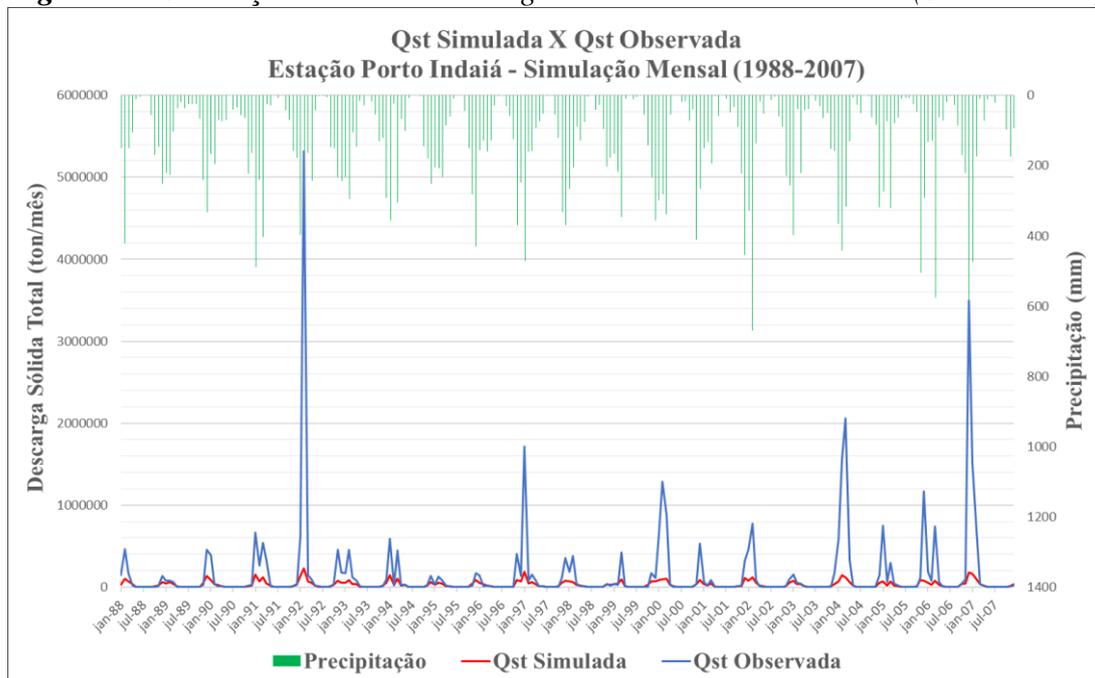
**Figura 20: Simulação inicial da vazão – Barra do Funchal (Sub-bacia 10)**



Quando se observa o gráfico da série histórica das *descargas sólidas totais (Qst)* mensais simuladas e observadas da estação Porto Indaiá (**Figura 21**), percebe-se também inconsistências

na simulação inicial da descarga sólida, com a tendência em subestimar imensamente a descarga sólida total mensal nos meses chuvosos.

**Figura 21:** Simulação inicial da descarga sólida total – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)



Para verificar a qualidade estatística da modelagem na etapa de simulação inicial diária e mensal da vazão e da descarga sólida total, utilizou-se as funções-objetivos: *coeficiente de determinação*  $R^2$  e *coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE)*. Os períodos de análise foram os mesmos definidos para calibração (1988-2007) e verificação (2008-2017) do modelo, conforme pode ser visto na **Tabela 14**.

**Tabela 14:** Avaliação estatística da simulação inicial (1988-2017)

Simulação Período e Escala	Período Analisado	Variável Simulada	$R^2$	NSE
1ª Simulação (1985-2017) Diária	1988-2007	Vazão – Porto Indaiá	0,5593	-0,1747
		Vazão – Barra do Funchal	0,5907	+0,0605
		Sedimento – Porto Indaiá	0,3063	+0,0594
	2008-2017	Vazão – Porto Indaiá	0,4896	-0,2398
		Vazão – Barra do Funchal	0,3240	-0,4848
		Sedimento – Porto Indaiá	0,2710	+0,0580
2ª Simulação (1985-2017) Mensal	1988-2007	Vazão – Porto Indaiá	0,8367	+0,1869
		Vazão – Barra do Funchal	0,8216	+0,4793
		Sedimento – Porto Indaiá	0,5670	+0,0479
	2008-2017	Vazão – Porto Indaiá	0,7611	+0,0954
		Vazão – Barra do Funchal	0,7303	+0,4935
		Sedimento – Porto Indaiá	0,4896	+0,0301

Fonte: Autor (2019).

Os resultados das simulações iniciais de vazão foram piores na escala diária com valores de  $R^2$  variando de 0,32 a 0,59 e valores de  $NSE$  variando de -0,48 a +0,06, e foram relativamente melhores na escala mensal com valores de  $R^2$  variando de 0,73 a 0,84 e valores de  $NSE$  variando de 0,19 a 0,49, porém abaixo de 0,5.

Já nas simulações de descarga sólida total ocorreu o contrário, foram piores na escala mensal com valores de  $R^2$  igual a 0,49 e 0,57 e valores de  $NSE$  igual a +0,030 e +0,047, e foram relativamente melhores na escala diária com valores de  $R^2$  igual a 0,27 e 0,31 e valores de  $NSE$  igual a +0,058 e + 0,059.

### 4.3 MODELO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Este capítulo apresenta os resultados alcançados no processo de modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Indaiá, bem como uma discussão dos mesmos.

Conforme já dito no item 3.3.6.2 (*Calibração e Verificação*) primeiramente, realizou-se a calibração do modelo hidrológico (vazão) na escala mensal, obtendo os melhores intervalos dos 15 (quinze) parâmetros definidos anteriormente. Depois, realizou-se a calibração conjunta do modelo hidrossedimentológico (vazão e sedimentos) utilizando os melhores intervalos gerados na calibração da vazão e acrescentando os intervalos dos 11 (onze) parâmetros relacionados com a estimativa da descarga sólida de sedimentos.

Obteve-se como resultado da calibração hidrológica os seguintes índices de desempenho da simulação da variável vazão: Estação Porto Indaiá (***p-factor = 0,95; r-factor = 1,06; R<sup>2</sup> = 0,92; e NSE = 0,91; PBIAS = -8,7***) e Estação Barra do Funchal (***p-factor = 0,95; r-factor = 0,88; R<sup>2</sup> = 0,89; e NSE = 0,89; PBIAS = 3,1***). Obteve-se na verificação hidrológica os seguintes índices de desempenho da simulação da variável vazão: Estação Porto Indaiá (***p-factor = 0,87; r-factor = 1,17; R<sup>2</sup> = 0,86; NSE = 0,83; PBIAS = -16,2***) e Estação Barra do Funchal (***p-factor = 0,84; r-factor = 0,87; R<sup>2</sup> = 0,78; NSE = 0,78; PBIAS = 5,4***).

Os resultados indicam que o modelo hidrológico é satisfatório para a simulação da vazão. Porém o foco do presente estudo é o modelo hidrossedimentológico (vazão e sedimentos) gerado para a bacia do rio Indaiá, cujos resultados e discussões são apresentados em detalhes nos itens a seguir.

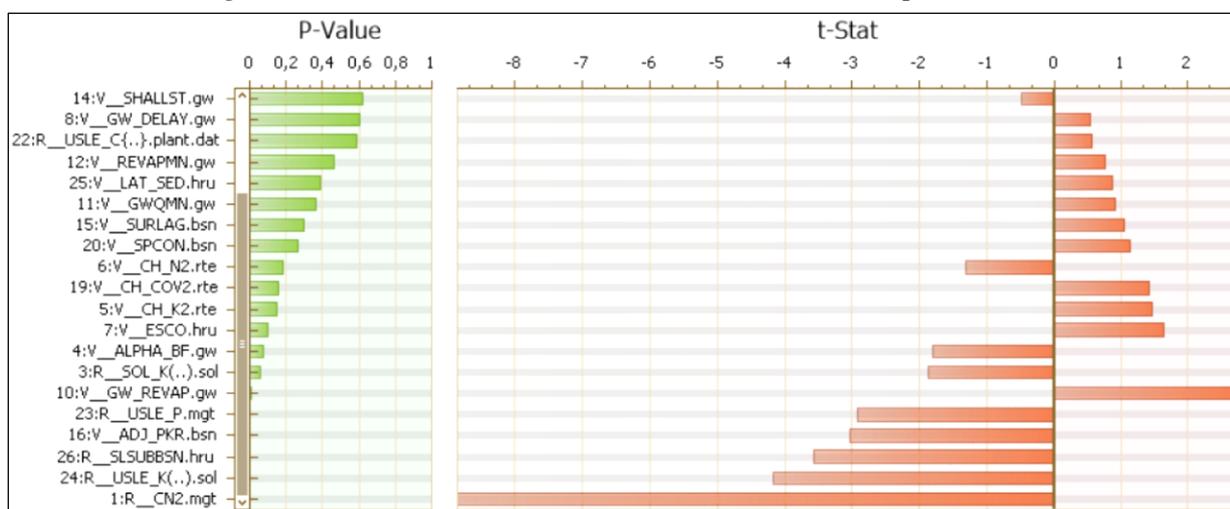
### 4.3.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros

Para executar no *SWAT-CUP* de forma automática e conjunta a análise de sensibilidade e a calibração do modelo hidrossedimentológico se utilizou 26 (vinte e seis) parâmetros:

- 15 parâmetros (vazão): *ALPHA\_BF*, *CH\_K2*, *CH\_N2*, *CN2*, *ESCO*, *GW\_DELAY*, *GWHT*, *GW\_REVAP*, *GWQMN*, *REVAPMN*, *RCHRG\_DP*, *SHALLST*, *SOL\_AWC*, *SOL\_K*, *SURLAG*;
- 11 parâmetros (sedimentos): *ADJ\_PKR*, *CH\_COV1*, *CH\_COV2*, *LAT\_SED*, *PRF*, *SLSUBBSN*, *SPCON*, *SPEXP*, *USLE\_C*, *USLE\_K*, *USLE\_P*.

O resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na calibração do modelo pode ser visto na **Figura 22**. Em “*t-stat*” as maiores barras significam maior sensibilidade. Em “*p-value*” as menores barras significam maior significância da sensibilidade ( $p\text{-value} < 0,05$ ). Os dois gráficos são complementares. Este resultado corresponde a 1ª rodada de 500 simulações (iteração 1) da calibração hidrossedimentológica, sendo que cada simulação foi executada no período de 1988 a 2007 (20 anos). Os valores dos 5 parâmetros mais sensíveis não ajustados (iteração 1) relacionados à simulação da vazão e descarga sólida total são apresentados na **Tabela 15**.

**Figura 22:** Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros



**Tabela 15:** Valores dos parâmetros mais sensíveis não ajustados

Valores dos parâmetros mais sensíveis - Bacia do Indaiá								
Posição	Parâmetro	Vazão			Descarga Sólida Total			
		Ajuste	p-value	t-stat	Parâmetro	Ajuste	p-value	t-stat
1	CN2	-0,04	0,00	-8,83	USLE_K	-0,11	0,00	-4,17
2	GW_REVAP	0,15	0,00	2,74	SLSUBBSN	0,81	0,00	-3,55
3	SOL_K	0,91	0,05	1,88	ADJ_PKR	0,55	0,00	-3,02
4	ALPHA_BF	0,43	0,07	1,81	USLE_P	-0,27	0,00	-2,93
5	ESCO	0,34	0,10	1,63	CH_COV2	0,78	0,16	1,40

Pela análise dos gráficos (**Figura 22**) e dos valores de *p-value* e *t-stat* fornecidos pelo *SWAT-CUP* (**Tabela 15**), percebe-se que os parâmetros *CN2*, *USLE\_K*, *SLSUBBSN*, *ADJ\_PKR*, *USLE\_P*, *GW\_REVAP* e *SOL\_K* tiveram um comportamento amplamente dominante no processo com valores de *t-stat* acima de 2,00 (em módulo) e *p-value* < 0,05 (altamente sensíveis).

Quanto à sensibilidade dos parâmetros relacionados apenas à estimativa da vazão, os 5 (cinco) parâmetros que mais influenciaram nos resultados foram *CN2*, *GW\_REVAP*, *SOL\_K*, *ALPHA\_BF* e *ESCO*, com valores de *p-value* variando de 0,00 a 0,10.

No que se refere à estimativa da descarga sólida total, os 5 (cinco) parâmetros de maior relevância foram *USLE\_K*, *SLSUBBSN*, *ADJ\_PKR*, *USLE\_P* e *CH\_COV2*, com valores de *p-value* variando de 0,00 a 0,16. Enquanto alterações nos demais parâmetros produziram pouca ou nenhuma resposta ao modelo.

Observando os parâmetros de maior sensibilidade na vazão, é possível notar que o escoamento superficial, contribuição de água subterrânea e movimento da água no solo são de grande importância na modelagem desta variável, evidenciado pelos parâmetros *CN2*, *GW\_REVAP* e *SOL\_K*. Carvalho (2014) e Ferrigo (2014), também identificaram o *CN2* e o *SOL\_K* como sendo os parâmetros mais influentes em seus modelos hidrológicos.

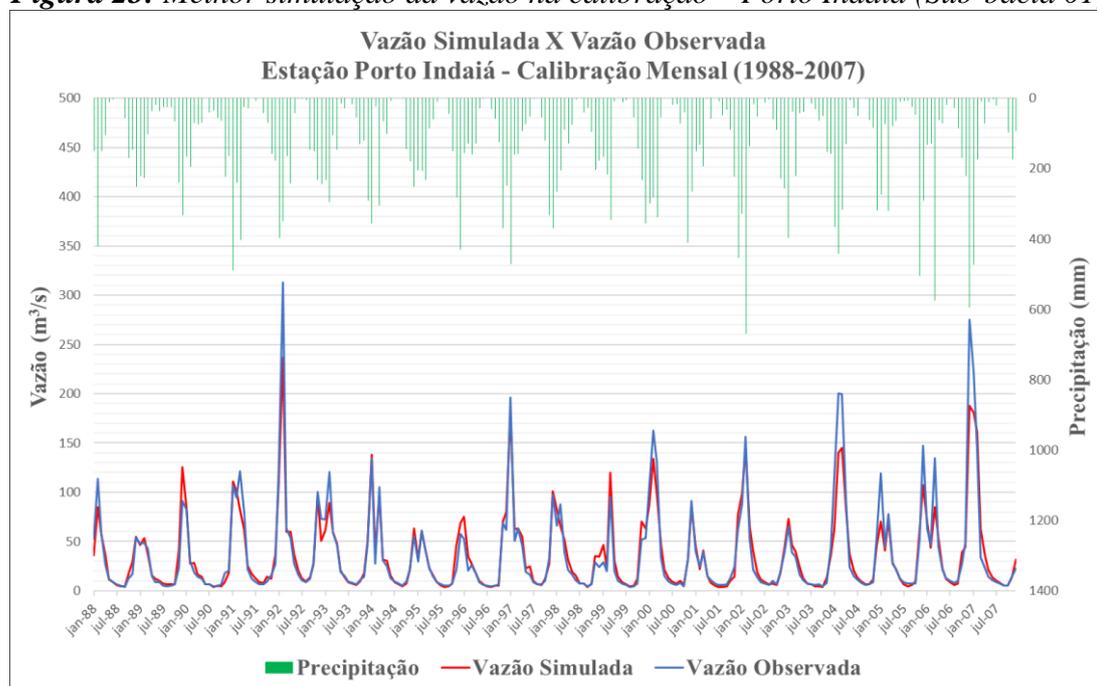
#### **4.3.2 Calibração do Modelo**

Como dito anteriormente, o *SWAT-CUP* realiza a análise de sensibilidade concomitantemente à calibração, e de maneira automática; assim, optou-se por utilizar nas etapas de calibração e verificação todos os 26 parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

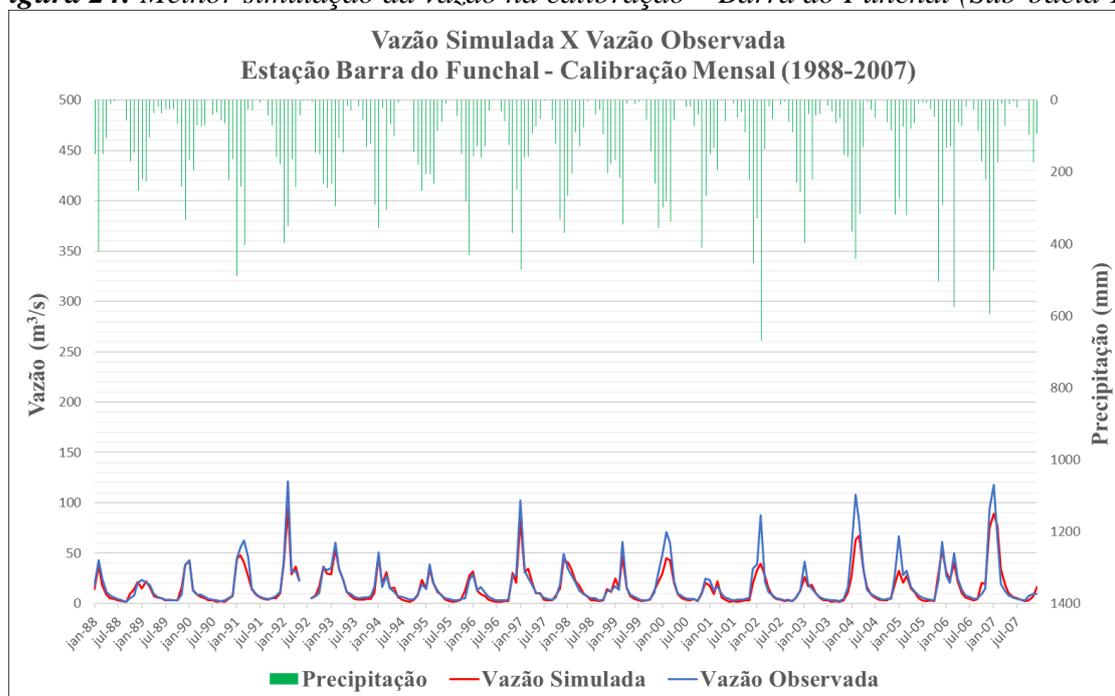
Poderia ter sido realizado a calibração com os 10 parâmetros mais sensíveis (5 parâmetros de vazão e 5 parâmetros de sedimentos), porém isto não foi feito no trabalho. Testes iniciais na calibração da vazão, onde foram utilizados 15 parâmetros, indicaram que ao se diminuir a quantidade de parâmetros para 14 ou 13 os resultados ficavam piores. Assim, decidiu-se por utilizar na calibração do modelo hidrossedimentológico (vazão e sedimentos) todos os 26 parâmetros identificados anteriormente. A calibração hidrossedimentológica ocorreu no período de 1988 a 2007 (20 anos) e foram realizadas 5 iterações de 500 simulações (mensais).

Os gráficos da série histórica das vazões médias mensais (simuladas e observadas), resultantes da melhor simulação obtida na calibração hidrossedimentológica mensal (iteração 3), podem ser visualizados nas figuras a seguir: Estação Porto Indaiá (**Figura 23**) e Estação Barra do Funchal (**Figura 24**).

**Figura 23: Melhor simulação da vazão na calibração – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)**



**Figura 24: Melhor simulação da vazão na calibração – Barra do Funchal (Sub-bacia 10)**

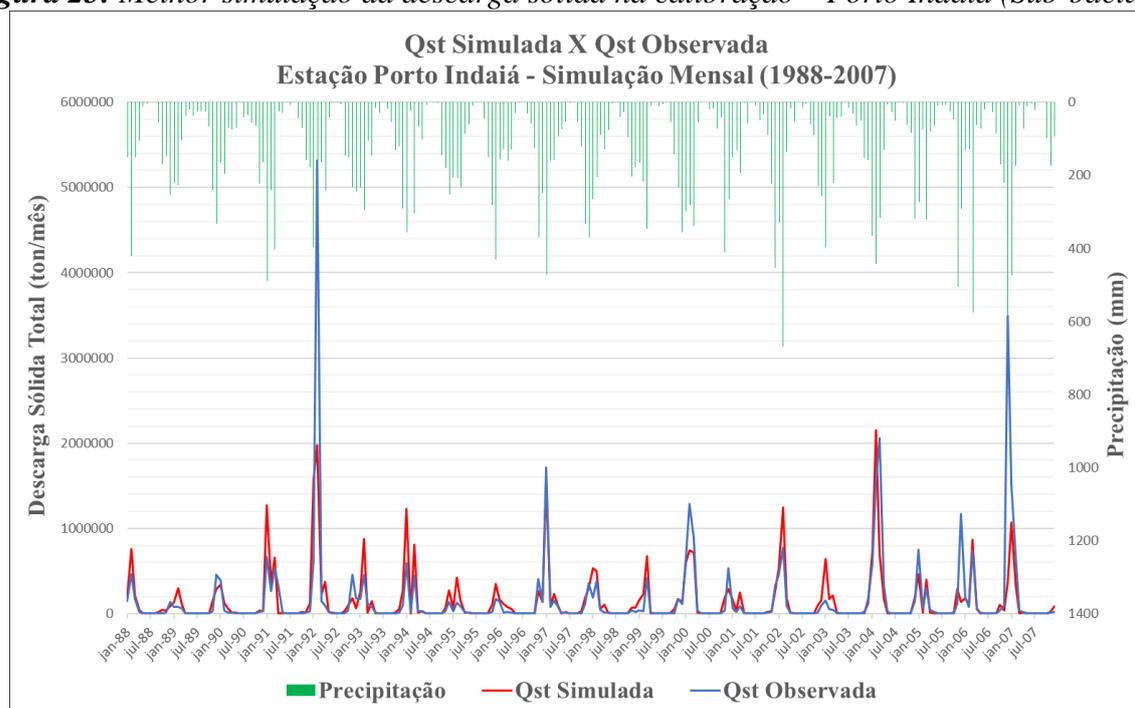


Apesar do *SWAT-CUP* apresentar saídas gráficas importantes que mostram a variação das simulações (na cor verde) correspondente a Faixa de Incerteza de Predição de 95% (95PPU), optou-se por gerar os próprios gráficos devido a baixa resolução desses hidrogramas, e a impossibilidade de edição e alteração dos mesmos não permitindo inserir a série história de precipitação.

Percebe-se que os resultados simulados de vazão foram representados ao longo da série histórica de monitoramento de maneira satisfatória nas duas figuras (*Figura 23* e *Figura 24*), principalmente no que se refere aos períodos de estiagem, onde o fluxo de base foi bem ajustado, não apresentando valores iguais a zero durante o período de recessão. Porém, em alguns períodos da série, como os anos de 1992, 1997, 2000, 2002, 2004, 2005 e 2007, percebe-se a tendência da simulação em subestimar o escoamento superficial nos meses chuvosos (picos), com valores de vazões simuladas menores que as observadas. Observa-se um melhor ajuste da simulação na estação fluviométrica Porto Indaiá (*Figura 23*) em comparação a estação Barra do Funchal (*Figura 24*), o que pode ser explicado em parte pela variabilidade climática na bacia.

O gráfico da série histórica das descargas sólidas totais mensais (simuladas e observadas) da Estação Porto Indaiá, resultantes da melhor simulação obtida na calibração hidrossedimentológica mensal, pode ser visualizado na *Figura 25*.

**Figura 25: Melhor simulação da descarga sólida na calibração – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)**



Quando se compara o gráfico da simulação da descarga sólida total obtida pelo modelo calibrado (**Figura 25**) com a simulação obtida pelo modelo não calibrado (**Figura 21**), percebe-se que houve uma melhora e o ajuste foi satisfatório, porém ainda há discrepâncias. Tais inconsistências não foram possíveis de eliminar. Praticamente em todos os períodos da série os dados observados de descarga sólida total foram ligeiramente menores que os dados simulados. Nestes anos a descarga sólida foi superestimada. Porém, há exceções onde a descarga sólida foi subestimada, como os picos de 1992, 1997, 2000 e 2007, correspondente a anos de grande precipitação.

Os resultados das análises estatísticas da modelagem na etapa de calibração mensal, efetuada em 5 iterações de 500 simulações, no período de 1988 a 2007, são apresentados na **Tabela 16**.

**Tabela 16: Avaliação estatística da calibração mensal (1988-2007)**

Iteração	Nº de Simulações	p-factor	r-factor	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	Nº Melhor Simulação
1ª-Flow_out_01	500	0,95	1,08	0,92	0,91	-7,2	477
1ª-Flow_out_10		0,95	0,91	0,89	0,88	3,9	
1ª-Sed_out_01		0,84	1,53	0,45	0,45	2,2	
2ª-Flow_out_01	500	0,96	1,09	0,92	0,91	-0,3	446
2ª-Flow_out_10		0,96	0,92	0,90	0,87	11,5	
2ª-Sed_out_01		0,83	1,08	0,49	0,49	-12,0	
3ª-Flow_out_01	500	0,96	0,98	0,92	0,91	1,9	446
3ª-Flow_out_10		0,95	0,88	0,90	0,87	12,5	
3ª-Sed_out_01		0,78	0,74	0,51	0,50	5,6	
4ª-Flow_out_01	500	0,95	0,70	0,93	0,92	3,2	470
4ª-Flow_out_10		0,95	0,69	0,92	0,91	12,8	
4ª-Sed_out_01		0,65	0,65	0,55	0,55	0,3	
5ª-Flow_out_01	500	0,95	0,82	0,92	0,91	3,3	446
5ª-Flow_out_10		0,93	0,77	0,90	0,86	14,0	
5ª-Sed_out_01		0,71	0,69	0,51	0,50	-17,4	

Analisando os resultados, percebe-se que  $R^2$  e  $NSE$  melhoraram com as iterações, ao contrário do  $p$ -factor e  $r$ -factor, que pioraram. O  $PBIAS$  variou muito de uma iteração para outra, e foi difícil enxergar uma melhora ou piora com as iterações. Como é recomendado um  $p$ -factor  $> 0,7$  e  $r$ -factor próximo de 1,00 (um), definiu-se com sendo o melhor resultado a simulação nº 446 da 3ª iteração da calibração mensal, apesar da 4ª iteração ter alcançado um  $NSE$  melhor.

Obteve-se na 3ª iteração da calibração os seguintes índices de desempenho da simulação da variável vazão: Estação Porto Indaiá ( $p$ -factor = 0,96;  $r$ -factor = 0,98;  $R^2$  = 0,92; e  $NSE$  = 0,91;  $PBIAS$  = 1,9) e Estação Barra do Funchal ( $p$ -factor = 0,95;  $r$ -factor = 0,88;  $R^2$  = 0,90; e  $NSE$  = 0,87;  $PBIAS$  = 12,5), e da variável descarga sólida total: Estação Porto Indaiá ( $p$ -factor = 0,78;  $r$ -factor = 0,74;  $R^2$  = 0,51; e  $NSE$  = 0,50;  $PBIAS$  = 5,6).

Conforme Moriasi *et al.* (2007) e Green e Van Griensven (2008), os valores de *NSE* obtidos na calibração mensal do modelo hidrossedimentológico indicam que o modelo simula de forma satisfatória a vazão e a descarga sólida total.

Depois de calibrado o modelo, verificou-se novamente a sensibilidade dos parâmetros relacionados com a estimativa da vazão e da descarga sólida total, bem como os valores ajustados de cada parâmetro, conforme *Tabela 17*.

**Tabela 17: Valores dos parâmetros mais sensíveis ajustados na calibração**

Valores dos parâmetros mais sensíveis - Bacia do Indaiá								
Posição	Vazão				Descarga Sólida Total			
	Parâmetro	Ajuste	p-value	t-stat	Parâmetro	Ajuste	p-value	t-stat
1	GW_REVAP	0,19	0,00	3,71	USLE_P	0,33	0,00	3,39
2	SOL_K	-0,56	0,00	-3,51	USLE_K	0,37	0,04	1,97
3	GWQMN	3223,47	0,00	3,18	SLSUBBSN	-0,004	0,10	-1,61
4	SHALLST	1341,90	0,01	-2,54	SPCON	0,004	0,18	1,33
5	CN2	-0,09	0,07	1,76	ADJ_PKR	0,67	0,22	1,22

Quanto à sensibilidade dos parâmetros relacionados apenas com a estimativa da vazão, os 5 (cinco) parâmetros que mais influenciaram nos resultados foram *GW\_REVAP*, *SOL\_K*, *GWQMN*, *SHALLST* e *CN2*, com valores de *p-value* variando de 0,00 a 0,07. Anteriormente o *CN2* era um dos parâmetros mais sensíveis do modelo. Pode-se inferir pelos resultados que os parâmetros associados ao escoamento subterrâneo (*GW\_REVAP*, *GWQMN* e *SHALLST*) foram bem significativos no modelo. Esses parâmetros têm relação com a quantidade de água que se move na zona de solo em resposta às deficiências de água e a profundidade do nível de água no aquífero raso.

Quanto a sensibilidade dos parâmetros no que se refere à estimativa da descarga sólida total, os 5 (cinco) parâmetros de maior relevância foram *USLE\_P*, *USLE\_K*, *SLSUBBSN*, *SPCON*, e *ADJ\_PKR*, com valores de *p-value* variando de 0,00 a 0,22. Os 3 (três) primeiros parâmetros têm relação com a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (*MUSLE*) utilizada no *SWAT*, especificamente com o fator de práticas conservacionistas (P), fator de erodibilidade do solo (K) e fator topográfico (LS). Os outros 2 (dois) parâmetros têm relação com transporte de sedimentos no canal principal e nos canais tributários.

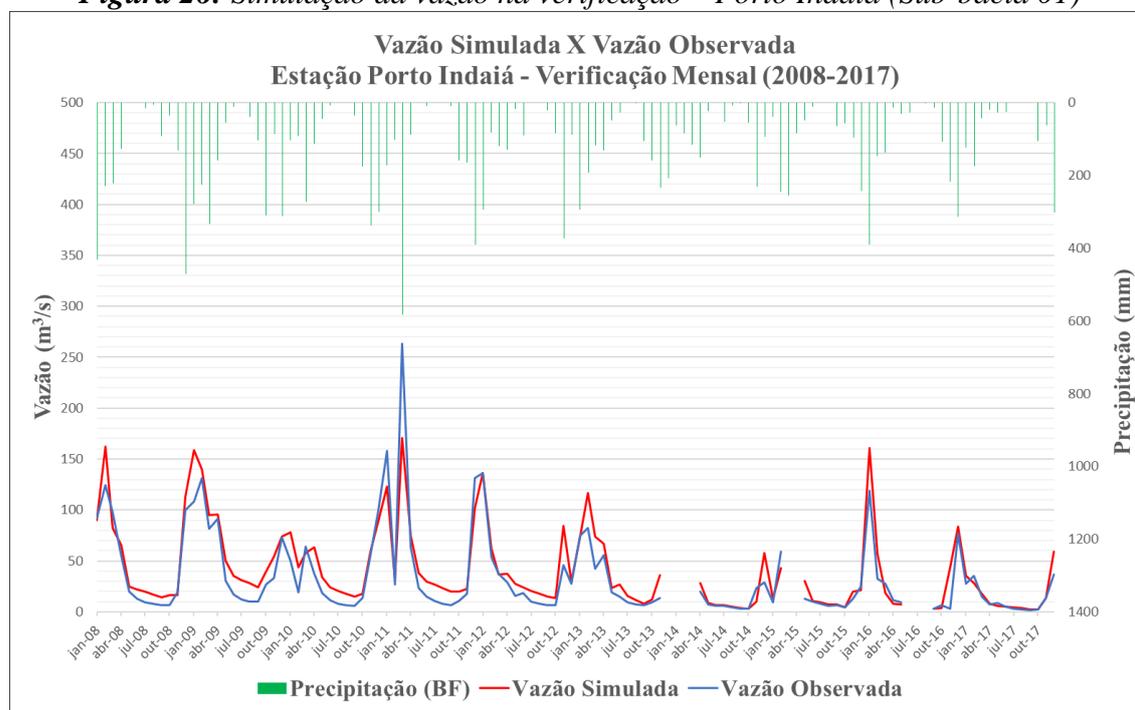
### 4.3.3 Verificação do Modelo

Finalizada a etapa de calibração, testou-se a eficiência do modelo frente a uma série independente de dados observados, ou seja, que não foi utilizada na calibração. Trata-se da verificação do modelo, que, nesse estágio, foi feita visando a avaliação da capacidade do *SWAT* em simular adequadamente as vazões e as descargas sólidas totais da bacia do rio Indaiá.

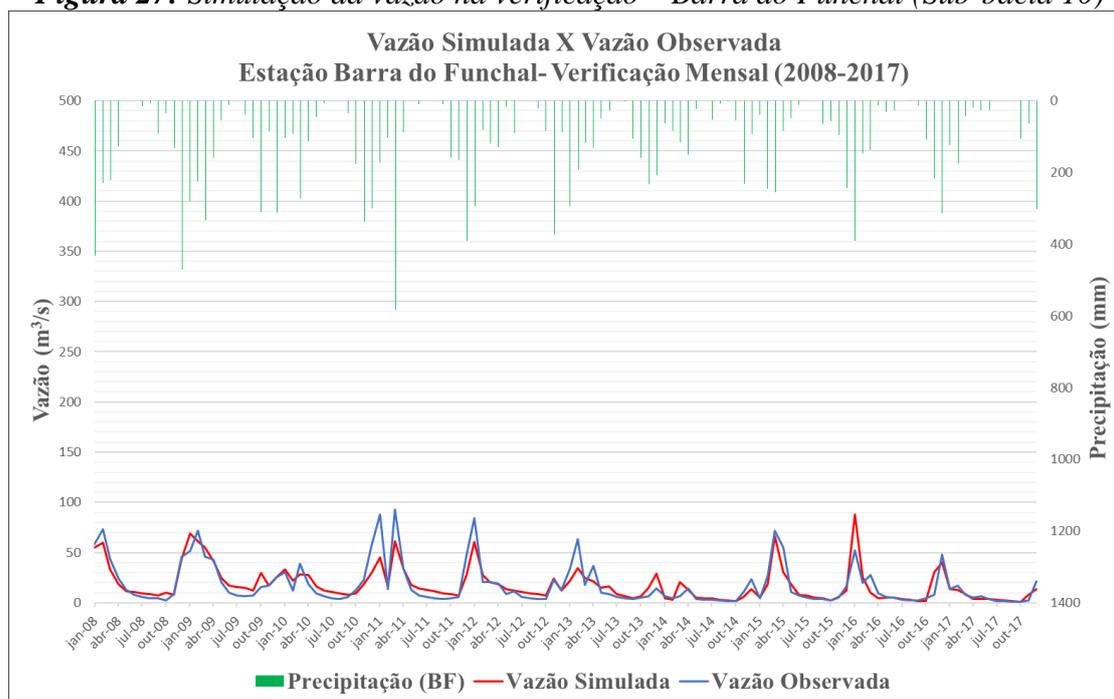
A verificação hidrossedimentológica ocorreu no período de 2008 a 2017 (10 anos). Foi realizada uma verificação de 500 simulações utilizando os intervalos de parâmetros obtidos na 3ª iteração da calibração (melhor resultado).

Os gráficos da série histórica das vazões médias mensais (simuladas e observadas), resultantes da simulação obtida na verificação hidrossedimentológica mensal, podem ser visualizados nas figuras a seguir: Estação Porto Indaiá (**Figura 26**) e Estação Barra do Funchal (**Figura 27**).

**Figura 26:** Simulação da vazão na verificação – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)



**Figura 27:** Simulação da vazão na verificação – Barra do Funchal (Sub-bacia 10)

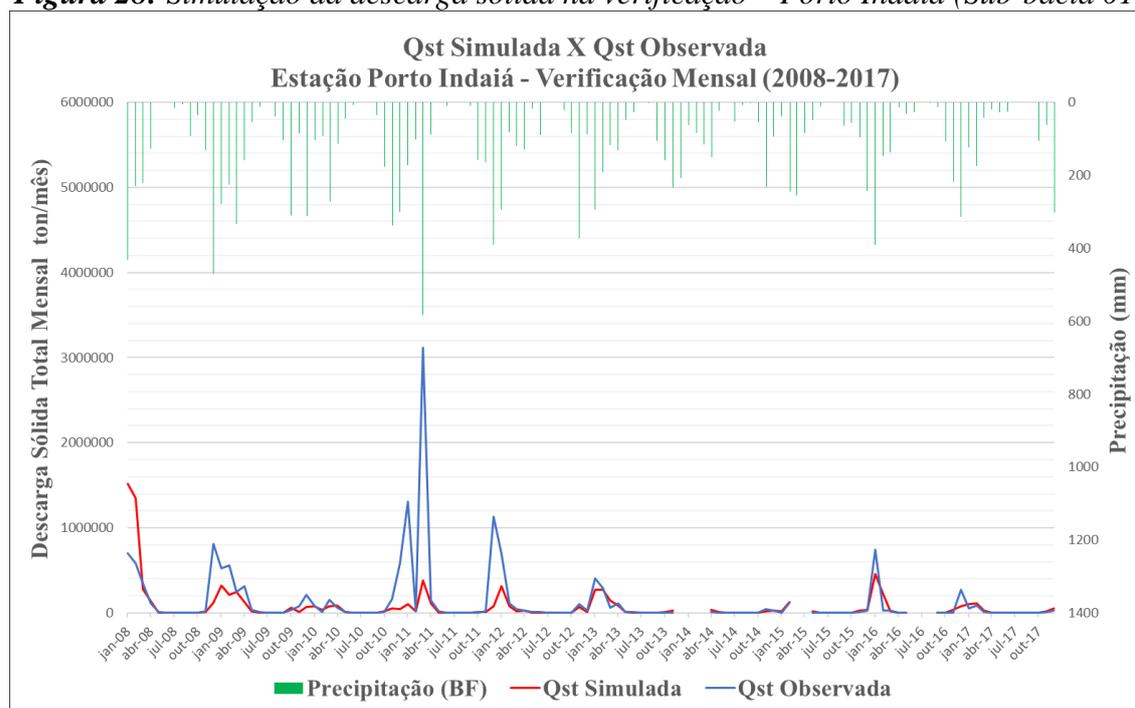


Percebe-se que os resultados simulados de vazão foram representados ao longo da série histórica de monitoramento de maneira pouco satisfatória nas duas figuras (**Figura 26** e **Figura 27**). Na **Figura 26** as simulações de vazão foram superestimadas praticamente em toda a série, principalmente nos anos de 2008, 2009, 2013 e 2016. Na **Figura 27** as simulações de vazão também foram superestimadas, porém em alguns anos chuvosos as simulações foram subestimadas, como é caso dos anos de 2011, 2012 e 2013.

Como já dito anteriormente, os dados pluviométricos e fluviométricos não estavam consistidos no período da verificação (2008 a 2017), o que pode explicar em parte estas discrepâncias.

O gráfico da série histórica das descargas sólidas totais mensais (simuladas e observadas) da Estação Porto Indaiá (Sub-bacia 01), resultantes da simulação obtida na verificação hidrossedimentológica mensal, pode ser visualizado na **Figura 28**.

**Figura 28:** Simulação da descarga sólida na verificação – Porto Indaiá (Sub-bacia 01)



Já o gráfico dos resultados simulados de descarga sólida total na etapa de verificação (**Figura 28**) apresentou um ajuste inadequado, sendo o valor subestimado em quase toda a série, principalmente nos anos de 2009, 2011 e 2012. Supõe-se que a origem das inconsistências das simulações de descarga sólida se deva em parte aos dados que geraram a curva-chave de sedimentos (amostragem diária de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) e medição de *vazão* ( $Q$ )), os quais apresentaram uma alta dispersão ao longo da série histórica. Uma possível solução seria analisar temporalmente a curva-chave de sedimentos, analisando o comportamento dos dados (dispersão) ao longo da série histórica com o objetivo de detectar tendências temporais que poderiam alterar a curva ou até mesmo definir curvas-chaves parciais.

Os resultados das análises estatísticas da modelagem na etapa de verificação mensal, efetuada no período de 2008 a 2017, comprovam a falta de eficiência na estimativa da descarga sólida, conforme **Tabela 18**.

**Tabela 18:** Avaliação estatística da verificação mensal (2008-2017)

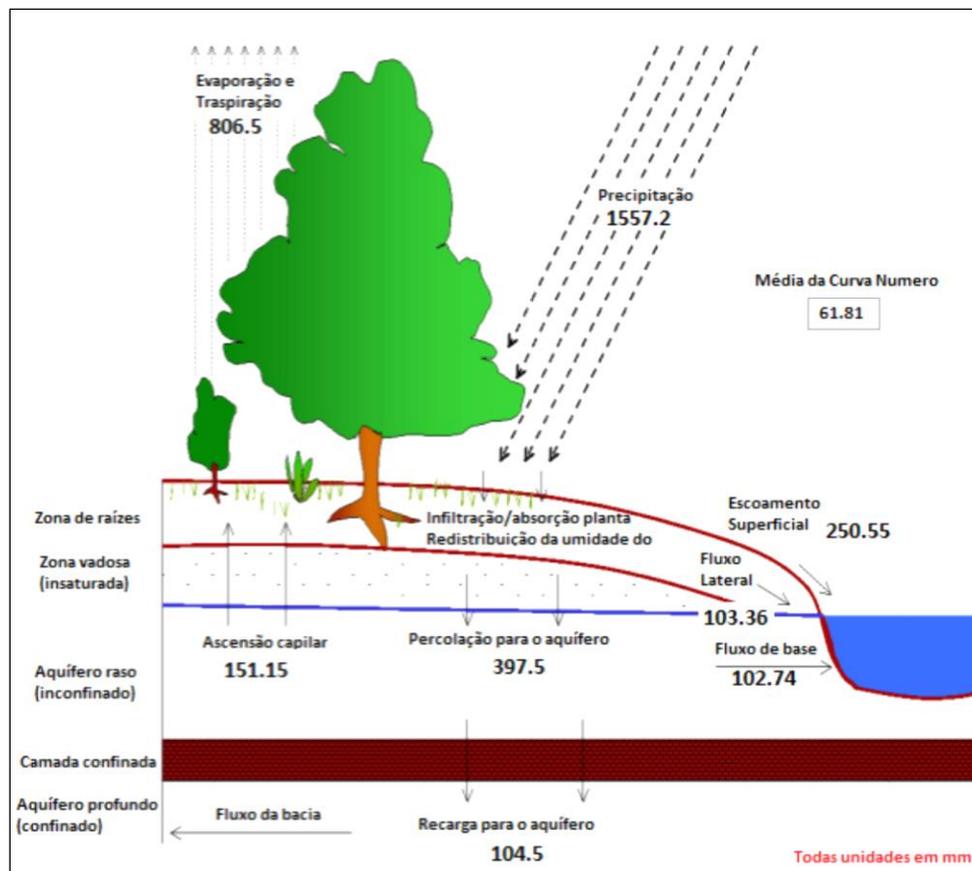
Verificação	Número de Simulações	p-factor	r-factor	R2	NSE	PBIAS
3 <sup>a</sup> -Flow_out_01	500	0,91	1,07	0,85	0,82	-20,8
3 <sup>a</sup> -Flow_out_10		0,82	0,86	0,77	0,77	0,5
3 <sup>a</sup> -Sed_out_01		0,76	1,04	0,19	0,16	43,5

Obteve-se na verificação do modelo os seguintes índices de desempenho da simulação da variável vazão: Estação Porto Indaiá ( $p\text{-factor} = 0,91$ ;  $r\text{-factor} = 1,07$ ;  $R2 = 0,85$ ;  $e\text{ NSE} = 0,82$ ;  $PBIAS = -20,8$ ) e Estação Barra do Funchal ( $p\text{-factor} = 0,82$ ;  $r\text{-factor} = 0,86$ ;  $R2 = 0,77$ ;  $e\text{ NSE} = 0,77$ ;  $PBIAS = 0,5$ ), e da variável descarga sólida total: Estação Porto Indaiá ( $p\text{-factor} = 0,76$ ;  $r\text{-factor} = 1,04$ ;  $R2 = 0,19$ ;  $e\text{ NSE} = 0,16$ ;  $PBIAS = 43,5$ ).

#### 4.3.4 Balanço Hídrico do Modelo Calibrado

A partir do modelo calibrado, executou-se novamente o *SWAT Check* para visualizar o balanço hídrico anual simulado para o período de calibração (1988 a 2007).

**Figura 29:** Balanço hídrico anual simulado para o período de calibração (1988 a 2007)



Fonte: Adaptado do Projeto SWAT Indaiá (2019).

Observando o esquema do balanço hídrico anual na fase terrestre, simulado pelo *SWAT* para o período de calibração (1988 a 2007), a precipitação total anual foi de 1.557,2 mm, a evapotranspiração real calculada foi cerca de 806,5 mm. Obteve-se um escoamento superficial de 250,55 mm, um fluxo lateral de 103,36 mm e uma transferência de 397,50 mm para o aquífero raso, com retorno de 151,15 mm para a zona vadosa por ascensão capilar do aquífero raso, 104,50

mm para o aquífero profundo e 102,74 mm para o canal do rio devido ao fluxo de base. Estes dados foram sumarizados na **Tabela 19**, com os valores em mm e suas respectivas porcentagens.

**Tabela 19:** Balanço hídrico anual simulado para o período de calibração (1988 a 2007)

Variável	mm.ano	%
Precipitação	1.557,20	100,00
Escoamento superficial	250,55	16,09
Fluxo de base	102,74	6,60
Fluxo lateral	103,36	6,64
Recarga para o aquífero profundo	104,50	6,71
Ascensão capilar do aquífero raso	151,15	9,71
Evapotranspiração real	806,50	51,79

Fonte: Autor (2019).

De posse destes resultados e com o objetivo de verificar a capacidade do modelo calibrado em representar o contexto hidrológico do cerrado, comparou-se com a compilação feita por Lima (2010) para a região do Cerrado no Distrito Federal (**Tabela 20**).

**Tabela 20:** Valores de referência para o balanço hídrico anual

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 <sup>2</sup> )	10		10		104,86	
Variável	mm.ano	%	mm.ano	%	mm.ano	%
Escoamento superficial	52,50	3,01	15,08	1,42	32,33	2,94
Fluxo 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	1.274,50	71,53	831,03	78,49	777,78	70,71

Fonte: Adaptado de Lima (2010). \*Valor não medido.

Com base nos valores apresentados na **Tabela 20**, pode-se inferir que a calibração do modelo resultou em um valor inferior para a evapotranspiração (51,79 % do total precipitado), que é um pouco mais da metade do valor esperado (em torno de 75% do total precipitado); superestimou o escoamento superficial (16,09 % do total precipitado), sendo 5 vezes maior que o valor esperado (em torno de 3% do total precipitado); e subestimou o fluxo de base (6,60 % do total precipitado), enquanto que deveria ser aproximadamente 26 % do total precipitado.

Apesar de tais inconsistências, em geral o modelo hidrossedimentológico gerado foi bastante consistente para as simulações da variável vazão, tanto na calibração quanto na verificação. Para as simulações da variável descarga sólida os resultados foram pouco satisfatórios, principalmente na verificação do modelo, o qual não foi capaz de estimar corretamente para um período diferente

do utilizado na calibração. Supõe-se que a origem das inconsistências se deva em parte aos dados que geraram a curva-chave de sedimentos (amostragem diária de descarga sólida em suspensão), os quais apresentaram uma grande dispersão ao longo da série histórica de 30 anos de dados (1988 a 2017).

#### 4.4 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

O SWAT permite aos seus usuários a possibilidade de visualizar as áreas da bacia hidrográfica onde a produção de sedimentos (sediment yield) é maior. Isso pode ser feito por sub-bacia ou HRU. Os resultados de produção de sedimentos por sub-bacia estão no arquivo de saída chamado *output.sub*, e os resultados por HRUs estão no arquivo de saída *output.hru*.

A partir do modelo hidrossedimentológico calibrado, obteve-se do *output.sub* os valores anuais de produção de sedimentos (ton/ha.ano) de cada sub-bacia para os anos de 1988 e 2007, bem como a média anual de 20 anos (1988 a 2017). Os resultados foram sumarizados na **Tabela 21**.

**Tabela 21:** Produção de sedimentos anual da bacia do Indaiá (por sub-bacia)

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Produção de Sedimentos (ton/ha.ano)	Produção de Sedimentos (ton/ha.ano)	Produção de Sedimentos (ton/ha.ano)
		1988	2007	Média de 20 anos
1	369,33	1,4	1,6	2,3
2	103,4	1,2	1,5	2,1
3	215,63	7,7	6,7	10,5
4	133,22	11,3	17,5	15,8
5	127,22	22,1	22,4	29,4
6	136,83	11,4	17,5	15,8
7	70,018	8,7	9,5	12,0
8	142,21	13,7	14,2	18,4
9	49,934	17,4	18,6	23,7
10	0,5688	7,6	7,9	10,3
11	310,41	1,7	2,0	2,5
12	26,86	4,7	4,7	6,3
13	265,87	2,7	1,8	2,0
14	271,92	3,5	2,7	2,8

Analisando os resultados expostos na **Tabela 21**, verifica-se que os valores são praticamente iguais em cada sub-bacia, variando muito pouco com uma leve tendência de aumento da produção de sedimentos no ano de 2007 quando comparado com 1988. Assim, por ser qualitativamente iguais os resultados, decidiu-se por gerar um único mapa da produção de sedimentos por sub-bacia, que refletisse a média anual de 20 anos (**Figura 30**). Gerou-se também um mapa de produção de sedimentos média anual de 20 anos por HRU (**Figura 31**), cujos valores estão no **APÊNDICE G**.

**Figura 30: Produção de sedimentos média anual da bacia do Indaiá (por sub-bacia)**

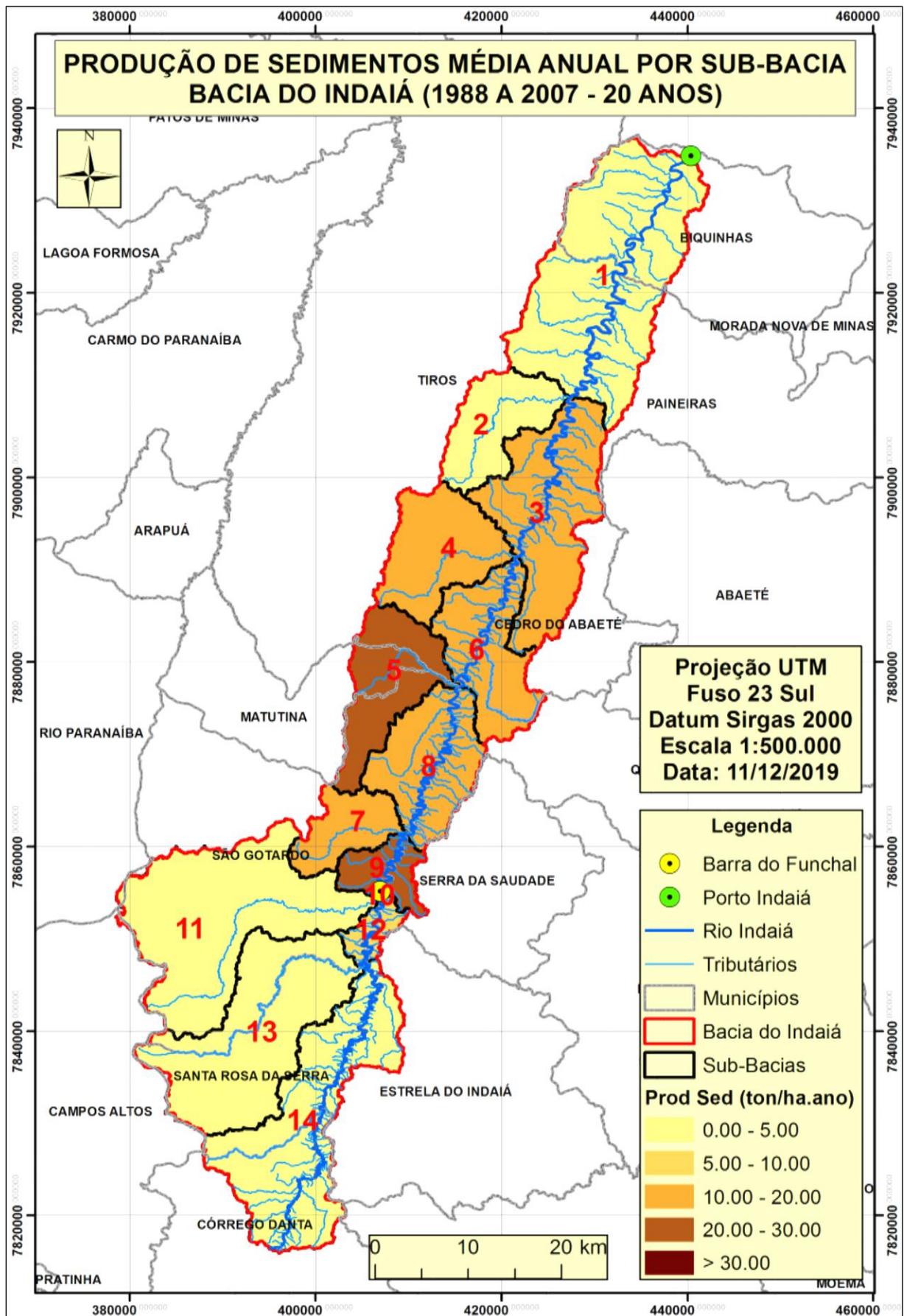
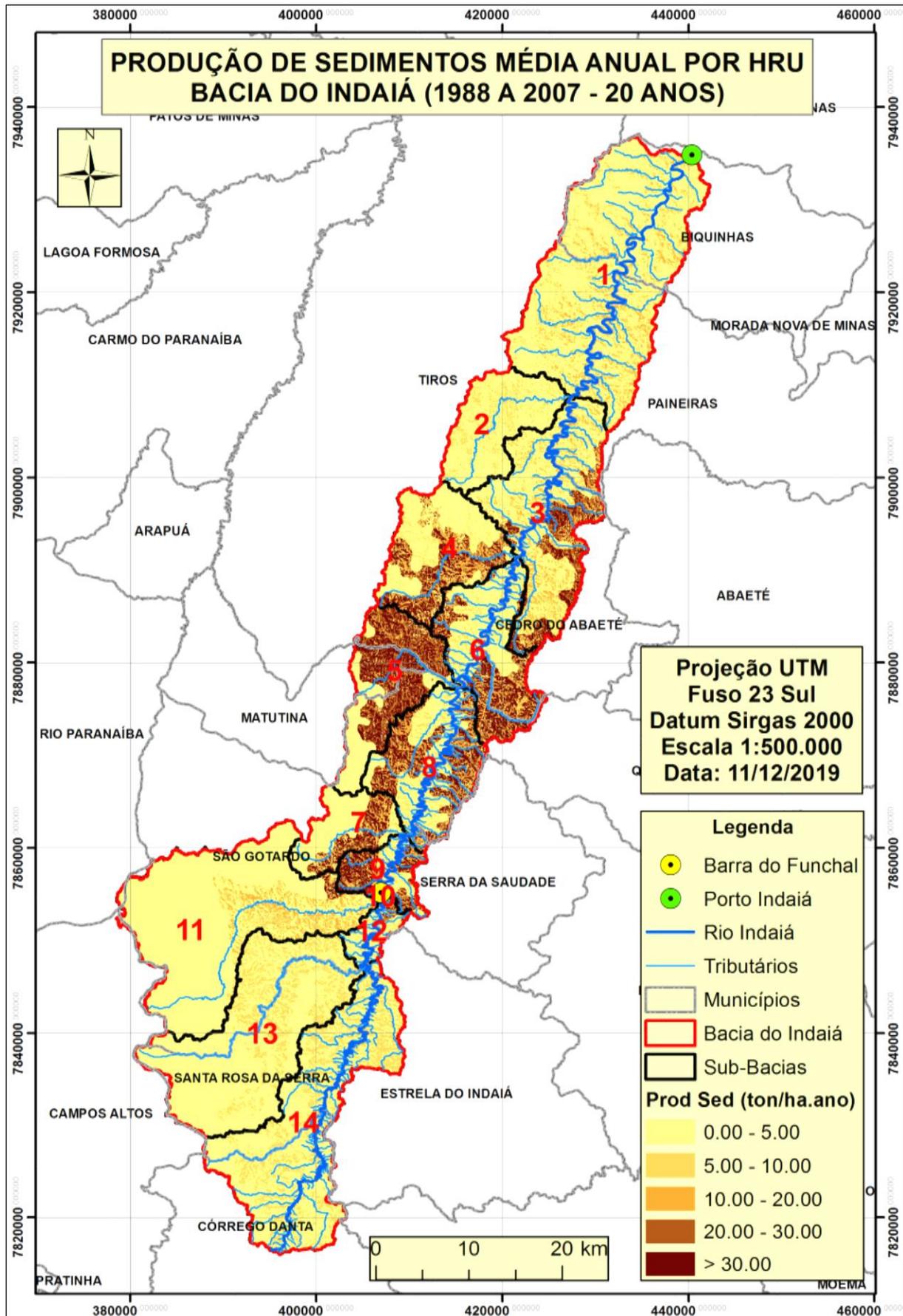


Figura 31: Produção de sedimentos média anual da bacia do Indaiá (por hru)



Analisando os resultados apresentados na **Tabela 21**, percebe-se que as sub-bacias mais críticas são as de número 5 (cinco) e número 9 (nove), seguidas das sub-bacias 8 (oito), 6 (seis), 4 (quatro), 7 (sete), e 3 (três). Ao visualizar os mapas de produção de sedimentos média anual, gerados por sub-bacia (**Figura 30**) e por hru (**Figura 31**), observa-se uma certa semelhança entre eles, sendo que por hru o mapa é melhor discretizado, indicando também que a sub-bacia 5 é a mais crítica. Ao analisar os mapas de solo, uso e cobertura do solo e declividade da bacia, observa-se que o solo das sub-bacias 5 e 9 em sua grande maioria é neossolo litólico e o uso e cobertura do solo é pastagem com alta declividade, o que contribui para formação de sedimentos carregados para os tributários e destes para a calha do rio Indaiá.

O resultado obtido de produção de sedimentos para a bacia do rio Indaiá corrobora com os resultados alcançados por Creech *et al.* (2015), os quais determinaram que as bacias do Alto São Francisco são as principais fontes de sedimentos carregados para a calha do rio São Francisco.

Assim, o mapa de produção de sedimentos média anual (ton/ha.ano) da bacia do rio Indaiá, de forma qualitativa, foi capaz de indicar uma tendência de ocorrência de maiores processos erosivos na porção central da bacia. Tal resultado poderá ser utilizado como instrumento útil no planejamento conservacionista da bacia do rio Indaiá, contribuindo para orientar as políticas públicas mitigadoras da degradação ambiental na área de estudo.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos no início do trabalho, foi possível concluir que:

- Os ajustes realizados nos valores dos parâmetros dos bancos de dados de entrada do *SWAT* (*Usersoil, Crop e WGEN*) foram fundamentais e extremamente necessários, pois sem esta etapa o modelo hidrossedimentológico a ser gerado não iria refletir as condições ambientais e climáticas da área de estudo proposta (bacia do rio Indaiá);
- Devido a ausência de informação sobre a descarga sólida na bacia do rio Indaiá, houve a necessidade da construção da curva-chave de sedimentos para que fosse possível gerar a série histórica de *descarga sólida total (Qst)* da Estação Porto Indaiá;
- A hipótese do trabalho de pesquisa foi confirmada, porém de forma qualitativa, com a ressalva da necessidade de testes adicionais para aprimorar as estimativas geradas;
- A análise de sensibilidade permitiu a identificação dos parâmetros mais significativos para a simulação da vazão e da descarga sólida total. Mostrou que parâmetros relacionados ao escoamento subterrâneo apresentaram maior sensibilidade na simulação de vazão, enquanto que parâmetros relacionados à *MUSLE* apresentaram maior sensibilidade na simulação da descarga sólida. Importante ressaltar que testes adicionais poderiam ter sido realizados com a inclusão e retirada de parâmetros na tentativa de aprimorar os resultados alcançados;
- Sem realizar o procedimento da calibração, a simulação inicial apresentou clara tendência em superestimar a vazão no período chuvoso (escoamento superficial) e subestimar no período de estiagem (fluxo de base);
- Não foi possível realizar a calibração diária somente a mensal devido à problemas na aquisição dos dados de concentração de sedimentos em suspensão, o que inviabilizou o procedimento de calibração no passo diário, o qual exige muito mais tempo de processamento. Assim, optou-se por realizar somente no passo mensal;
- Na calibração mensal do modelo, realizada para os anos de 1988 a 2007, o desempenho das simulações para vazão média mensal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,92$  e  $NSE=0,91$ ) e Estação Barra do Funchal ( $R^2=0,90$  e  $NSE=0,87$ ), e para descarga sólida total mensal ( $\text{ton}/\text{mês}$ ) foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,51$  e  $NSE=0,50$ ), resultados considerados satisfatórios;

- Na verificação mensal do modelo, realizada para os anos de 2008 a 2017, o desempenho das simulações para a vazão foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,85$  e  $NSE=0,82$ ) e Estação Barra do Funchal ( $R^2=0,77$  e  $NSE=0,77$ ), e para a descarga sólida total foi: Estação Porto Indaiá ( $R^2=0,19$  e  $NSE=0,16$ );
- O SWAT foi capaz de simular mensalmente de forma satisfatória a vazão (escoamento superficial e fluxo de base), tanto na calibração quanto na verificação do modelo, apresentando boa qualidade e eficiência da simulação hidrológica. No entanto, não simulou adequadamente a descarga sólida total, principalmente na verificação do modelo. Supõe-se que a origem das inconsistências das simulações de descarga sólida se deva em parte aos dados que geraram a curva-chave de sedimentos (amostragem diária de *descarga sólida em suspensão* ( $Q_{ss}$ ) e medição de *vazão* ( $Q$ )), os quais apresentaram uma alta dispersão ao longo da série histórica.
- A análise de incerteza da calibração por meio do *p-factor* e *r-factor* se mostrou eficiente, garantindo que a escolha da melhor simulação fosse de acordo com o intervalo aceitável dos parâmetros;
- Por fim, o mapa de produção de sedimentos média anual (ton/ha.ano) gerado por meio do modelo hidrossedimentológico calibrado, indica, de forma qualitativa, uma tendência de ocorrência de maiores processos erosivos na porção central da bacia, em sub-bacias com menor extensão e maior declividade. Tal resultado poderá ser utilizado como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões relacionadas ao planejamento conservacionista da bacia do rio Indaiá, contribuindo para orientar as políticas públicas mitigadoras da degradação ambiental na área de estudo.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- Melhorar a elaboração da curva-chave de sedimentos, analisando o comportamento dos dados (dispersão) ao longo da série histórica com o objetivo de detectar tendências temporais que poderiam alterar a curva ou até mesmo definir curvas-chaves parciais;
- Não utilizar no período de aquecimento dados repetidos de outros anos, e sim somente valores realmente observados para esse período;

- Realizar a calibração automática do modelo somente com os 10 parâmetros mais sensíveis (5 de vazão e 5 de sedimentos) e em escala diária na tentativa de melhorar os resultados das simulações;
- Realizar a calibração manual além da automática para conseguir um melhor refinamento dos resultados;
- Fazer além da calibração conjunta, a calibração separada de vazão e sedimentos e comparar os resultados;
- Calibrar a variável concentração de *sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>)* direto no *SWAT-CUP*, ao invés de transformar para descarga sólida utilizando uma curva-chave de sedimentos;
- Executar outros tipos de algoritmos de otimização além do *SUF2*, como Parasol e Glue, e comparar os resultados;
- Propor a integração entre os dados de sensoriamento remoto e a ferramenta de modelagem *SWAT*;
- Desenvolver uma base de dados do *SWAT* robusta e que contenha tipos de solo e uso e cobertura do solo do Brasil, evitando assim vários ajustes para a nossa realidade nacional;
- Sugerir e incentivar a atualização dos levantamentos básicos de Solo, Uso do Solo e Topográficos na região a ser modelada;
- Sugerir e incentivar no ambiente acadêmico a disponibilidade de uma estrutura computacional (hardware) adequada para processamento de grande volume de dados, principalmente o processamento das séries diárias que exigem muita memória;
- Sugerir e incentivar o treinamento adequado para se trabalhar com a ferramenta de modelagem *SWAT*, uma vez que ela é exigente, complexa e tem muitos detalhes.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, v.3, n.4, p.1340-1352, 2004. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/3/4/1340>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v.524, p.733-752, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ABBASPOUR, K. C. *SWAT-CUP: 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, Dübendorf, Switzerland, 2015, 95p.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIK, J.; SRINIVASAN, R. Modelling Hydrology and Water Quality in the Prealpine/Alpine Thur Watershed Using SWAT. *Journal of Hydrology*. v.333, p.413-430, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ADEGEDE, A. P.; C. C. MBAJIORGU. Event-based sediment yield modeling for small watersheds using MUSLE in north-central Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, v.21, n.2, p.7-17, 2019. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5231>. Acesso em: 12 out. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Ministério do Meio Ambiente. *Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil*. Brasília/DF: ANA, 2012. 264p. ISBN 978-85-8210-007-3. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/Panorama\\_Qualidade\\_Aguas\\_Superficiais\\_BR\\_2012.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/Panorama_Qualidade_Aguas_Superficiais_BR_2012.pdf). Acesso em: 05 out. 2019.
- ALEWELL, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; PANAGOS, P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, v.7, p.203-225, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ALIGHALEHBABAKHANI, F.; *et al.* Estimates of sediment trapping rates for two reservoirs in the Lake Erie watershed: Past and present scenarios. *Journal of Hydrology*, v.544, p.147-155, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.032>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ALIGHALEHBABAKHANI, F.; *et al.* Forecasting the remaining reservoir capacity in the Laurentian Great Lakes watershed. *Journal of Hydrology*, v.555, p.926-937, 2017b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.052>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista FAE*, Curitiba/PR, v.20, n.1, p.129-137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>. Acesso em: 12 out. 2019.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. *Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas*. In: PRUSKI, F. F. (Ed). *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009. cap.4, p.75-107.
- ARAGAO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; PANTALEAO, S. M. *Avaliação da Influência da Mata Ciliar na Bacia do Rio Siriri, Sergipe, sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos via Modelo SWAT*. In: VII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, 2014, Aracaju/SE. Anais... Brasília/DF: Embrapa, 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1001638>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. *Gestão Ambiental de Áreas Degradadas*. 10.ed. Rio de Janeiro/RJ: Bertrand Brasil, 2013. 322p. Bibliografia. ISBN 978-85-286-1095-6.
- ARNOLD, J. G.; KINTY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. *Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute, 2012a. Report n° 439, 650p.
- 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. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, v.55, n.4, p.1491-1508, 2012b. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=42256>. Acesso em: 12 out. 2019.
- 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*, v.34, n.1, p.73- 89, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ARNOLD, J.; SRINIVASAN, R.; NEITSCH, S.; GEORGE, C.; ABBASPOUR, K.; GASSMAN, P.; HAO, F. H.; VAN GRIENSVEN, A.; GOSAIN, A.; DEBELS, P. *Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Applications*, WASWC, Bangkok, 2009.

- ARROIO JUNIOR, P. P. *Avaliação da produção e transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do rio Itaqueri, Municípios Itirapina e Brotas - SP*. 2013. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.
- BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. 2005. 148f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2005.
- BANDEIRA, J. V.; FARIAS, E. G. G.; LORENZZETTI, A.; SALIM, L. H. Resposta morfológica da foz do Rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos nos reservatórios. *Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, Rio Grande/RS, v.23, n.1, p.5-17, 2013. ISSN 2358-3452. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/3687/2183>. Acesso em: 05 out. 2019.
- BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; DALBIANCO, L.; RAMON, R. Description of hydrological and erosion processes applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. *Journal Soils Sediments*, v.14, n.7, p.1298–1310, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11368-014-0903-7>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.4, p.938-944, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.34692>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BELTRÃO, J. A. *Análise da variabilidade da precipitação e dos processos hidrossedimentológicos na bacia do alto rio São Francisco*. 2015. 107f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, 2015.
- BERTANI, G. *Influência da expansão agrícola no escoamento superficial e na produção de sedimentos no cerrado do meio norte do Mato Grosso*. 2014. 93f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP, 2014.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 9.ed. São Paulo/SP: Ícone Editora, 2014. 360p. Bibliografia. ISBN 978-85-274-0980-3.
- BLAINSKI, E.; PORRAS, E. A. A.; GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Simulação de cenários de uso e ocupação das terras na bacia hidrográfica do Rio Camboriú utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre/RS, v.23, n.33, p.1-12, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; MONTEIRO, J. A. F.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in Brazilian watersheds and river basins. *Tópicos em Ciência do Solo*, v.9, p.241-290, 2015.
- BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. H. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; ALLEN, P. M.; VOLK, M. Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. *Journal of Environmental Quality*, v.43, n.1, p.55-66, 2014. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/43/1/55>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (1973-1987). *Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais*. 34 vols. Rio de Janeiro/RJ: MME, 1987.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco*. Brasília/DF: MMA, 2006. 148p. Disponível em: [www.mma.gov.br/estruturas/161/publicacao/161\\_publicacao03032011023538.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/161/publicacao/161_publicacao03032011023538.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- BRESSIANI, D. A., GASSMAN, P. W., FERNANDES, J. G., GARBOSSA, L. H. P., SRINIVASAN, R., BONUMÁ, N. B., MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.8, n.3, p.9-35, 2015. Disponível em: <http://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BRIAK, H.; MOUSSADEK, R.; ABOUMARIA, K.; MRABET, R. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *International Soil and Water Conservation Research*, v.4, n.3, p.177–185, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.002>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BRIAK, H.; MRABET, R.; MOUSSADEK, R.; ABOUMARIA, K. Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco). *International Soil and Water Conservation Research*, v.7, n.2, p.176-183, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.002>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BRITO, E. *Estimativa da produção de sedimentos da bacia do rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático Soil And Water Assessment Tool (SWAT)*. 2015. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2015.
- BROOKS, E. S.; DOBRE, M.; ELLIOT, W. J.; WU, J. Q.; BOLL, J. Watershed-scale evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model in the Lake Tahoe Basin. *Journal of Hydrology*, v.533, p.389–402, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.004>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; MAGNER, J. A. *Hydrology and the Management of Watersheds*. Fourth edition. Oxford, UK: Wiley Blackwell, 2013. 545p. ISBN 978-0470963050.

- CAPECHE, C. L.; MACEDO, J. R.; PRADO, R. B.; PIMENTA, T. S.; MELO, A. S. *Degradação do Solo e da Água: Impactos da Erosão e Estratégias de Controle*. In: TAVARES, S. R. D. L. et al. *Curso de Recuperação de Áreas Degradadas: A Visão da Ciência do Solo no Contexto do Diagnóstico, Manejo, Indicadores de Monitoramento e Estratégias de Recuperação*. Rio de Janeiro/RJ: Embrapa Solos, 2008. Cap. 5, p.105-132. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/340067>. Acesso em: 12 out. 2019.
- CAPRARIO, J.; RECH, A. S.; CAPRARIO, G. N.; FINOTTI, A. R. Simulação Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brasil). *Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ*, v.40, n.1, p.102-114, 2017. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_1\\_102\\_114](http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_102_114). Acesso em: 12 out. 2019.
- CARVALHO, A. R. L. *Reservatórios de regularização de usinas hidrelétricas: Contribuição para uma matriz energética mais limpa*. 2015. 173f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2015.
- CARVALHO, F. H. *Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro*. 2014. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2014.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. 2.ed. Rio de Janeiro/RJ: Interciência, 2008. 600p. Revisado e Ampliado. ISBN 978-85-719-3181-7.
- CARVALHO, N. O. *Produção de Sedimentos em Função da Variabilidade Climática: O Estudo de Caso da Área Contribuinte ao Reservatório de Três Marias, Região do Alto São Francisco*. Brasília/DF: ANEEL/PNUD/CT Brasil, 2001. 51p. Projeto BRA/00/029.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Brasília/DF: ANEEL, 2000a. 140p.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília/DF: ANEEL, 2000b. 154p.
- CASSOL, E. A.; MARTINS, D.; ELTZ, F. L. F.; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Piracicaba/SP, v.15, n.3, p.220-231, 2007. Disponível em: [http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1398783836\\_art04.pdf](http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1398783836_art04.pdf) Acesso em: 12 out. 2019.
- CASTRO, K. B. *Avaliação do Modelo SWAT na Simulação da Vazão em Bacia Agrícola do Cerrado Intensamente Monitorada*. 2013. 122f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.
- CASTRO, K. B.; ROIG, H. L.; LIMA, J. E. F. W.; FERRIGO, S. Aplicação de série temporal mínima para simulação de vazões em bacia experimental do cerrado. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.68/8, p.1497-1513, 2016.
- CATELANI, C. S. *Geotecnologias aplicadas à análise do assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenário de escassez de dados de séries históricas*. 2015. 138f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Paulista, Guaratinguetá/SP, 2015.
- CHANDRA, P.; PATEL, P. L.; POREYC, P. D.; GUPTA, I. D. Estimation of sediment yield using SWAT model for Upper Tapi Basin. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, v.20, n.3, p.291-300, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09715010.2014.902170>. Acesso em: 12 out. 2019.
- CHAVES, T. A. *Integração de modelos hidrológico e econômico para a avaliação dos custos internos da erosão na agricultura em bacias hidrográficas*. 2016. 140f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.
- COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2001.
- CONCEIÇÃO, J. R. *Metodologia para Identificação de Áreas Prioritárias para Redução da Erosão Hídrica em Bacias de Mananciais de Abastecimento Público do Paraná: Estudo de Caso Bacia do Passaúna*. 2014. 94f. Dissertação (Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI, Curitiba/PR, 2014.
- CORREA, N. F.; RIBEIRO, V. O.; MIOTO, C. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. *Anuário do Instituto de Geociências*, v.40, n.1, p.217-225, 2017. Disponível em: [www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1173.pdf](http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1173.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- CREECH, C. T. *Coupled Sediment Yield and Sediment Transport Model to Support Navigation Planning in Northeast Brazil*. 2014. 474p. Dissertation (Doctor of Philosophy), Wayne State University. Detroit/Michigan, 2014.
- CREECH, C. T.; SIQUEIRA, R. B.; SELEGEAN, J. P.; MILLER, C. Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, v.8, n.3, p.140-157, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3965/ijabe.20150803.1372>. Acesso em: 05 out. 2019.

- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNADEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial*. São José dos Campos/SP: INPE, 2001. 103p. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acesso em: 28 set. 2019.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, Lavras/MG, v.27, n.6, p.1260-1263, 2003. Disponível em: [http://www.editora.ufla.br/revista/27\\_6/art08.htm](http://www.editora.ufla.br/revista/27_6/art08.htm). Acesso em: 12 out. 2019.
- DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências*, São Paulo/SP, v.34, n.4, p.816-827, 2015. Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/10580>. Acesso em: 12 out. 2019.
- DE ROO, A. P. J., OFFERMANS, R. J. E., CREMERS, N. H. T. D. LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: II-sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, v.10, n.8, p.1119-1126. 1996b. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V). Acesso em: 12 out. 2019.
- DE ROO, A. P. J., WESSELING, C. G., RITSEMA, C.J. 1996b. LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I-theory, input and output. *Hydrological Processes*, v.10, n.8, p.1107- 1117. 1996a. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4). Acesso em: 12 out. 2019.
- DNAEE. (Brasil). Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. *Projeto de Consistência de Dados Pluviométricos da Bacia do Rio São Francisco – Sub-bacias 40 a 44. Relatório Parcial: Sub-bacia 40*. Belo Horizonte/MG. 1995.
- DOOGE, J. The hydrologic cycle as a closed system. *Hydrological Sciences Journal*. v.13, n.1, p.58-68, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626666809493568>. Acesso em: 12 out. 2019.
- DURU, U.; ARABI, M.; WOHL, E. E. Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. *Physical Geography*, v.39, n.3, p.264-289, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1342199>. Acesso em: 12 out. 2019.
- EDUARDO, E. N. *Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio das mortes, UPGRH-GD02*. 2016. 133f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2016.
- EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. *Field methods for measurement of fluvial sediment*. In: *Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey* (USGS). Reston, Virginia, 1999. Chapter C2. 89p. ISBN 0-607-89738-4. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-c2/>. Acesso em: 12 out. 2019.
- EILERS, V. H. M. Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico. In: *XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Cuiabá/MS, 20p., 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23458>. Acesso em: 06 out. 2019.
- FAGUNDES, H. O. *Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto*. 2018. 201f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2018.
- FERNANDES, G. F. *Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT*. 2015. 185f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2015.
- FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. *Espaço Aberto*, PPGG-UFRJ, v.6, n.1, p.209-247, 2016. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5793398>. Acesso em: 12 out. 2019.
- FERREIRA, A. N.; SILVA, J. S.; BRITES, C. R. C.; FERRIGO, S. Modelagem hidrológica da Bacia do Riacho Fundo no Distrito Federal, utilizando o modelo SWAT. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Anais...ABRH: Florianópolis/SC, p.1-8, 2017.
- FERREIRA, R. S. *Análise da produção de carga líquida e sólida na bacia do Ribeirão do Gama- DF através do modelo SWAT*. 2016. 144f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.
- FERRIGO, S. *Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF*. 2014. 164f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2014.
- FERRIGO, S. *Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal*. 2011. 90f. Trabalho de Conclusão do Curso – Instituto de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 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: *X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, Anais..., ABRH: Foz do Iguaçu/PR, p. 1-18, 2012.

- FERRIGO, S.; MINOTI, R. T.; ROIG, H.; KOIDE, S. Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Anais...Bento Gonçalves/RS, p-1-8, 2013.
- FERRIGO, S.; TÁVORA, B. E.; MINOTI, R. T.; LIMA, J. E. F. W.; KOIDE, S. Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Distrito Federal. In: *XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, Anais... ABRH: João Pessoa/PB, p.1-15, 2014.
- FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.5, p.1603-1612, 2007. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23968>. Acesso em: 12 out. 2019.
- FOTEH, R.; GARG, V.; NIKAM, B.R.; KHADATARE, M.Y.; AGGARWAL, S.P.; KUMAR, A.S. Reservoir sedimentation assessment through remote sensing and hydrological modelling. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v.46, n.11, p.1893–1905, 2018.
- GALHARTE, C. A.; VILLELA, J. M.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.194-201, 2014. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v18n02/v18n02a10.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BRAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. *Proceedings of the 2011 International SWAT Conference & Workshops*. Toledo, Spain, 2011. 22p.
- GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.4, p.1211-1250, 2007. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23637>. Acesso em: 12 out. 2019.
- GROHMANN, C. H. Análise comparativa preliminar entre dados SRTM, Topodata, ASTER GDEM e Modelos de Superfície/Terreno do Projeto Radiografia da Amazônia. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, João Pessoa/PB, p.1-7, 2015. Disponível em: [www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1173.pdf](http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1173.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- GRUM, B.; WOLDEAREGAY, K.; HESSEL, R.; BAARTMAN, J. E.; ABDULKADIR, M.; YAZEW, E.; KESSLER, A.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM). *Catena*, v.159, p.20–34, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.018>. Acesso em: 12 out. 2019.
- GUEDES JUNIOR, E. *Avaliação da erosão hídrica e transporte de sedimentos através do modelo hidrossedimentológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*. 2015. 85f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro/SP, 2015.
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. *Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações*. 9.ed. Rio de Janeiro/RJ: Bertrand Brasil, 2014. 340p. Bibliografia. ISBN 978-85-286-0738-3.
- GUIMARÃES, C. C. B. *Intemperismo de Solos e a Energia Eletromagnética sob a Ótica de Várias Faixas do Espectro (Gama, raios X, Vis, NIR, SWIR e MIR)*. 2019. 172f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP, 2019.
- GUIMARÃES, C. F. *Simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. 2016. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2016.
- GUPTA, H. V. S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n.2, p.135-143, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135)). Acesso em: 12 out. 2019.
- GUPTA, H. V. S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, v.34, n.4, p.751-763, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/97WR03495>. Acesso em: 12 out. 2019.
- HAIJGHOLIZADEH, M.; MELESSE, A.M.; FUENTES, H.R. Erosion and sediment transport modelling in shallow waters: A review on approaches, models and applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v.15, n.518, p.1-24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph15030518>. Acesso em: 12 out. 2019.
- HALLOUZ, F.; MEDDI, M.; MAHÉ, G.; ALIRAHMANI, S.; KEDDAR, A. Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Science*, v.32, n.1, p.79–88, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.004>. Acesso em: 12 out. 2019.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature, Applied Engineering in Agriculture, v.1, n.2, p.96–99, 1985. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=26773>. Acesso em: 12 out. 2019.
- HERRERA, D. J. M. *Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento*. 2013. 120f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.

- HIMANSHU, S. K.; PANDEY, A.; YADAV, B.; GUPTA, A. Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model. *Soil & Tillage Research*, v.192, p.42-58, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.016>. Acesso em: 05 out. 2019.
- HUSSAIN, F.; GHULAM, N.; WU, R.S.; HUSSAIN, B.; ABBAS, T. Parameter evaluation for soil erosion estimation on small watersheds using SWAT model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.12, n.1, p.96-108, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.25165/ij.ijabe.20191201.3769>. Acesso em: 12 out. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil. Documentação Técnica Geral*. Rio de Janeiro/RJ: IBGE, 2018. 8p.
- ISSAKA, S.; ASHRAF, M. A. Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, v.1, n.1, p.1-11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>. Acesso em: 28 set. 2019.
- JHA, M.; GASSMAN, F.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. G. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, v.40, p.811-825, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb04460.x>. Acesso em: 12 out. 2019.
- KRYSANOVA, V.; WHITE, M. Advances in water resources assessment with SWAT – an overview. *Hydrological Sciences Journal*, v.60, n.5, p.771-783, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1029482>. Acesso em: 12 out. 2019.
- KUWAJIMA, J. I. *Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de Assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)*. 2012. 158f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2012.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa/MG, v.36, p.623-634, 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1802/180222641031.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- LIMA, J. E. F. W. Determinação e simulação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica do Cerrado. 2000. 75f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Agroambientais) – Faculdade de Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2000.
- 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*. 2010. 312f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2010.
- LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CHAVES, A. G. M.; SCILEWSKI, L. *Diagnóstico do Fluxo de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio São Francisco*. Planaltina/DF: Embrapa Cerrados/ANEEL/ANA, 2001. 108p. ISBN 85-7075-016-1. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/564320/1/lima01.pdf>. Acesso em: 05 out. 2019.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. *Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado*. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves/RS, p.1-8, 2013a.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. *Development of a soil database for applying SWAT model in a catchment of the Brazilian Savanna*. SWAT Conference 2013, Toulouse, p.1-10, 2013b.
- LOPES, J. E. G.; BARROS, M. T. L.; BRANDAO, J. L. B. *Projeto de Gerenciamento Integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco – Subprojeto 4.4: determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco*. Brasília/DF: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002.
- LOPES, T. R. *Modelagem hidrossedimentológica para bacia do alto Teles Pires*. 2016. 106f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop/MT, 2016.
- LOPES, V. L. *A numerical model of watershed erosion and sediment yield*. 2019, 163f. Ph.D. Thesis (Watershed Management) – University of Arizona. Tucson, Arizona, 1987.
- LOU, R. F. *Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ*. 2010, 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2010.
- LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do Ribeirão Concórdia, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.18, n.2, p.39-54, 2013. Disponível em: [http://132.248.9.34/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursos\\_hidricos/2013/vol18/no2/4.pdf](http://132.248.9.34/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursos_hidricos/2013/vol18/no2/4.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- MACÊDO, Í. L. *Estudo de Modelos em Ambiente de Geoprocessamento para a Previsão de Erosão e Assoreamento de Reservatórios: o Caso da Bacia do Rio Indaiá-UHE Três Marias, MG*. 2009. 312f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2009.
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.4, p.735-741, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/00D/rbcs/v27n4/a18v27n4.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.

- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de Cenários Alternativos de Uso da Terra em uma Microbacia Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.4, p.727-733, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v27n4/a17v27n4>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHAES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, Canoas/RS, v.6, n.2, p.35-47, 2012. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MARTINS, C. S. *Influência do tipo de uso e ocupação do solo no assoreamento do reservatório Bom Jardim, Uberlândia-MG*. 2018. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2018.
- MAURY, S.; GHOLKAR, M.; JADHAV, A.; RANE, N. Geophysical evaluation of soils and soil loss estimation in a semiarid region of Maharashtra using revised universal soil loss equation (RUSLE) and GIS methods. *Environmental Earth Science*, v.78, n.144, p.1-15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8137-z>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MEDEIROS, I. C.; SILVA, R. M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. *Geociências*, São Paulo/SP, v.33, n.3, p.457-471, 2014. Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/9220>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MEDEIROS, I. C.; XAVIER, A. P. C.; SILVA, A. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. *Simulação da produção de sedimentos utilizando dados de entrada de alta resolução espacial no modelo SWAT*. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves/RS, p.1-8, 2013.
- MENEZES, P. H. B. J. *Estudo da Dinâmica Espaço-Temporal do Fluxo de Sedimentos a partir das Propriedades Ópticas das Águas no Reservatório de Três Marias - MG*. 2013. 112f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.
- MINGOTI, R.; SAIS, I. C. R.; PADOVANI, C. R.; CALHEIROS, D. F.; OLIVEIRA, M. D. Variação da produção de sedimentos entre 1985 e 2017 na bacia do rio São Lourenço. *Anais XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Santos/SP, 2019. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1108722>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, v.19, p.205-234, 1965. Disponível em <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-environment>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MORAES, J. M.; SHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROPPPO, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre/RS, v.8, n.1, p.61-70, 2003. Disponível em: [http://www.academia.edu/download/39523439/Propriedades\\_Fisicas\\_dos\\_Solos\\_na\\_Paramet20151029-5556-kxlttu.pdf](http://www.academia.edu/download/39523439/Propriedades_Fisicas_dos_Solos_na_Paramet20151029-5556-kxlttu.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- MOREIRA, I. A. *Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros*. 2005. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2005.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; STYCZEN, M. E. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.23, p.527-544, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5). Acesso em: 12 out. 2019.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.3, p.885-900, 2007. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>. Acesso em: 12 out. 2019.
- MUKUNDAN, R.; *et al.* Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology*, v.183, p.110-119, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.021>. Acesso em: 12 out. 2019.
- NAIK, D.; KUMAR, P.; DESHMUKH, A. Runoff and Sediment Yield Prediction Using Agriculture Non-Point Source (AGNPS) Model in Ata-Gad Watershed, Uttarakhand, India. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, v.7, n.1, p.2551-2559, 2018. Disponível em: <http://technical.cloud-journals.com/index.php/IJARSG/article/view/857>. Acesso em: 12 out. 2019.
- NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A process base soil erosion model for USDA water erosion prediction project. *Transactions of the ASAE*, v.32, n.5, p. 1587-1593, 1989. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=31195>. Acesso em: 12 out. 2019.
- NEARING, M. A.; XIE, Y.; LIU, B.; YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, v.5, n.2, p.77-84, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.04.001>. Acesso em: 12 out. 2019.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical documentation version 2009*. Temple/Texas: Blackland Research Center, 2011. Report n° 406, 618p.

- NUNES, A. A. *Reservatórios de Acumulação de Água: Novas Propostas para o Dimensionamento e Representação dos Seus Efeitos*. 2013. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2013.
- NUNES, F. M. S. *Avaliação Hidrossedimentológica de uma Bacia Sem Dados de Vazão Utilizando o Modelo SWAT*. Campina Grande/PB, 2018. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2018.
- NUNES, F. M. S. *Avaliação hidrossedimentológica de uma bacia sem dados de vazão utilizando o modelo SWAT*. 2018. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2018.
- NUNES, G. *Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade de água da Bacia Hidrográfica do lago Paranoá - DF*. 2016. 148p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.
- OBETA, I. N.; ADEWUMI, J. K. Soil Loss in Samaru Zaria Nigeria: A comparison of WEPP and EUROSEM Models. *Nigerian Journal of Technology*, v.32, n.2, p.197-202, 2013. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/njt/article/view/123586>. Acesso em: 12 out. 2019.
- OLIVEIRA, M. R. *Investigação da Contaminação por Metais Pesados da Água e do Sedimento de Corrente nas Margens do Rio São Francisco e Tributários, a Jusante da Represa da CEMIG no Município de Três Marias, Minas Gerais*. 2007. 127f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2007.
- OLIVEIRA, P. T. S.; ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D. B. B.; PANACHUKI, E. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. *Water Resources Management*, v.25, p.1021–1036, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9739-0>. Acesso em: 05 out. 2019.
- OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. *Geociências*, São Paulo/SP, v.28, n.4, p.417-424, 2009. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7086>. Acesso em: 12 out. 2019.
- OLIVEIRA, W. N. *Avaliação da qualidade ambiental da paisagem da bacia hidrográfica e do reservatório do ribeirão João Leite Goiânia – GO*. 2013. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2013.
- OLIVETTI, D. *Câmeras multi e hiperespectral aerotransportadas: contribuições para monitoramento de qualidade de águas continentais*. 2019. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2019.
- PAIVA, E. M. C. D. *Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas*. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre/RS: ABRH, 2001. Cap. 13. p.365-394.
- PAIVA, F. M. L.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Study of vegetal cover influence on experimental erosion plots by a runoff-erosion modeling. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia/MG, v.1, n.1, p.235-242, 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3213/321328500025.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- PAZ, A. R. *Hidrologia Aplicada: Texto Básico*. Caxias do Sul/RS: UERGS, 2004. 138p. Disponível em: [http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UERGS.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf). Acesso em: 05 out. 2019.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, v.193, n.1032, p.120–145, 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>. Acesso em: 12 out. 2019.
- PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia-SC. *Revista Árvore*, Viçosa/MG, v.37, n.5 p.859-869, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.021>. Acesso em: 12 out. 2019.
- PIGA, F. G. *Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com vista ao planejamento ambiental – São Pedro e Santa Maria da Serra/SP*. 2017. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2017.
- PINTO, C. E. T. *Uso de Imagens de Satélite no Monitoramento Espacial e Temporal do Fluxo de Sedimentos no Braço do Rio Indaiá, Reservatório de Três Marias - MG*. 2013. 52f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.
- PINTO, C. E. T.; MENEZES, P. H. B. J.; MARTINEZ, J. M.; ROIG, H. L.; VILLAR, R. A. E. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.5, p.507-516, 2014. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v18n05/v18n05a07.pdf>. Acesso em: 05 out. 2019.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v.100, p.81-92, 1972. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2). Acesso em: 12 out. 2019.

- PULLAR, D.; SPRINGER, D. Towards integrating GIS and catchment models, *Environmental Modelling & Software*, v.15, p.451–459, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00023-2). Acesso em: 17 out. 2019.
- QUEIROZ, M. R. *A variedade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica*. 2014. 110f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP, 2014.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department Agriculture, 1997, 404p. (Agriculture Handbook No. 703).
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. *Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica*. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à modelagem dinâmica espacial. XI SBSR, Belo Horizonte/MG, 2003. Anais...São José dos Campos/SP: INPE, 2003. 33p. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2\\_modelos\\_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. *Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental*. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. Relatório Técnico Parcial. São José dos Campos/SP: MCT/INPE, 2000. 60p. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio\\_modelos\\_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf). Acesso em: 12 out. 2019.
- RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos/SP: EESC/USP, 1998. 819p.
- ROCHA, E. O. *Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT*. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2013.
- ROCHA, R. M.; LUCAS, A. A. T.; ALMEIDA, C. A. P.; NETO, E. L. M.; NETTO, A. O. A. Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté/SP, v.9, n.2, p.276-287, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1289>. Acesso em: 12 out. 2019.
- RODRIGUES, M. F. *Dinâmica hidrossedimentológica de pequenas bacias hidrográficas*. 2015. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências da Terra, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2015.
- ROFFE, T. G. *Dinâmica da produção de sedimentos devido a mudanças no uso da terra: estudo de caso na bacia de Chambas, província Ciego de Ávila, Cuba*. 2012. 392f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2012.
- ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Foz do Iguaçu/PR, v.16, p.9332-9339, 2013. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/attachment.cgi/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.51.59/doc/p1438.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ROSA, D. R. Q. *Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT*. 2016. 111f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2016.
- ROVEY, E. W.; WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.: *A distributed kinematic model of upland watershed*. Colorado State University, Fort Collins, 1977. Hydrology Paper 93, 52p. Disponível em: [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/61820/Hydrologypapers\\_n93.pdf?sequence=1](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/61820/Hydrologypapers_n93.pdf?sequence=1). Acesso em: 28 set. 2019.
- SADEGHI, S. H.; MIZUYAMA, T.; VANGAH, B. G. Conformity of MUSLE estimates and Erosion plot data for storm-wise sediment yield estimation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v.18, n.01, p.177-128, 2007. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.3319/TAO.2007.18.1.117\(O\)](http://dx.doi.org/10.3319/TAO.2007.18.1.117(O)). Acesso em: 12 out. 2019.
- SALAZAR, R. D. C. *Modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume, baixo São Francisco Sergipano*. 2016. 84f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, 2016.
- SALGADO, M. P. G.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W; TARGA, M. S. Caracterização de uma microbacia por meio de geotecnologias. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Natal/RN, p.4837-4843, 2009. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/57cc/3619238c8047350be9c2fd8496285f0795f4.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SALLES, L. A. *Calibração e Validação do Modelo SWAT para Predição de Vazões na Bacia do Ribeirão Pípiripau*. 2012. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2012.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons Ltd., 2004. ISBN 0-470-87093-1.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. rev. e ampl. Brasília/DF: Embrapa, 2013. 353p.
- SANTOS, J. Y. G. *Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil)*. 2015. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2015.

- SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife/PE, v.2, n.03, p.1-19, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/232624/26638>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SANTOS, L.; SRINIVASAN, V. S. Modelagem hidrossedimentológica no Semi-Árido Paraibano utilizando o modelo WEPP e o efeito de escala sobre os seus parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre/RS, v.17, n.01, p.53-63, 2012. Disponível em: <http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2012/vol17/no1/4.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SARI, V. *Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul*. 2017. 312f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2017.
- SARTORI, A., LOMBARDI NETO, F., GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.10, n.4, p.05-18. Disponível em: <http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2005/vol10/no4/1.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SHI, Z. H.; FANG, N. F.; WU, F. Z.; WANG, L.; YUE, B. J.; WU, G. L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, v.454-455, p.123-130, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.004>. Acesso em: 06 out. 2019.
- SILVA, A. K. *Impacto da Expansão da Palma de Óleo Sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos nas Sub-Bacias Hidrográficas não Monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental*. 2016. 325f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2016a.
- SILVA, A. K. L.; SOUZA, A. M. L.; SANTOS, J. T. S.; VILLELA, J. M.; MARTORANO, L. G.; CRESTANA, S. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.22, n.5, p.344-348, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*. 2. ed. São Carlos/SP: RiMa, 2007. 158p. ISBN 978-85-7656-099-9.
- SILVA, B. F. *Análise dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia-Go*. 2015a. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2015a.
- SILVA, B. F.; PINTO, W. T.; SOARES, A. K. *Produção de sedimentos em bacia hidrográfica via calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT*. In: Anais do XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental. Proceedings v.3, n.2., p.432-439, 2016. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/download-pdf/273/23981>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.3, p.695-701, 1999. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300024>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, C. R.; BRESSIANI D. A.; BETTIOL, G. M.; CRESTANA, S. Aplicação do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para estimar produção de sedimento e nutrientes na Microbacia Experimental da EMBRAPA Pecuária Sudeste. *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, São Carlos/SP, p.609-612, 2014. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1005885/1/609siagro2014print01.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, F. D. M. *Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados*. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016b.
- SILVA, L. R. S. *Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas*. 2010. 241f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2010.
- SILVA, M. A. *Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá - PB*. 2015b. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, 2015b.
- SILVA, M. T. *Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco*. 2014. 121f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2014.
- SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P.; SILVA, B. K.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B. Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v.02, n.03, p.203-211, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1430.203-211>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, R. M.; HENRIQUE, I. G. N.; CAZÉ, J. F. Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma caatinga. *Revista de Geografia*, Recife/PE, v.35, n.1, p.158-178,

2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/download/229325/29076>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SANTOS, J. Y. G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, v.33, n.2, p.117–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.04.005>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; MEDEIROS, I. C.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Efeitos de cenários de uso do solo na vazão e produção de sedimentos na bacia do rio Cobres, Portugal. *Geociências*, São Paulo/SP, v.35, n.4, p.609–622, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10174/19852>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SOUZA, E. P. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco river basin. *Engenharia Agrícola*, v.36, n.06, p.1005-1015, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1005-1015/2016>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SINGH, R.; TIWARI, K. N.; MAL, B. C. Hydrological studies for small watershed in India using the ANSWERS model. *Journal of Hydrology*, v.318, p.184–199, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.011>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SMETS, T.; BORSELLI, L.; POESEN, J.; TORRI, D. Evaluation of the EUROSEM model for predicting the effects of erosion-control blankets on runoff and interrill soil erosion by water. *Geotextiles and Geomembranes*, v.29, n.3, p. 285-297, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2011.01.012>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SOUTO, A. R. CRESTANA, S. Identificação das áreas potenciais de produção de sedimentos com o modelo AGNPS e técnicas de SIG em uma microbacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, p.429-435, 2000. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XS2000250320>. Acesso em: 12 out. 2019.
- SOUZA, C.; AZEVEDO, T. *MapBiomass General Handbook*. MAPBIOMAS: São Paulo, Brazil, p.1-23, 2017.
- SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactin of the ASAE*, v.43, n.6, p.1431-1439, 2000. Disponível em: [https://uknowledge.uky.edu/bae\\_facpub/156/](https://uknowledge.uky.edu/bae_facpub/156/). Acesso em: 12 out. 2019.
- SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. Evaluation of runoff and erosion loss in microbasins utilizing the hydrodynamic model WESP. *Advances in Engineering Software*, v.22, n.2, p.79–85, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0965-9978\(95\)00014-N](https://doi.org/10.1016/0965-9978(95)00014-N). Acesso em: 12 out. 2019.
- STRAUCH, M.; BAKKER, F. I.; ARAÚJO, A.; LIMA, J. E. F. W.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Assessing the hydrologic impact of conservation management practices for the Pipiripau River basin, Central Brazil, using SWAT. In: *Proceedings of the 12th International Specialized Conference on Watershed and River Basin Management*. International Water Association – IWA: Recife/PE, 2011.
- STRAUCH, M.; LIMA, J. E. F. W.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. 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. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.014>. Acesso em: 12 out. 2019.
- STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. *Ecological Modelling*, v.269, p.98– 112, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.013>. Acesso em: 12 out. 2019.
- TAJBAKSH, S. M.; MEMARIAN, H.; SOBHANI, M.; AGHAKHANI AFSHAR, A. H. Kinematic runoff and erosion model efficiency assessment for hydrological simulation of semi-arid watersheds. *Global Journal of Environmental Science and Management*, v.4, n.2, p.127-140, 2018. Disponível em: [https://www.gjesm.net/article\\_29061\\_4689.html](https://www.gjesm.net/article_29061_4689.html). Acesso em: 12 out. 2019.
- TAVEIRA, B. D. A. *Processos hidrossedimentológicos em cenários climáticos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, serra do mar paranaense*. 2016. 96f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2016.
- TÁVORA, B. E. *Zona ripária de cerrado: processos hidrossedimentológicos*. 2017. 130f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2017.
- TEIXEIRA, T. M. N.; LIMA, J. E. F. W. Simulação de vazões na bacia do rio São Marcos utilizando o modelo SWAT. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Anais...ABRH: Florianópolis/SC, p.1-8, 2017.
- TEIXEIRA, T. M. N.; SILVA, F. D. M.; LIMA, J. E. F. W. Simulação de vazões em uma bacia de médio porte na porção de Cerrado da Bacia do Rio São Francisco: o caso da Bacia do Rio Preto. In: *XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Anais... ABRH, Aracaju/SE, p.1-10, 2016.
- TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. *Balanço Hídrico: Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas*. São José dos Campos/SP: INPE-13140-PRE/8399, 2005. 12p. Disponível em: [http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/11.08.13.25/doc/09\\_Balan%27o\\_h%27EDdrico.pdf](http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/11.08.13.25/doc/09_Balan%27o_h%27EDdrico.pdf). Acesso em: 06 out. 2019.

- TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4.ed. Porto Alegre/RS: Editora da UFRGS, 2012. 943p. ISBN: 978-85-7025-924-0.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre/RS: Editora da UFRGS, 2005. 678p. ISBN 85-7025-823-2.
- TUNDISI, J. G. Ciclo Hidrológico e Gerenciamento Integrado. *Ciência e Cultura*, São Paulo/SP, v.55, n.4, p.31-33, 2003. Disponível em: [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252003000400018&lng=en&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400018&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 05 out. 2019.
- UZEIKA, T. *Aplicabilidade do Modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural*. 2009. 144f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2009.
- UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa/MG, v.36, n.2, p.557-565, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200025>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Multi objective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resource Research*, v.39, n.12, p.1348-1356. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003WR002284>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VAN GRIENSVEN, A; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v.324, p.10-23, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VEIGA, M. V. *Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia - GO*. 2014. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2014.
- VERTESSY, R. A.; HATTON, T. J.; O'SHAUGHNESSY, P. J.; JAYASURIYA, M. D. A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, v.150, p.665-700, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90131-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90131-R). Acesso em: 12 out. 2019.
- VESTENA, L. R., Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia/MG, v.21, n.3, p.413-424, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/sn/v21n3/a14v21n3>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VIERS, J.; DUPRÉ, B.; GAILLARDET, J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Science of the Total Environment*, v.407, n.2, p.853–868, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.053>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VIGIAK, O., MALAGÓ, A., BOURAOUI, F., VANMAERCKE, M., POESEN, J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Science of the Total Environment*, v.538, p.855–875, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.095>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VIGIAK, O.; MALAGÓ, A.; BOURAOUI, F.; VANMAERCKE, M.; OBREJA, F.; POESEN, J.; HABERSACK, H.; FEHER, J.; GROSELJ, S. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of The Total Environment*, v.599–600, n.1, p.992-1012, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.236>. Acesso em: 12 out. 2019.
- VILLELA, J. M. *Avaliação da influência da expansão da cana-de açúcar no regime hidrossedimentológico na microbacia do Córrego Cana do reino, Votuporanga-SP*. 2015. 146f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2015.
- VOTTRI, M. *Geoprocessamento integrado à modelagem hidrológica para o diagnóstico ambiental e a qualificação de cenários de uso e perda de solo na bacia hidrográfica do rio Vitorino-PR*. 2018. 144f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco/PR, 2018.
- WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE*. v.12, p.100-103, 1969. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38772>. Acesso em: 12 out. 2019.
- WILLIAMS, J. R. *Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service, Washington DC, p.244-252, 1975.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning*. Washington, D.C: USDA, 1978, 62p. (Agriculture Handbook n.537).
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. Washington, D.C: USDA, 1965, 47p. (Agriculture Handbook n.282).
- WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. *Kineros, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual*. Tucson: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 130p.

XAVIER, F. V. *Contribuições metodológicas ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso, utilizando o modelo AVSWAT*. 2009. 167p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2009.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSH, D. D.; ANDERSON, P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.44, n.2, p.168–173, 1989. Disponível em: <http://www.jswnonline.org/content/44/2/168.short>. Acesso em: 12 out. 2019.

ZANELLA, B. P. *Modelagem do aporte de sedimentos aplicada à bacia hidrográfica contribuinte da PCH COSTA RICA (MS) e proposta de mitigação do assoreamento*. 2016. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá/SP, 2016.

ZANIN, P. R. *Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica com reservatórios*. 2015. 209f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2015.

ZANIN, P. R.; BONUMÁ, N. B.; CORSEUIL, C. W. Modelagem hidrossedimentológica com o SWAT usando calibração multi-local em bacias embutidas com reservatórios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre/RS, v.23, n.54, p.1-26, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170153>. Acesso em: 12 out. 2019.

ZETTAM, A.; TALEB, A.; SAUVAGE, S.; BOITHIAS, L.; BELAIDI, N.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria). *Water*, v.9, n.216, p.1-18, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w9030216>. Acesso em: 12 out. 2019.

## **Processo de Movimentação da Água no Solo**

### ***SOL-AWC***

O parâmetro *SOL-AWC* é utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação, e é dado pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Esse parâmetro tem uma relação inversamente proporcional com vários componentes do balanço hídrico, tais como, fluxo de base e escoamento superficial. Por exemplo, quando o valor do parâmetro *SOL-AWC* é aumentado, o fluxo de base e o escoamento superficial diminuem.

### ***SOL-K***

O parâmetro *SOL-K* representa a condutividade hidráulica saturada do solo. Esse parâmetro é necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada de solo e a quantidade de água que percola para a camada de solo inferior. Quanto maior o valor do parâmetro *SOL-K* menor é o tempo de percolação. A condutividade hidráulica saturada tem relação direta com o fluxo fluvial. O fluxo de base, por sua vez, aumenta quando o parâmetro está entre valores baixos e médio e diminui quando *SOL-K* está entre médio e alto. O efeito desse parâmetro no escoamento superficial é pequeno. Em geral, esse parâmetro não é tão sensível quanto *GWQMN*, *ESCO* e *AWC*.

## **Processo de Contribuição de Água Subterrânea**

### ***ALPHA-BF***

O parâmetro *ALPHA-BF* representa a constante de recessão do fluxo de base ou constante de proporcionalidade. Esse parâmetro é diretamente proporcional ao fluxo de água subterrâneo no canal principal, isto é, aumentando-se o valor do parâmetro *ALPHA-BF*, será aumentado a recarga do aquífero e diminuído o fluxo de base. Portanto, seu ajuste implica em modificações na quantidade das descargas líquidas no corpo d'água.

### ***EPCO***

O parâmetro *EPCO* permite controlar a tomada de água no solo pela vegetação. O intervalo desse parâmetro é de 0,01 a 1,00. Quando o *EPCO* se aproxima de 1, o modelo permite que um percentual maior da água do solo seja destinado ao suprimento das demandas da vegetação.

### ***GW-DELAY***

O parâmetro *GW-DELAY* influencia no cálculo da recarga do aquífero, e depende do tipo de formação geológica existente. Quanto maior o valor do parâmetro, menor é a recarga.

### ***GW-REVAP***

O parâmetro *GW-REVAP* representa a constante de proporcionalidade utilizada para o cálculo da quantidade máxima de água que se move na zona de solo em resposta às deficiências de água (processo designado no *SWAT* como *Revap*). Um maior valor do parâmetro *GW-REVAP* significa maior quantidade de água no solo para suprir as deficiências existentes.

### ***GWQMN***

O parâmetro *GWQMN* é a profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado para o canal. Quando o seu valor é alto, uma considerável porção do fluxo de base é retardada. Para valores baixos deste parâmetro é produzido mais fluxo de base. Por outro lado, um baixo valor de *GWQMN* gera alto fluxo fluvial. Só ocorre fluxo de base se o nível de água no aquífero supera o valor estabelecido para *GWQMN*.

### ***RCHARG-DP***

O parâmetro *RCHARG-DP* é utilizado para calcular a quantidade de água de recarga que vai para o aquífero profundo. Esse parâmetro define o percentual da recarga que não fica disponível na bacia e é encaminhada para o aquífero profundo.

### ***REVAPMN***

O parâmetro *REVAPMN* controla o limite do nível de água no aquífero raso para que a *Revap* ocorra. Esse parâmetro é utilizado para calcular a máxima quantidade de água que se move dentro do solo em resposta as deficiências de água (*Revap*). É, portanto, o limite quantitativo do nível de água no aquífero raso para que a *Revap* ocorra.

### ***SOL-Z***

O parâmetro *SOL-Z* define a profundidade da camada de solo. Esse parâmetro é necessário nos cálculos de temperatura do solo, fator importante para a movimentação da água no solo e para a evaporação.

## **Processo de Escoamento Superficial**

### ***CN2***

O parâmetro *CN2* é importante no cálculo do volume de escoamento superficial quando é utilizado o método do *CN-SCS*. O *CN* (*curve number – curva número*) é um número adimensional que é função da permeabilidade, do tipo de uso e das condições antecedentes de água no solo. O valor de *CN2* é requerido nas **Equações 2 e 3**, para o cálculo do escoamento superficial. Na calibração do componente hidrológico do modelo, o ajuste do *curve number* otimiza o escoamento superficial, isto é, os valores de deflúvio na bacia são proporcionais ao parâmetro *CN*.

### ***CH-N2***

O parâmetro *CH-N2* representa o coeficiente de Manning (coeficiente de rugosidade do canal que influencia a velocidade com que a água escoar no solo e nos canais), e tem importância no cálculo do tempo de concentração que, por sua vez, interfere de forma proporcional no cálculo da taxa de pico do escoamento superficial. Assim, quanto maior *CH-N2*, menor a taxa máxima do escoamento superficial.

### ***SURLAG***

O parâmetro *SURLAG* é o coeficiente do intervalo do escoamento superficial de forma que, quanto menor o seu valor, maior é a quantidade de água mantida em estoque e, quanto maior seu valor, maior a quantidade de água liberada para o canal principal aumentando, proporcionalmente, a geração de fluxo. O parâmetro *SURLAG* é necessário na **equação 4**.

### ***SLSUBBSN***

O parâmetro *SLSUBBSN*, que se refere ao comprimento médio da encosta da sub-bacia, é usado no cálculo do tempo de concentração. Quanto maior o seu valor, maior é o tempo de concentração necessário para o deflúvio atingir o canal principal. Por sua vez, o tempo de concentração é um parâmetro importante para o cálculo da taxa máxima de escoamento superficial. A vazão de pico do deflúvio é inversamente proporcional ao parâmetro *SLSUBBSN*.

### ***SLOPE***

O parâmetro *SLOPE* corresponde à declividade média da sub-bacia, e seu valor é utilizado no cálculo da velocidade do escoamento superficial que é requerido para o cálculo do tempo de concentração na bacia.

## **Processo de Evapotranspiração**

### ***CANMAX***

O parâmetro *CANMAX* controla o volume de água interceptado pela vegetação. Esse parâmetro permite calcular a quantidade de água interceptada pelas plantas num dado dia, sendo que seu ajuste afeta diretamente a quantidade de fluxo gerada, de modo que quanto maior o valor do parâmetro menor é o volume disponível na bacia. Ver **equação 5**.

### ***ESCO***

O parâmetro *ESCO* é o fator de compensação da evaporação da água do solo. Esse parâmetro é importante para o cálculo da demanda de evaporação para uma determinada camada de solo. Os valores de *ESCO* representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais maiores significam maior evaporação na camada superior do solo. Por outro lado, valores reduzidos de *ESCO* permitem mais evaporação da camada inferior do solo. A evaporação total da camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas entre as camadas inferior e superior do solo. Ver **equação 6**.

## **Processo de Perda de Água por Transmissão**

### ***CH-K2***

O parâmetro *CH-K2* controla a condutividade hidráulica do leito do rio. Esse parâmetro determina as perdas de água por transmissão, numa relação diretamente proporcional. Os valores de *CH-K2* estão relacionados com as características do leito do rio.

## **Processo de Manejo do Solo**

### ***BIOMIX***

A mistura biológica (*BIOMIX*) é a redistribuição dos constituintes como um resultado da atividade de microrganismos no solo. A mistura é tanto mais significativa quanto menos o solo é perturbado. Quando há uma mudança de cultivo convencional para um cultivo menos agressivo ou para um não cultivo do solo, há um incremento no parâmetro.

**APÊNDICE B: Dissertações e teses utilizando SWAT com foco em erosão e produção de sedimentos**

<b>Autor (Ano)</b>	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Texto</b>	<b>Instituição</b>
Kuwajima (2012)	Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de Assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)	Dissertação	USP
Roffe (2012)	Dinâmica da produção de sedimentos devido a mudanças no uso da terra: estudo de caso na bacia de Chambas, província Ciego de Ávila, Cuba	Tese	UNICAMP
Arroio Junior (2013)	Avaliação da produção e transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do rio Itaqueri, Municípios Itirapina e Brotas - SP	Dissertação	USP
Oliveira (2013)	Avaliação da qualidade ambiental da paisagem da bacia hidrográfica e do reservatório do ribeirão João Leite Goiânia – GO	Dissertação	UFGO
Rocha (2013)	Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT	Dissertação	UFV
Bertani (2014)	Influência da expansão agrícola no escoamento superficial e na produção de sedimentos no cerrado do meio norte do Mato Grosso	Dissertação	INPE
Carvalho (2014)	Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro	Dissertação	UnB
Creech (2014)	Coupled sediment yield and sediment transport model to support navigation planning in Northeast Brazil	Tese	Wayne State University
Queiroz (2014)	A variedade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica	Tese	USP
Silva (2014)	Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco	Tese	UFMG
Veiga (2014)	Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia - GO	Dissertação	UFG
Beltrão (2015)	Análise da variabilidade da precipitação e dos processos hidrossedimentológicos na bacia do alto rio São Francisco	Dissertação	UFPB
Brito (2015)	Estimativa da produção de sedimentos da bacia do rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático Soil And Water Assessment Tool (SWAT)	Dissertação	UFES
Catelani (2015)	Geotecnologias aplicadas à análise do assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenário de escassez de dados de séries históricas	Tese	UNESP
Fernandes (2015)	Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT	Tese	UFPE
Guedes Junior (2015)	Avaliação da erosão hídrica e transporte de sedimentos através do modelo hidrossedimentológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool).	Dissertação	UNESP
Rodrigues (2015)	Dinâmica hidrossedimentológica de pequenas bacias hidrográficas	Tese	UFMS
Santos (2015)	Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil)	Tese	UFPE
Silva (2015a)	Análise dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia-Go	Dissertação	UFGO
Silva (2015b)	Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá - PB	Dissertação	UFPB
Villela (2015)	Avaliação da influência da expansão da cana-de açúcar no regime hidrossedimentológico na microbacia do Córrego Cana do reino, Votuporanga-SP	Dissertação	USP
Zanin (2015)	Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica com reservatórios	Dissertação	UFSC
Chaves (2016)	Integração de modelos hidrológico e econômico para a avaliação dos custos internos da erosão na agricultura em bacias hidrográficas	Tese	UnB

Eduardo (2016)	Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio das mortas, UPGRH-GD02	Tese	UFLA
Ferreira (2016)	Análise da produção de carga líquida e sólida na bacia do Ribeirão do Gama- DF através do modelo SWAT	Dissertação	UnB
Guimarães (2016)	Simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	Dissertação	UFES
Lopes (2016)	Modelagem hidrossedimentológica para bacia do alto Teles Pires	Dissertação	UFMT
Rosa (2016)	Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT	Tese	UFV
Salazar (2016)	Modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume, baixo São Francisco Sergipano	Dissertação	UFSE
Silva (2016b)	Impacto da Expansão da Palma de Óleo Sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos nas Sub-Bacias Hidrográficas não Monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental.	Tese	USP
Taveira (2016)	Processos hidrossedimentológicos em cenários climáticos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, serra do mar paranaense	Dissertação	UFPR
Zanella (2016)	Modelagem do aporte de sedimentos aplicada à bacia hidrográfica contribuinte da PCH COSTA RICA (MS) e proposta de mitigação do assoreamento	Tese	UNESP
Piga (2017)	Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com vista ao planejamento ambiental–São Pedro e Santa Maria da Serra/SP	Dissertação	UFScar
Sari (2017)	Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul	Tese	UFRGS
Távora (2017)	Zona ripária de cerrado: processos hidrossedimentológicos	Tese	UnB
Martins (2018)	Influência do tipo de uso e ocupação do solo no assoreamento do reservatório Bom Jardim, Uberlândia-MG	Dissertação	FECIV
Nunes (2018)	Avaliação hidrossedimentológica de uma bacia sem dados de vazão utilizando o modelo SWAT	Dissertação	UFCG
Vottri (2018)	Geoprocessamento integrado à modelagem hidrológica para o diagnóstico ambiental e a qualificação de cenários de uso e perda de solo na bacia hidrográfica do rio Vitorino-PR	Dissertação	UFPR

**APÊNDICE C: Artigos científicos utilizando SWAT com foco em erosão e produção de sedimentos**

<b>Autor (Ano)</b>	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Publicação</b>
Ferrigo <i>et al.</i> (2012)	Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural	X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos
Lelis <i>et al.</i> (2012)	Análise de Sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil	Revista Brasileira de Ciência do Solo
Uzeika <i>et al.</i> (2012)	Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed	Revista Brasileira de Ciência do Solo
Lima <i>et al.</i> (2013a)	Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado	XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos
Lima <i>et al.</i> (2013b)	Development of a soil database for applying SWAT model in a catchment of the Brazilian Savanna	SWAT Conference 2013
Lubitz, Pinheiro e Kaufmann (2013)	Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do Ribeirão Concórdia, SC	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
Medeiros <i>et al.</i> (2013)	Simulação da produção de sedimentos utilizando dados de entrada de alta resolução espacial no modelo SWAT	XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos
Mukudan <i>et al.</i> (2013)	Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA	Geomorphology
Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013)	Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia-SC	Revista Árvore
Strauch <i>et al.</i> (2013)	The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment	Journal of Environmental Management
Aragão <i>et al.</i> (2014)	Avaliação da Influência da Mata Ciliar na bacia do Rio Siriri, Sergipe, sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos via Modelo SWAT	VII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe
Bonumá <i>et al.</i> (2014)	Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model	Jornal of Environmental Quality
Chandra <i>et al.</i> (2014)	Estimation of sediment yield using SWAT model for Upper Tapi basin	Journal of Hydraulic Engineering
Ferrigo <i>et al.</i> (2014)	Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Distrito Federal	XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos
Galharte, Villela e Crestana (2014)	Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
Medeiros e Silva (2014)	Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG	Geociências
Silva <i>et al.</i> (2014)	Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para estimar produção de sedimento e nutrientes na microbacia experimental da EMBRAPA Pecuária Sudeste	Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária
Bonumá <i>et al.</i> (2015)	Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in brazilian watersheds and river basins	Tópicos em Ciência do Solo
Creech <i>et al.</i> (2015)	Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
Dantas <i>et al.</i> (2015)	Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba	Geociências
Vigiak <i>et al.</i> (2015)	Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins	Science of the Total Environment
Briak <i>et al.</i> (2016)	Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model	International Soil and Water Conservation Research

Silva <i>et al.</i> (2016)	Efeitos de cenários de uso do solo na vazão e produção de sedimentos na bacia do Rio Cobres, Portugal	Geociências
Silva, Silva e Souza (2016)	Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco river basin	Engenharia Agrícola
Silva, Pinto e Soares (2016)	Produção de sedimentos em bacia hidrográfica via calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT	XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental
Alighalehbabakhani <i>et al.</i> (2017a)	Estimates of sediment trapping rates for two reservoirs in the Lake Erie watershed: Past and present scenarios	Journal of Hydrology
Alighalehbabakhani <i>et al.</i> (2017b)	Forecasting the remaining reservoir capacity in the Laurentian Great Lakes watershed	Journal of Hydrology
Caprario <i>et al.</i> (2017)	Simulação hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brasil)	Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ
Silva <i>et al.</i> (2017)	Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco	Journal of Environmental Analysis and Progress
Vigiak <i>et al.</i> (2017)	Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT	Science of the Total Environment
Zettam <i>et al.</i> (2017)	Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria)	Water
Duru, Arabi e Wohl (2018)	Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey	Physical Geography
Hajigholizadeh, Melesse e Fuentes (2018)	Erosion and sediment transport modelling in shallow waters: a review on approaches, models and applications	International Journal of Environmental Research and Public Health
Hallouz <i>et al.</i> (2018)	Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria)	Water Science
Silva <i>et al.</i> (2018)	Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
Silva, Santos e Santos (2018)	Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil	International Journal of Sediment Research
Silva, Henrique e Cazé (2018)	Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma caatinga	Revista de Geografia
Zanin, Bonuma e Corseuil (2018)	Hydrosedimentological modeling with SWAT using multi-site calibration in nested basins with reservoirs	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
Briak <i>et al.</i> (2019)	Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco)	International Soil and Water Conservation Research
Himanshu <i>et al.</i> (2019)	Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model	Soil & Tillage Research
Hussain <i>et al.</i> (2019)	Parameter evaluation for soil erosion estimation on small watersheds using SWAT model	International Journal of Agricultural and Biological Engineering
Mingoti <i>et al.</i> (2019)	Variação da produção de sedimentos entre 1985 e 2017 na bacia do rio São Lourenço	XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto

*APÊNDICE D: Valores dos parâmetros físicos e químicos dos solos da bacia do Indaiá (UserSoil)*

<b>Parâmetro</b>	<b>CX</b>	<b>LV</b>	<b>LVA</b>	<b>RL</b>
<b>NLAYERS</b>	2	3	3	2
<b>HYDGRP</b>	C	A	A	D
<b>SOL_ZMX</b>	1360	1700	2000	400
<b>ANION_EXCL</b>	0,215697	0,215697	0,215697	0,4
<b>SOL_CRK</b>	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>TEXTURE</b>	0	0	0	0
<b>SOL_Z1</b>	300	130	150	200
<b>SOL_BD1</b>	1,23	1,19	1,39	1,60
<b>SOL_AWC1</b>	0,52	0,11	0,14	0,15
<b>SOL_K1</b>	31,80	54,53	59,41	12,50
<b>SOL_CBN1</b>	1,49	1,65	1,33	0,40
<b>CLAY1</b>	28,08	40,25	30,37	17,20
<b>SILT1</b>	32,20	10,33	9,53	29,40
<b>SAND1</b>	38,06	49,91	60,11	53,40
<b>ROCK1</b>	0	0	0	0
<b>SOL_ALB1</b>	0,10	0,03	0,08	0,15
<b>USLE_K1</b>	0,023	0,018	0,019	0,036
<b>SOL_Z2</b>	1360	650	350	400
<b>SOL_BD2</b>	1,00	1,19	1,39	1,6
<b>SOL_AWC2</b>	0,16	0,11	0,14	0,15
<b>SOL_K2</b>	6,52	14,04	24,56	12,50
<b>SOL_CBN2</b>	1,49	1,13	0,83	0,60
<b>CLAY2</b>	35,69	43,6	34,43	24,70
<b>SILT2</b>	31,36	12,4	8,88	25,60
<b>SAND2</b>	32,96	44	56,69	49,70
<b>ROCK2</b>	0	0	0	0
<b>SOL_ALB2</b>	0,12	0,05	0,10	0,15
<b>USLE_K2</b>	0,023	0,015	0,017	0,036
<b>SOL_Z3</b>	0	1700	2000	0
<b>SOL_BD3</b>	0	1,19	1,39	0
<b>SOL_AWC3</b>	0	0,11	0,14	0
<b>SOL_K3</b>	0	5,28	7,47	0
<b>SOL_CBN3</b>	0	0,46	0,46	0
<b>CLAY3</b>	0	40,25	40,25	0
<b>SILT3</b>	0	10,33	12,14	0
<b>SAND3</b>	0	49,91	48,11	0
<b>ROCK3</b>	0	0,00	0,00	0
<b>SOL_ALB3</b>	0	0,05	0,10	0
<b>USLE_K3</b>	0	0,015	0,017	0

**APÊNDICE E: Valores dos parâmetros de crescimento vegetal da bacia do Indaiá (Crop)**

<b>Parâmetro</b>	<b>MATA</b>	<b>CERR</b>	<b>CAMP</b>	<b>PAST</b>	<b>EUCA</b>	<b>AGRL</b>	<b>SUGC</b>	<b>WATR</b>
<b>CROPNAME</b>	Mata Galeria	Cerrado	Campo	Pasture	Eucalyptus	Agricultural Land Generic	Sugarcane	Water
<b>BIO_E</b>	20	20	20	35	15	33,5	25	0
<b>HVSTI</b>	0,05	0,05	0,05	0,9	0,1	0,45	0,5	0
<b>BLAI</b>	3,5	2,3	2,1	4	2,5	3	6	0
<b>FRGRW1</b>	0,07	0,07	0,07	0,05	0,1	0,15	0,15	0
<b>LAIMX1</b>	0,15	0,15	0,15	0,05	0,15	0,05	0,01	0
<b>FRGRW2</b>	0,5	0,4	0,4	0,49	0,5	0,5	0,5	0
<b>LAIMX2</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,95	0
<b>DLAI</b>	0,53	0,54	0,58	0,99	0,99	0,64	0,75	0
<b>CHTMX</b>	25	8	1	0,5	3,5	1	3	0
<b>RDMX</b>	3	4	2,5	2	2	2	2	0
<b>T_OPT</b>	30	25	25	25	20	30	25	0
<b>T_BASE</b>	10	10	10	12	7	11	11	0
<b>CNYLD</b>	0,0015	0,016	0,016	0,0234	0,0019	0,0199	0	0
<b>CPYLD</b>	0,0003	0,0022	0,0022	0,0033	0,0004	0,0032	0	0
<b>BN1</b>	0,006	0,02	0,02	0,06	0,006	0,044	0,01	0
<b>BN2</b>	0,002	0,012	0,012	0,0231	0,002	0,0164	0,004	0
<b>BN3</b>	0,0015	0,005	0,005	0,0134	0,0015	0,0128	0,0025	0
<b>BP1</b>	0,0007	0,0014	0,0014	0,0084	0,0007	0,006	0,0075	0
<b>BP2</b>	0,0004	0,001	0,001	0,0032	0,0004	0,0022	0,003	0
<b>BP3</b>	0,0003	0,0007	0,0007	0,0019	0,0003	0,0018	0,0019	0
<b>WSYF</b>	0,01	0,01	0,01	0,9	0,05	0,25	0,01	0
<b>USLE_C</b>	0,001	0,003	0,003	0,003	0,001	0,2	0,001	0
<b>GSI</b>	0,0030	0,0010	0,0008	0,005	0,007	0,005	0,005	0
<b>VPDFR</b>	4	4	4	4	4	4	4	0
<b>FRGMAX</b>	0,75	0,65	0,55	0,75	0,75	0,75	0,75	0
<b>WAVP</b>	8	10	10	10	3	8,5	10	0
<b>CO2HI</b>	660	660	660	660	660	660	660	0
<b>BIOEHI</b>	16	39	39	36	20	36	33	0
<b>RSDCO_PL</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0
<b>OV_N</b>	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,01
<b>CN2A</b>	35	44	46	49	45	67	67	92
<b>CN2B</b>	55	62	62	69	66	77	77	92
<b>CN2C</b>	70	75	75	79	77	83	83	92
<b>CN2D</b>	82	84	86	84	83	87	87	92
<b>FERTFIELD</b>	0	0	0	0	1	1	1	0
<b>ALAI_MIN</b>	1,35	0,7	0,7	0	0,75	0	0	0
<b>BIO_LEAF</b>	0,1	0,1	0	0	0,3	0	0	0
<b>MAT_YRS</b>	50	50	0	0	10	0	0	0
<b>BMX_TREES</b>	110	75	0	0	500	0	0	0
<b>EXT_COEF</b>	0,65	0,33	0,33	0,65	0,65	0,65	0,65	0
<b>BM_DIEOFF</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>OpSchedule</b>	FRSE	RNGB	PAST	PAST	AGRR	AGRR	AGRR	WATR

**APÊNDICE F – Valores dos parâmetros estatísticos climáticos das estações utilizadas na bacia do Indaíá (WGEN)**

STATION	83533	83536	83570	83579	83582	1845002	1845004	1845014	1945002	1945019	1945035	1946000	1946009	1946020
WLATITUDE	-19,68	-18,75	-19,21	-19,60	-20,03	-18,46	-18,84	-19,00	-19,39	-19,47	-19,16	-19,88	-19,32	-19,53
WLONGITUDE	-45,36	-44,45	-45,00	-46,94	-45,00	-45,65	-45,85	-45,97	-45,88	-45,60	-45,44	-46,03	-46,04	-46,10
WELEV	695,00	672,00	690,91	1023,61	661,27	760,00	1035,00	1030,00	720,00	692,00	565,00	670,00	1087,00	1150,00
RAIN_YRS	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TMPMX1	30,97	31,15	30,52	28,28	30,15	30,52	30,52	30,97	30,97	30,97	30,52	30,15	30,15	30,15
TMPMX2	31,31	31,89	31,13	28,70	30,45	31,13	31,13	31,31	31,31	31,31	31,13	30,45	30,45	30,45
TMPMX3	30,63	31,48	30,40	28,15	29,85	30,40	30,40	30,63	30,63	30,63	30,40	29,85	29,85	29,85
TMPMX4	30,27	31,04	29,95	27,87	29,43	29,95	29,95	30,27	30,27	30,27	29,95	29,43	29,43	29,43
TMPMX5	28,20	29,68	28,36	26,09	27,30	28,36	28,36	28,20	28,20	28,20	28,36	27,30	27,30	27,30
TMPMX6	27,52	29,05	27,76	25,34	26,68	27,76	27,76	27,52	27,52	27,52	27,76	26,68	26,68	26,68
TMPMX7	27,89	29,21	28,02	25,53	26,93	28,02	28,02	27,89	27,89	27,89	28,02	26,93	26,93	26,93
TMPMX8	29,62	30,15	29,44	27,43	28,63	29,44	29,44	29,62	29,62	29,62	29,44	28,63	28,63	28,63
TMPMX9	31,00	31,66	31,04	28,97	30,10	31,04	31,04	31,00	31,00	31,00	31,04	30,10	30,10	30,10
TMPMX10	31,36	31,89	31,60	29,19	30,60	31,60	31,60	31,36	31,36	31,36	31,60	30,60	30,60	30,60
TMPMX11	30,20	30,63	30,25	27,80	29,64	30,25	30,25	30,20	30,20	30,20	30,25	29,64	29,64	29,64
TMPMX12	30,30	30,51	30,02	27,94	29,65	30,02	30,02	30,30	30,30	30,30	30,02	29,65	29,65	29,65
TMPMN1	19,19	19,18	19,56	18,91	18,74	19,56	19,56	19,19	19,19	19,19	19,56	18,74	18,74	18,74
TMPMN2	18,60	19,11	19,37	18,84	18,30	19,37	19,37	18,60	18,60	18,60	19,37	18,30	18,30	18,30
TMPMN3	18,37	18,74	19,02	18,56	17,73	19,02	19,02	18,37	18,37	18,37	19,02	17,73	17,73	17,73
TMPMN4	16,48	17,28	17,45	17,61	15,94	17,45	17,45	16,48	16,48	16,48	17,45	15,94	15,94	15,94
TMPMN5	12,83	14,82	14,70	15,05	12,18	14,70	14,70	12,83	12,83	12,83	14,70	12,18	12,18	12,18
TMPMN6	10,57	13,22	13,14	14,12	9,95	13,14	13,14	10,57	10,57	10,57	13,14	9,95	9,95	9,95
TMPMN7	9,69	12,75	12,94	13,96	9,04	12,94	12,94	9,69	9,69	9,69	12,94	9,04	9,04	9,04
TMPMN8	10,62	13,54	14,24	15,08	9,82	14,24	14,24	10,62	10,62	10,62	14,24	9,82	9,82	9,82
TMPMN9	13,81	16,14	16,63	16,83	13,33	16,63	16,63	13,81	13,81	13,81	16,63	13,33	13,33	13,33
TMPMN10	16,30	18,22	18,61	18,08	16,36	18,61	18,61	16,30	16,30	16,30	18,61	16,36	16,36	16,36
TMPMN11	17,79	18,75	19,20	18,15	17,97	19,20	19,20	17,79	17,79	17,79	19,20	17,97	17,97	17,97
TMPMN12	18,68	19,11	19,56	18,57	18,75	19,56	19,56	18,68	18,68	18,68	19,56	18,75	18,75	18,75
TMPSTDMX1	1,41	1,12	1,39	1,23	1,21	1,39	1,39	1,41	1,41	1,41	1,39	1,21	1,21	1,21
TMPSTDMX2	1,47	1,43	1,52	1,41	1,54	1,52	1,52	1,47	1,47	1,47	1,52	1,54	1,54	1,54
TMPSTDMX3	1,02	1,10	1,04	1,03	0,92	1,04	1,04	1,02	1,02	1,02	1,04	0,92	0,92	0,92
TMPSTDMX4	1,06	0,97	0,85	0,80	0,82	0,85	0,85	1,06	1,06	1,06	0,85	0,82	0,82	0,82
TMPSTDMX5	1,14	0,91	0,96	0,85	0,74	0,96	0,96	1,14	1,14	1,14	0,96	0,74	0,74	0,74
TMPSTDMX6	1,15	1,22	1,13	0,91	0,97	1,13	1,13	1,15	1,15	1,15	1,13	0,97	0,97	0,97
TMPSTDMX7	1,05	1,27	1,09	1,15	1,02	1,09	1,09	1,05	1,05	1,05	1,09	1,02	1,02	1,02
TMPSTDMX8	1,17	0,92	1,14	0,97	0,97	1,14	1,14	1,17	1,17	1,17	1,14	0,97	0,97	0,97
TMPSTDMX9	1,53	1,15	1,47	1,40	1,46	1,47	1,47	1,53	1,53	1,53	1,47	1,46	1,46	1,46
TMPSTDMX10	1,81	1,46	1,75	1,56	1,70	1,75	1,75	1,81	1,81	1,81	1,75	1,70	1,70	1,70
TMPSTDMX11	1,35	1,57	1,39	0,97	1,23	1,39	1,39	1,35	1,35	1,35	1,39	1,23	1,23	1,23
TMPSTDMX12	1,25	1,19	1,20	1,01	0,99	1,20	1,20	1,25	1,25	1,25	1,20	0,99	0,99	0,99
TMPSTDMN1	0,95	1,55	1,11	0,50	1,08	1,11	1,11	0,95	0,95	0,95	1,11	1,08	1,08	1,08
TMPSTDMN2	1,14	1,42	1,06	0,52	1,06	1,06	1,06	1,14	1,14	1,14	1,06	1,06	1,06	1,06
TMPSTDMN3	1,00	1,52	1,00	0,45	1,06	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,06	1,06	1,06
TMPSTDMN4	1,47	1,21	0,83	0,52	1,14	0,83	0,83	1,47	1,47	1,47	0,83	1,14	1,14	1,14
TMPSTDMN5	2,06	1,31	1,16	0,77	1,34	1,16	1,16	2,06	2,06	2,06	1,16	1,34	1,34	1,34
TMPSTDMN6	2,24	1,97	1,67	0,76	1,61	1,67	1,67	2,24	2,24	2,24	1,67	1,61	1,61	1,61
TMPSTDMN7	2,50	2,20	1,74	0,90	1,81	1,74	1,74	2,50	2,50	2,50	1,74	1,81	1,81	1,81
TMPSTDMN8	2,49	1,81	1,47	0,86	1,44	1,47	1,47	2,49	2,49	2,49	1,47	1,44	1,44	1,44
TMPSTDMN9	2,05	1,25	1,05	1,01	1,55	1,05	1,05	2,05	2,05	2,05	1,05	1,55	1,55	1,55
TMPSTDMN10	1,47	1,32	1,01	0,95	1,24	1,01	1,01	1,47	1,47	1,47	1,01	1,24	1,24	1,24
TMPSTDMN11	1,17	1,64	1,12	0,69	1,09	1,12	1,12	1,17	1,17	1,17	1,12	1,09	1,09	1,09
TMPSTDMN12	1,00	1,54	1,22	0,52	1,19	1,22	1,22	1,00	1,00	1,00	1,22	1,19	1,19	1,19
PCPMM1	251,02	190,17	217,04	292,49	290,03	219,02	266,49	283,52	263,16	261,47	225,43	335,57	243,68	320,21
PCPMM2	158,83	124,63	143,75	215,57	169,34	170,41	174,15	186,43	206,41	187,87	162,81	233,50	194,89	223,13
PCPMM3	147,16	143,26	169,08	207,11	162,09	180,70	192,79	193,69	220,20	196,51	173,04	203,93	183,17	234,34
PCPMM4	51,05	47,75	60,63	79,31	71,80	57,63	80,52	82,92	87,61	72,34	59,59	85,19	115,21	89,38
PCPMM5	38,26	27,95	34,86	49,26	47,22	20,59	32,26	39,33	37,72	42,24	31,03	56,71	62,42	51,06
PCPMM6	15,36	14,61	18,12	17,82	22,16	9,69	9,63	8,57	14,27	14,37	15,57	14,20	20,40	16,65

PCPMM7	6,60	17,65	17,08	8,80	13,23	4,90	6,04	9,50	9,61	10,26	9,29	8,15	16,39	13,05
PCPMM8	8,61	19,87	17,69	12,43	15,12	8,26	11,24	12,41	11,59	10,70	11,77	9,66	20,09	11,45
PCPMM9	51,05	32,83	41,83	59,16	60,42	34,76	41,44	49,21	48,00	49,80	40,80	62,35	43,57	55,51
PCPMM10	107,03	73,59	71,06	119,89	116,45	81,70	97,95	109,30	110,99	106,68	83,24	138,94	92,54	135,62
PCPMM11	202,43	186,97	182,85	201,61	184,91	198,70	229,98	270,05	222,02	197,76	202,80	239,31	172,30	242,12
PCPMM12	281,58	245,99	245,66	283,43	277,99	250,64	312,29	311,40	281,59	259,56	248,22	295,27	253,73	302,58
PCPSTD1	15,60	12,84	13,08	15,37	17,37	12,33	15,21	14,45	13,52	15,81	14,50	18,18	13,92	16,22
PCPSTD2	11,88	11,57	12,59	14,71	11,61	12,00	12,85	13,19	13,45	13,52	12,94	14,84	14,24	12,62
PCPSTD3	11,05	11,79	12,40	12,48	11,52	12,25	13,41	11,70	13,32	13,47	13,63	12,93	13,23	13,01
PCPSTD4	5,55	4,98	6,40	7,39	7,73	6,33	8,79	7,38	8,18	7,90	6,75	8,28	8,97	7,36
PCPSTD5	5,95	3,43	4,80	6,44	5,90	2,79	4,77	4,89	4,66	6,30	5,13	6,57	6,54	5,57
PCPSTD6	3,40	1,79	2,19	3,51	3,22	2,75	2,41	1,88	2,74	3,16	2,73	2,65	3,32	3,01
PCPSTD7	1,76	1,76	2,04	1,89	2,15	1,12	1,57	2,42	2,03	2,26	1,68	2,00	2,89	3,19
PCPSTD8	1,77	2,35	1,85	2,71	2,76	1,88	2,68	2,61	2,26	2,57	1,96	2,21	3,32	2,49
PCPSTD9	5,86	3,57	4,16	6,24	6,48	4,22	5,38	6,13	5,50	6,01	5,27	6,47	5,47	5,89
PCPSTD10	9,34	6,57	5,78	9,32	9,77	8,27	9,04	8,38	10,15	8,71	7,24	11,28	8,06	9,72
PCPSTD11	13,21	12,99	11,84	12,42	13,12	12,26	14,59	14,58	13,39	12,47	12,84	14,92	11,63	13,94
PCPSTD12	15,84	14,41	14,61	15,27	15,79	14,78	16,36	15,43	14,64	14,13	14,93	15,57	14,08	13,24
PCPSKW1	3,20	4,27	3,00	2,80	3,30	2,90	2,89	2,44	2,44	3,14	3,48	2,86	3,20	3,18
PCPSKW2	3,18	4,27	5,86	3,08	2,81	4,04	3,30	3,04	2,48	3,12	4,21	2,19	3,73	2,15
PCPSKW3	3,62	4,14	3,73	2,55	3,94	3,79	3,43	2,76	2,74	3,22	3,92	2,84	3,78	2,89
PCPSKW4	4,93	5,68	6,19	4,25	5,44	5,24	4,88	3,75	3,95	5,06	5,78	5,07	3,53	3,89
PCPSKW5	9,84	6,90	11,87	5,91	5,43	6,65	8,61	5,97	6,20	8,69	10,06	4,99	4,47	5,58
PCPSKW6	12,96	10,11	8,54	9,56	7,29	11,47	13,56	9,11	8,18	10,92	8,58	8,25	7,95	8,12
PCPSKW7	11,01	6,78	7,85	9,32	8,21	8,10	11,46	9,86	8,43	8,42	9,51	11,12	9,29	11,00
PCPSKW8	9,74	11,37	5,74	12,29	9,54	8,67	10,18	10,61	8,27	12,85	8,42	12,89	9,20	13,57
PCPSKW9	5,21	6,91	6,37	5,07	4,86	5,22	6,33	5,70	5,59	5,32	5,75	4,30	6,06	4,71
PCPSKW10	5,77	5,09	4,06	3,55	4,46	5,16	5,01	3,25	6,32	3,98	3,85	3,63	4,68	3,76
PCPSKW11	3,60	4,12	3,13	2,97	3,86	2,93	3,30	2,42	2,84	2,70	2,87	2,69	3,27	4,16
PCPSKW12	2,71	2,99	3,44	2,82	2,83	3,14	2,44	2,86	2,59	2,59	3,69	2,39	2,77	2,23
PR_W1_1	0,26	0,23	0,30	0,38	0,32	0,26	0,28	0,27	0,26	0,27	0,27	0,28	0,27	0,31
PR_W1_2	0,23	0,19	0,24	0,38	0,28	0,23	0,30	0,24	0,24	0,25	0,22	0,26	0,27	0,27
PR_W1_3	0,23	0,18	0,25	0,36	0,28	0,22	0,25	0,25	0,24	0,26	0,21	0,28	0,26	0,31
PR_W1_4	0,14	0,11	0,15	0,20	0,17	0,12	0,16	0,16	0,16	0,14	0,13	0,15	0,19	0,18
PR_W1_5	0,09	0,06	0,08	0,11	0,11	0,07	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07	0,10	0,13	0,12
PR_W1_6	0,05	0,02	0,04	0,06	0,06	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,06
PR_W1_7	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04
PR_W1_8	0,04	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05
PR_W1_9	0,11	0,07	0,10	0,14	0,14	0,09	0,10	0,10	0,10	0,13	0,10	0,11	0,09	0,13
PR_W1_10	0,21	0,14	0,18	0,25	0,23	0,15	0,22	0,21	0,20	0,22	0,20	0,20	0,18	0,27
PR_W1_11	0,33	0,30	0,30	0,41	0,35	0,30	0,38	0,35	0,30	0,35	0,33	0,35	0,30	0,38
PR_W1_12	0,37	0,32	0,37	0,46	0,42	0,31	0,40	0,38	0,39	0,39	0,35	0,38	0,29	0,39
PR_W2_1	0,68	0,70	0,74	0,73	0,72	0,67	0,73	0,73	0,75	0,74	0,65	0,73	0,78	0,77
PR_W2_2	0,65	0,59	0,68	0,66	0,62	0,65	0,59	0,62	0,63	0,65	0,59	0,63	0,69	0,72
PR_W2_3	0,55	0,58	0,68	0,66	0,61	0,67	0,64	0,63	0,66	0,65	0,61	0,60	0,63	0,71
PR_W2_4	0,40	0,60	0,60	0,46	0,43	0,53	0,45	0,53	0,44	0,47	0,48	0,49	0,61	0,57
PR_W2_5	0,30	0,66	0,63	0,38	0,37	0,44	0,41	0,45	0,36	0,39	0,43	0,37	0,49	0,48
PR_W2_6	0,29	0,80	0,72	0,24	0,53	0,08	0,24	0,29	0,23	0,43	0,54	0,33	0,55	0,28
PR_W2_7	0,29	0,87	0,82	0,31	0,55	0,43	0,29	0,29	0,35	0,40	0,62	0,22	0,55	0,33
PR_W2_8	0,26	0,84	0,77	0,30	0,39	0,24	0,29	0,35	0,23	0,41	0,55	0,24	0,64	0,35
PR_W2_9	0,52	0,70	0,70	0,55	0,41	0,42	0,41	0,38	0,48	0,46	0,36	0,49	0,54	0,51
PR_W2_10	0,51	0,66	0,61	0,50	0,48	0,37	0,43	0,43	0,44	0,52	0,43	0,47	0,58	0,54
PR_W2_11	0,61	0,64	0,71	0,63	0,63	0,62	0,66	0,65	0,62	0,68	0,61	0,58	0,65	0,71
PR_W2_12	0,68	0,69	0,73	0,73	0,71	0,62	0,72	0,73	0,69	0,73	0,66	0,66	0,76	0,78
PCPD1	15,17	14,27	17,63	19,30	17,57	14,63	16,80	16,47	17,07	16,93	14,53	16,83	18,43	19,00
PCPD2	12,00	9,57	13,13	15,47	12,93	12,33	12,50	11,87	12,03	12,77	10,83	12,63	13,97	15,00
PCPD3	11,30	10,10	14,40	16,80	13,80	13,33	13,70	13,17	13,67	14,10	11,57	13,33	13,37	17,00
PCPD4	6,00	6,97	8,73	8,63	7,53	6,37	7,40	8,00	7,20	7,23	6,50	7,07	10,60	9,70
PCPD5	3,77	5,23	6,13	4,73	4,83	3,47	4,53	4,27	4,10	4,73	3,87	4,63	6,57	6,13
PCPD6	1,97	3,90	4,53	2,27	3,53	0,87	1,63	1,27	1,57	2,53	2,40	2,03	2,93	2,70

PCPD7	1,03	4,77	4,13	1,70	2,77	0,93	1,13	0,93	1,43	1,57	1,93	1,20	2,50	1,60
PCPD8	1,67	5,00	4,47	1,90	2,33	1,10	1,60	1,63	1,60	1,87	2,30	1,37	3,00	2,27
PCPD9	5,93	6,40	7,97	7,17	6,07	4,13	4,53	4,33	5,03	5,90	4,13	5,60	5,17	6,47
PCPD10	9,47	9,57	10,33	10,80	9,97	6,33	9,10	8,70	8,47	9,97	8,10	8,83	9,53	11,93
PCPD11	14,43	14,33	16,10	16,53	15,17	13,73	16,40	15,63	13,97	16,43	14,53	14,23	14,53	18,00
PCPD12	17,47	16,67	19,00	20,43	19,30	14,90	19,10	18,90	18,10	19,47	16,33	17,03	17,93	21,00
RAINHHMX1	50,67	52,44	34,72	49,89	50,52	41,10	48,08	38,97	35,29	51,52	51,06	65,44	41,95	55,17
RAINHHMX2	35,08	35,64	58,74	40,75	32,03	53,96	37,59	35,43	29,27	41,10	57,36	27,71	48,29	24,94
RAINHHMX3	35,71	42,45	37,98	28,06	38,41	48,19	37,91	35,08	36,49	37,95	38,30	33,41	41,92	38,97
RAINHHMX4	18,42	21,61	30,90	22,99	32,42	24,34	32,95	19,49	21,33	28,88	28,95	31,29	25,51	21,97
RAINHHMX5	39,61	14,53	34,72	25,79	23,49	12,76	25,26	18,88	21,40	38,41	28,70	21,61	18,67	22,63
RAINHHMX6	25,09	12,40	12,65	19,35	16,19	16,37	18,14	10,35	14,81	19,35	13,22	12,22	16,12	15,08
RAINHHMX7	9,57	8,72	9,78	8,61	9,42	4,25	9,11	12,58	9,35	10,20	9,89	12,83	17,08	17,96
RAINHHMX8	10,49	17,01	7,23	19,35	14,31	8,43	13,32	15,70	10,42	17,72	8,96	16,55	16,65	18,42
RAINHHMX9	19,70	16,44	18,78	24,23	22,43	15,20	24,59	27,64	22,75	21,72	18,46	19,84	22,61	18,85
RAINHHMX10	50,56	27,71	17,57	26,22	38,80	35,32	36,64	22,39	56,34	24,45	19,59	33,80	34,33	30,83
RAINHHMX11	54,28	49,25	31,25	33,52	48,61	41,10	47,83	34,08	42,66	32,45	34,44	35,96	32,24	64,95
RAINHHMX12	43,72	42,80	54,14	38,62	40,71	43,51	37,03	51,38	38,55	39,05	58,43	36,95	36,49	40,60
SOLARAV1	19,26	16,20	18,97	18,51	18,52	18,97	18,97	19,26	19,26	19,26	18,97	18,52	18,52	18,52
SOLARAV2	19,90	15,98	19,21	19,74	19,24	19,21	19,21	19,90	19,90	19,90	19,21	19,24	19,24	19,24
SOLARAV3	18,50	15,29	18,51	17,86	16,84	18,51	18,51	18,50	18,50	18,50	18,51	16,84	16,84	16,84
SOLARAV4	17,82	15,66	18,21	17,74	16,47	18,21	18,21	17,82	17,82	17,82	18,21	16,47	16,47	16,47
SOLARAV5	16,38	14,63	16,91	15,28	15,02	16,91	16,91	16,38	16,38	16,38	16,91	15,02	15,02	15,02
SOLARAV6	15,86	14,45	16,35	14,56	14,48	16,35	16,35	15,86	15,86	15,86	16,35	14,48	14,48	14,48
SOLARAV7	16,28	14,62	16,68	15,68	15,51	16,68	16,68	16,28	16,28	16,28	16,68	15,51	15,51	15,51
SOLARAV8	17,79	15,27	17,60	18,20	17,45	17,60	17,60	17,79	17,79	17,79	17,60	17,45	17,45	17,45
SOLARAV9	18,71	15,75	18,37	18,92	17,54	18,37	18,37	18,71	18,71	18,71	18,37	17,54	17,54	17,54
SOLARAV10	19,45	15,79	18,97	19,83	18,93	18,97	18,97	19,45	19,45	19,45	18,97	18,93	18,93	18,93
SOLARAV11	19,11	15,97	18,62	19,28	18,38	18,62	18,62	19,11	19,11	19,11	18,62	18,38	18,38	18,38
SOLARAV12	18,82	15,59	18,75	18,03	17,81	18,75	18,75	18,82	18,82	18,82	18,75	17,81	17,81	17,81
DEWPT1	75,89	71,18	72,40	79,77	81,97	72,40	72,40	75,89	75,89	75,89	72,40	81,97	81,97	81,97
DEWPT2	74,71	68,58	69,76	78,03	79,75	69,76	69,76	74,71	74,71	74,71	69,76	79,75	79,75	79,75
DEWPT3	76,73	70,97	73,41	79,87	82,34	73,41	73,41	76,73	76,73	76,73	73,41	82,34	82,34	82,34
DEWPT4	74,44	68,92	70,00	76,58	81,51	70,00	70,00	74,44	74,44	74,44	70,00	81,51	81,51	81,51
DEWPT5	73,65	67,26	68,43	74,14	81,73	68,43	68,43	73,65	73,65	73,65	68,43	81,73	81,73	81,73
DEWPT6	71,16	65,11	65,11	71,15	81,38	65,11	65,11	71,16	71,16	71,16	65,11	81,38	81,38	81,38
DEWPT7	66,84	61,31	60,13	65,38	78,76	60,13	60,13	66,84	66,84	66,84	60,13	78,76	78,76	78,76
DEWPT8	61,19	56,33	54,03	59,43	72,44	54,03	54,03	61,19	61,19	61,19	54,03	72,44	72,44	72,44
DEWPT9	61,60	54,42	55,16	61,59	69,97	55,16	55,16	61,60	61,60	61,60	55,16	69,97	69,97	69,97
DEWPT10	66,33	59,10	59,11	68,12	73,10	59,11	59,11	66,33	66,33	66,33	59,11	73,10	73,10	73,10
DEWPT11	74,17	69,79	69,70	77,23	79,60	69,70	69,70	74,17	74,17	74,17	69,70	79,60	79,60	79,60
DEWPT12	77,29	73,22	74,05	80,39	82,24	74,05	74,05	77,29	77,29	77,29	74,05	82,24	82,24	82,24
WNDAV1	1,16	1,66	0,98	2,00	0,89	0,98	0,98	1,16	1,16	1,16	0,98	0,89	0,89	0,89
WNDAV2	1,17	1,77	0,94	2,01	0,96	0,94	0,94	1,17	1,17	1,17	0,94	0,96	0,96	0,96
WNDAV3	1,15	1,61	0,86	2,01	0,86	0,86	0,86	1,15	1,15	1,15	0,86	0,86	0,86	0,86
WNDAV4	1,06	1,57	0,87	2,09	0,84	0,87	0,87	1,06	1,06	1,06	0,87	0,84	0,84	0,84
WNDAV5	1,02	1,50	0,93	2,14	0,82	0,93	0,93	1,02	1,02	1,02	0,93	0,82	0,82	0,82
WNDAV6	1,03	1,54	0,93	2,11	0,79	0,93	0,93	1,03	1,03	1,03	0,93	0,79	0,79	0,79
WNDAV7	1,10	1,66	1,05	2,28	0,81	1,05	1,05	1,10	1,10	1,10	1,05	0,81	0,81	0,81
WNDAV8	1,13	1,94	1,25	2,41	0,97	1,25	1,25	1,13	1,13	1,13	1,25	0,97	0,97	0,97
WNDAV9	1,21	2,10	1,23	2,41	1,13	1,23	1,23	1,21	1,21	1,21	1,23	1,13	1,13	1,13
WNDAV10	1,24	2,07	1,13	2,24	1,16	1,13	1,13	1,24	1,24	1,24	1,13	1,16	1,16	1,16
WNDAV11	1,21	1,76	1,00	2,09	1,13	1,00	1,00	1,21	1,21	1,21	1,00	1,13	1,13	1,13
WNDAV12	1,16	1,70	1,01	1,96	1,02	1,01	1,01	1,16	1,16	1,16	1,01	1,02	1,02	1,02

*APÊNDICE G: Valores de produção de sedimentos anual na bacia do Indaiá (por hru)*

LULC	HRU	SUB	Produção de Sedimentos (ton/ha.ano)		
			Ano 1988	Ano 2007	Média 20 anos
<b>MATA</b>	1	1	0,08	0,108	0,177
<b>MATA</b>	2	1	0,029	0,044	0,063
<b>MATA</b>	3	1	0,141	0,178	0,262
<b>MATA</b>	4	1	0,007	0,013	0,04
<b>MATA</b>	5	1	0,014	0,019	0,066
<b>MATA</b>	6	1	0,002	0,007	0,017
<b>MATA</b>	7	1	0,001	0,006	0,011
<b>MATA</b>	8	1	0,007	0,012	0,039
<b>MATA</b>	9	1	0,003	0,01	0,026
<b>CERR</b>	10	1	3,002	5,35	7,163
<b>CERR</b>	11	1	0,562	0,913	1,311
<b>CERR</b>	12	1	1,617	2,61	3,779
<b>CERR</b>	13	1	0,105	0,095	0,239
<b>CERR</b>	14	1	0,323	0,286	0,748
<b>CERR</b>	15	1	0,602	0,527	1,43
<b>CERR</b>	16	1	0,035	0,081	0,207
<b>CERR</b>	17	1	0,074	0,191	0,494
<b>CERR</b>	18	1	0,006	0,301	0,653
<b>CAMP</b>	19	1	0,055	0,025	0,055
<b>CAMP</b>	20	1	0,124	0,056	0,123
<b>CAMP</b>	21	1	0,234	0,103	0,228
<b>CAMP</b>	22	1	0,016	0,01	0,026
<b>CAMP</b>	23	1	0,007	0,006	0,013
<b>CAMP</b>	24	1	0,026	0,013	0,036
<b>CAMP</b>	25	1	0,011	0,009	0,019
<b>CAMP</b>	26	1	0,008	0,01	0,02
<b>CAMP</b>	27	1	0,004	0,005	0,007
<b>PAST</b>	28	1	1,378	1,281	1,913
<b>PAST</b>	29	1	3,772	3,554	5,163
<b>PAST</b>	30	1	7,656	7,895	10,948
<b>PAST</b>	31	1	0,49	0,244	0,605
<b>PAST</b>	32	1	1,902	0,954	2,404
<b>PAST</b>	33	1	1,799	0,873	2,165
<b>PAST</b>	34	1	0,496	0,432	0,975
<b>PAST</b>	35	1	0,006	0,763	0,975
<b>PAST</b>	36	1	0,246	0,202	0,461
<b>AGRL</b>	37	1	1,537	0,841	1,522
<b>AGRL</b>	38	1	4,607	2,377	4,505
<b>WATR</b>	39	1	0	0	0
<b>WATR</b>	40	1	0	0	0
<b>WATR</b>	41	1	0	0	0
<b>WATR</b>	42	1	0	0	0

<b>WATR</b>	43	1	0	0	0
<b>WATR</b>	44	1	0	0	0
<b>MATA</b>	45	2	0,16	0,203	0,308
<b>MATA</b>	46	2	0,082	0,11	0,183
<b>MATA</b>	47	2	0,025	0,038	0,055
<b>CERR</b>	48	2	2,72	4,815	6,571
<b>CERR</b>	49	2	1,553	2,515	3,632
<b>CERR</b>	50	2	0,48	0,78	1,127
<b>CAMP</b>	51	2	0,235	0,104	0,23
<b>CAMP</b>	52	2	0,146	0,066	0,146
<b>CAMP</b>	53	2	0,052	0,024	0,053
<b>PAST</b>	54	2	6,77	6,976	9,793
<b>PAST</b>	55	2	1,232	1,154	1,734
<b>PAST</b>	56	2	3,762	3,582	5,275
<b>WATR</b>	57	2	0	0	0
<b>MATA</b>	58	3	0,08	0,107	0,176
<b>MATA</b>	59	3	0,132	0,166	0,244
<b>MATA</b>	60	3	0,027	0,041	0,059
<b>MATA</b>	61	3	5,573	9,871	13,177
<b>MATA</b>	62	3	12,656	22,1	29,655
<b>MATA</b>	63	3	1,607	2,807	3,721
<b>CERR</b>	64	3	2,884	5,128	6,941
<b>CERR</b>	65	3	1,564	2,526	3,693
<b>CERR</b>	66	3	0,472	0,766	1,104
<b>CERR</b>	67	3	6,846	7,222	10,34
<b>CERR</b>	68	3	23,048	24,32	35,195
<b>CERR</b>	69	3	44,611	46,269	67,634
<b>CAMP</b>	70	3	0,229	0,101	0,224
<b>CAMP</b>	71	3	0,141	0,063	0,142
<b>CAMP</b>	72	3	0,047	0,022	0,048
<b>CAMP</b>	73	3	3,548	4,18	6,458
<b>CAMP</b>	74	3	5,522	6,505	10,227
<b>CAMP</b>	75	3	1,127	1,257	1,944
<b>PAST</b>	76	3	7,195	7,478	10,345
<b>PAST</b>	77	3	1,253	1,177	1,767
<b>PAST</b>	78	3	3,864	3,688	5,394
<b>PAST</b>	79	3	35,4	22,846	39,73
<b>PAST</b>	80	3	67,016	42,356	74,75
<b>PAST</b>	81	3	11,711	7,59	13,125
<b>AGRL</b>	82	3	24,917	14,966	27,996
<b>WATR</b>	83	3	0	0	0
<b>WATR</b>	84	3	0	0	0
<b>WATR</b>	85	3	0	0	0
<b>WATR</b>	86	3	0	0	0
<b>WATR</b>	87	3	0	0	0
<b>WATR</b>	88	3	0	0	0

<b>MATA</b>	89	4	0,02	0,034	0,033
<b>MATA</b>	90	4	0,063	0,101	0,103
<b>MATA</b>	91	4	0,114	0,193	0,184
<b>MATA</b>	92	4	1,737	3,031	2,557
<b>MATA</b>	93	4	12,405	23,371	19,962
<b>MATA</b>	94	4	5,838	10,438	8,812
<b>CERR</b>	95	4	0,413	0,84	0,709
<b>CERR</b>	96	4	1,229	2,521	2,115
<b>CERR</b>	97	4	1,975	4,672	3,367
<b>CERR</b>	98	4	17,579	28,65	24,087
<b>CERR</b>	99	4	35,321	60,357	50,281
<b>CERR</b>	100	4	5,345	8,625	7,229
<b>CAMP</b>	101	4	0,092	0,101	0,119
<b>CAMP</b>	102	4	0,032	0,037	0,041
<b>CAMP</b>	103	4	0,122	0,151	0,171
<b>CAMP</b>	104	4	0,831	0,689	1,198
<b>CAMP</b>	105	4	2,657	2,287	3,99
<b>CAMP</b>	106	4	4,159	3,652	6,475
<b>PAST</b>	107	4	0,851	1,556	1,45
<b>PAST</b>	108	4	2,382	4,473	4,145
<b>PAST</b>	109	4	3,799	8,442	7,4
<b>PAST</b>	110	4	54,384	79,176	72,506
<b>PAST</b>	111	4	27,186	38,092	35,37
<b>PAST</b>	112	4	8,792	12,269	11,368
<b>WATR</b>	113	4	0	0	0
<b>WATR</b>	114	4	0	0	0
<b>MATA</b>	115	5	0,025	0,02	0,032
<b>MATA</b>	116	5	0,186	0,149	0,237
<b>MATA</b>	117	5	0,085	0,061	0,106
<b>MATA</b>	118	5	0,005	0,008	0,024
<b>MATA</b>	119	5	0,012	0,016	0,064
<b>MATA</b>	120	5	0,012	0,019	0,102
<b>MATA</b>	121	5	18,76	19,371	27,612
<b>MATA</b>	122	5	7,62	7,739	11,029
<b>MATA</b>	123	5	2,252	2,211	3,202
<b>CERR</b>	124	5	0,628	0,445	0,638
<b>CERR</b>	125	5	2,984	2,937	3,6
<b>CERR</b>	126	5	1,896	1,411	1,866
<b>CERR</b>	127	5	0,156	0,156	0,378
<b>CERR</b>	128	5	0,411	0,433	1,082
<b>CERR</b>	129	5	0,458	0,579	1,659
<b>CERR</b>	130	5	7,126	7,006	9,259
<b>CERR</b>	131	5	50,624	51,664	66,9
<b>CERR</b>	132	5	24,147	24,262	31,688
<b>CAMP</b>	133	5	0,021	0,017	0,026
<b>CAMP</b>	134	5	0,079	0,076	0,109

<b>CAMP</b>	135	5	0,062	0,055	0,08
<b>CAMP</b>	136	5	0,014	0,018	0,037
<b>CAMP</b>	137	5	0,003	0,007	0,01
<b>CAMP</b>	138	5	0,012	0,016	0,03
<b>CAMP</b>	139	5	2,598	1,892	4,367
<b>CAMP</b>	140	5	0,78	0,52	1,243
<b>CAMP</b>	141	5	4,512	3,5	7,9
<b>PAST</b>	142	5	3,945	3,629	4,34
<b>PAST</b>	143	5	1,269	1,091	1,336
<b>PAST</b>	144	5	6,749	7,925	8,899
<b>PAST</b>	145	5	0,437	0,459	0,791
<b>PAST</b>	146	5	1,845	2,224	4,16
<b>PAST</b>	147	5	1,353	1,413	2,557
<b>PAST</b>	148	5	65,595	66,56	84,676
<b>PAST</b>	149	5	10,24	10,258	13,196
<b>PAST</b>	150	5	31,466	31,732	40,708
<b>AGRL</b>	151	5	1,537	1,459	1,966
<b>AGRL</b>	152	5	3,727	3,497	4,712
<b>AGRL</b>	153	5	16,79	16,138	21,69
<b>AGRL</b>	154	5	1,296	1,262	1,987
<b>MATA</b>	155	6	0,115	0,202	0,19
<b>MATA</b>	156	6	0,02	0,034	0,033
<b>MATA</b>	157	6	0,064	0,104	0,106
<b>MATA</b>	158	6	5,579	9,972	8,41
<b>MATA</b>	159	6	10,493	19,689	16,778
<b>MATA</b>	160	6	1,669	2,911	2,455
<b>CERR</b>	161	6	1,283	2,637	2,21
<b>CERR</b>	162	6	2,271	5,461	3,914
<b>CERR</b>	163	6	0,377	0,766	0,646
<b>CERR</b>	164	6	17,813	29,035	24,4
<b>CERR</b>	165	6	5,224	8,426	7,063
<b>CERR</b>	166	6	31,11	52,987	44,153
<b>CAMP</b>	167	6	0,081	0,088	0,104
<b>CAMP</b>	168	6	0,119	0,148	0,167
<b>CAMP</b>	169	6	0,025	0,029	0,032
<b>CAMP</b>	170	6	4,129	3,629	6,431
<b>CAMP</b>	171	6	2,534	2,178	3,798
<b>CAMP</b>	172	6	0,796	0,659	1,146
<b>PAST</b>	173	6	4,038	9,16	7,953
<b>PAST</b>	174	6	0,764	1,394	1,3
<b>PAST</b>	175	6	2,47	4,666	4,312
<b>PAST</b>	176	6	25,259	36,056	33,06
<b>PAST</b>	177	6	46,767	68,421	62,378
<b>PAST</b>	178	6	8,812	12,372	11,414
<b>WATR</b>	179	6	0	0	0
<b>WATR</b>	180	6	0	0	0

<b>WATR</b>	181	6	0	0	0
<b>MATA</b>	182	7	0,122	0,104	0,161
<b>MATA</b>	183	7	0,061	0,048	0,078
<b>MATA</b>	184	7	0,02	0,017	0,026
<b>MATA</b>	185	7	0,006	0,01	0,013
<b>MATA</b>	186	7	0,022	0,033	0,046
<b>MATA</b>	187	7	0,017	0,024	0,033
<b>MATA</b>	188	7	1,69	1,71	2,225
<b>MATA</b>	189	7	5,766	6,099	7,788
<b>MATA</b>	190	7	12,244	12,779	16,321
<b>CERR</b>	191	7	2,341	2,484	3,128
<b>CERR</b>	192	7	0,478	0,393	0,552
<b>CERR</b>	193	7	1,424	1,182	1,651
<b>CERR</b>	194	7	0,346	0,569	0,605
<b>CERR</b>	195	7	0,477	0,862	0,875
<b>CERR</b>	196	7	0,134	0,209	0,227
<b>CERR</b>	197	7	4,698	5,473	6,566
<b>CERR</b>	198	7	15,891	19,147	22,711
<b>CERR</b>	199	7	31,802	38,957	45,747
<b>EUCA</b>	200	7	0,001	0,006	0,004
<b>EUCA</b>	201	7	0,003	0,008	0,006
<b>EUCA</b>	202	7	0,005	0,01	0,008
<b>EUCA</b>	203	7	0,047	0,037	0,059
<b>EUCA</b>	204	7	0,021	0,017	0,026
<b>CAMP</b>	205	7	0,075	0,072	0,115
<b>CAMP</b>	206	7	0,047	0,04	0,067
<b>CAMP</b>	207	7	0,013	0,013	0,019
<b>CAMP</b>	208	7	0,009	0,018	0,022
<b>CAMP</b>	209	7	0,013	0,023	0,029
<b>CAMP</b>	210	7	0,003	0,009	0,01
<b>CAMP</b>	211	7	2,425	1,036	3,238
<b>CAMP</b>	212	7	0,779	0,308	0,989
<b>CAMP</b>	213	7	3,819	1,705	5,296
<b>PAST</b>	214	7	4,834	4,427	6,656
<b>PAST</b>	215	7	0,901	0,669	1,134
<b>PAST</b>	216	7	2,782	2,188	3,591
<b>PAST</b>	217	7	1,444	2,142	2,365
<b>PAST</b>	218	7	0,924	1,344	1,549
<b>PAST</b>	219	7	0,339	0,466	0,548
<b>PAST</b>	220	7	46,035	50,068	63,128
<b>PAST</b>	221	7	23,782	25,338	32,263
<b>PAST</b>	222	7	7,779	8,099	10,365
<b>AGRL</b>	223	7	6,439	6,061	9,577
<b>MATA</b>	224	8	0,025	0,02	0,032
<b>MATA</b>	225	8	0,082	0,063	0,104
<b>MATA</b>	226	8	0,157	0,129	0,202

<b>MATA</b>	227	8	0,013	0,019	0,025
<b>MATA</b>	228	8	0,005	0,009	0,011
<b>MATA</b>	229	8	0,016	0,024	0,033
<b>MATA</b>	230	8	1,829	1,85	2,409
<b>MATA</b>	231	8	14,728	14,957	19,343
<b>MATA</b>	232	8	6,044	6,344	8,137
<b>CERR</b>	233	8	0,575	0,476	0,669
<b>CERR</b>	234	8	1,884	1,557	2,183
<b>CERR</b>	235	8	3,221	3,393	4,29
<b>CERR</b>	236	8	0,289	0,476	0,505
<b>CERR</b>	237	8	0,383	0,693	0,702
<b>CERR</b>	238	8	0,11	0,171	0,186
<b>CERR</b>	239	8	17,597	21,108	25,106
<b>CERR</b>	240	8	5,241	6,099	7,32
<b>CERR</b>	241	8	35,942	43,709	51,563
<b>CAMP</b>	242	8	0,113	0,109	0,175
<b>CAMP</b>	243	8	0,063	0,053	0,09
<b>CAMP</b>	244	8	0,021	0,019	0,029
<b>CAMP</b>	245	8	0,006	0,014	0,017
<b>CAMP</b>	246	8	0,009	0,018	0,022
<b>CAMP</b>	247	8	0,001	0,006	0,006
<b>CAMP</b>	248	8	0,866	0,343	1,1
<b>CAMP</b>	249	8	4,999	2,284	7,054
<b>CAMP</b>	250	8	2,893	1,247	3,89
<b>PAST</b>	251	8	1,065	0,789	1,338
<b>PAST</b>	252	8	3,446	2,676	4,424
<b>PAST</b>	253	8	6,512	5,842	8,879
<b>PAST</b>	254	8	1,304	1,949	2,133
<b>PAST</b>	255	8	0,753	1,105	1,266
<b>PAST</b>	256	8	0,285	0,394	0,462
<b>PAST</b>	257	8	49,711	52,446	66,776
<b>PAST</b>	258	8	25,615	26,639	34,131
<b>PAST</b>	259	8	8,268	8,545	10,955
<b>AGRL</b>	260	8	4,637	3,416	6,008
<b>AGRL</b>	261	8	6,141	4,751	8,154
<b>MATA</b>	262	9	0,07	0,055	0,09
<b>MATA</b>	263	9	0,145	0,122	0,189
<b>MATA</b>	264	9	0,022	0,018	0,028
<b>MATA</b>	265	9	5,38	5,68	7,265
<b>MATA</b>	266	9	1,671	1,693	2,204
<b>MATA</b>	267	9	13,832	14,311	18,383
<b>CERR</b>	268	9	1,636	1,355	1,897
<b>CERR</b>	269	9	2,839	3,012	3,787
<b>CERR</b>	270	9	0,517	0,428	0,602
<b>CERR</b>	271	9	4,686	5,451	6,545
<b>CERR</b>	272	9	15,612	18,764	22,292

<b>CERR</b>	273	9	35,696	43,564	51,289
<b>CAMP</b>	274	9	0,056	0,047	0,08
<b>CAMP</b>	275	9	0,016	0,015	0,022
<b>CAMP</b>	276	9	0,089	0,086	0,137
<b>CAMP</b>	277	9	4,595	2,089	6,458
<b>CAMP</b>	278	9	0,718	0,283	0,91
<b>CAMP</b>	279	9	2,471	1,056	3,304
<b>PAST</b>	280	9	5,853	5,33	8,05
<b>PAST</b>	281	9	3,09	2,417	3,981
<b>PAST</b>	282	9	0,961	0,712	1,208
<b>PAST</b>	283	9	7,635	7,92	10,147
<b>PAST</b>	284	9	50,63	54,25	68,833
<b>PAST</b>	285	9	23,866	25,191	32,182
<b>MATA</b>	286	10	0,04	0,032	0,051
<b>MATA</b>	287	10	0,013	0,012	0,018
<b>MATA</b>	288	10	0,088	0,075	0,115
<b>MATA</b>	289	10	10,402	10,809	13,81
<b>MATA</b>	290	10	0,479	0,465	0,613
<b>MATA</b>	291	10	2,898	3,035	3,892
<b>CERR</b>	292	10	0,38	0,315	0,442
<b>CERR</b>	293	10	1,469	1,542	1,95
<b>CERR</b>	294	10	1,125	0,931	1,302
<b>CERR</b>	295	10	8,14	9,765	11,598
<b>CERR</b>	296	10	17,081	20,887	24,527
<b>CAMP</b>	297	10	0,033	0,029	0,049
<b>CAMP</b>	298	10	0,035	0,033	0,056
<b>CAMP</b>	299	10	0,519	0,204	0,656
<b>CAMP</b>	300	10	4,12	1,857	5,766
<b>CAMP</b>	301	10	1,29	0,529	1,681
<b>PAST</b>	302	10	0,724	0,537	0,91
<b>PAST</b>	303	10	1,854	1,447	2,383
<b>PAST</b>	304	10	3,027	2,73	4,173
<b>PAST</b>	305	10	27,291	29,79	37,467
<b>PAST</b>	306	10	4,588	4,773	6,111
<b>PAST</b>	307	10	15,346	16,426	20,858
<b>MATA</b>	308	11	0,029	0,027	0,031
<b>MATA</b>	309	11	0,097	0,088	0,105
<b>MATA</b>	310	11	0,162	0,157	0,181
<b>MATA</b>	311	11	0,012	0,019	0,048
<b>MATA</b>	312	11	0,005	0,009	0,019
<b>MATA</b>	313	11	0,012	0,022	0,068
<b>MATA</b>	314	11	0,006	0,008	0,029
<b>MATA</b>	315	11	0,001	0,005	0,007
<b>MATA</b>	316	11	0,003	0,007	0,018
<b>MATA</b>	317	11	5,161	6,095	6,854
<b>MATA</b>	318	11	8,993	10,915	12,185

<b>MATA</b>	319	11	1,635	1,857	2,127
<b>CERR</b>	320	11	2,609	2,27	2,396
<b>CERR</b>	321	11	0,758	0,632	0,69
<b>CERR</b>	322	11	3,703	4,068	3,884
<b>CERR</b>	323	11	0,165	0,193	0,347
<b>CERR</b>	324	11	0,479	0,701	1,448
<b>CERR</b>	325	11	0,448	0,55	1,002
<b>CERR</b>	326	11	0,059	0,109	0,304
<b>CERR</b>	327	11	0,031	0,044	0,116
<b>CERR</b>	328	11	0,007	0,198	0,498
<b>CERR</b>	329	11	34,963	37,091	42,422
<b>CERR</b>	330	11	6,135	6,188	7,249
<b>CERR</b>	331	11	16,827	17,418	20,157
<b>EUCA</b>	332	11	0,006	0,006	0,011
<b>EUCA</b>	333	11	0,003	0,006	0,008
<b>EUCA</b>	334	11	0	0,004	0,003
<b>EUCA</b>	335	11	0	0,003	0,001
<b>CAMP</b>	336	11	0,087	0,073	0,108
<b>CAMP</b>	337	11	0,028	0,024	0,034
<b>CAMP</b>	338	11	0,131	0,122	0,172
<b>CAMP</b>	339	11	0,005	0,008	0,012
<b>CAMP</b>	340	11	0,017	0,023	0,042
<b>CAMP</b>	341	11	0,014	0,018	0,033
<b>CAMP</b>	342	11	0,001	0,005	0,006
<b>CAMP</b>	343	11	0,005	0,009	0,018
<b>CAMP</b>	344	11	0,005	0,01	0,017
<b>CAMP</b>	345	11	3	2,617	4,6
<b>CAMP</b>	346	11	0,55	0,417	0,777
<b>CAMP</b>	347	11	1,834	1,511	2,718
<b>PAST</b>	348	11	1,739	1,744	1,844
<b>PAST</b>	349	11	8,554	10,877	10,91
<b>PAST</b>	350	11	5,407	5,735	5,978
<b>PAST</b>	351	11	1,334	1,655	2,526
<b>PAST</b>	352	11	0,523	0,631	0,961
<b>PAST</b>	353	11	1,924	2,556	4,172
<b>PAST</b>	354	11	0,194	0,453	0,909
<b>PAST</b>	355	11	0,091	0,156	0,316
<b>PAST</b>	356	11	0,01	0,963	0,973
<b>PAST</b>	357	11	40,426	42,415	53,012
<b>PAST</b>	358	11	24,315	25,067	31,742
<b>PAST</b>	359	11	8,024	8,096	10,354
<b>AGRL</b>	360	11	0,89	0,743	1,224
<b>AGRL</b>	361	11	3,506	2,952	4,768
<b>AGRL</b>	362	11	3,341	2,827	4,478
<b>AGRL</b>	363	11	2,244	2,059	3,548
<b>AGRL</b>	364	11	0,693	0,622	1,113

<b>SUGC</b>	365	11	0,009	0,007	0,01
<b>SUGC</b>	366	11	0,024	0,02	0,027
<b>SUGC</b>	367	11	0,048	0,042	0,056
<b>SUGC</b>	368	11	0,019	0,017	0,024
<b>SUGC</b>	369	11	0,005	0,007	0,007
<b>SUGC</b>	370	11	0,012	0,013	0,016
<b>WATR</b>	371	11	0	0	0
<b>WATR</b>	372	11	0	0	0
<b>MATA</b>	373	12	0,133	0,112	0,174
<b>MATA</b>	374	12	0,023	0,019	0,03
<b>MATA</b>	375	12	0,074	0,057	0,094
<b>MATA</b>	376	12	1,34	1,33	1,741
<b>MATA</b>	377	12	4,333	4,574	5,847
<b>MATA</b>	378	12	10,867	11,329	14,472
<b>CERR</b>	379	12	1,718	1,421	1,991
<b>CERR</b>	380	12	2,584	2,716	3,441
<b>CERR</b>	381	12	0,516	0,427	0,6
<b>CERR</b>	382	12	13,327	16,049	19,041
<b>CERR</b>	383	12	3,77	4,312	5,195
<b>CERR</b>	384	12	26,023	31,873	37,429
<b>CAMP</b>	385	12	0,018	0,017	0,026
<b>CAMP</b>	386	12	0,09	0,086	0,139
<b>CAMP</b>	387	12	0,054	0,046	0,078
<b>CAMP</b>	388	12	0,628	0,247	0,795
<b>CAMP</b>	389	12	3,665	1,63	5,077
<b>CAMP</b>	390	12	1,988	0,836	2,632
<b>PAST</b>	391	12	0,948	0,701	1,19
<b>PAST</b>	392	12	5,494	4,902	7,476
<b>PAST</b>	393	12	3,213	2,497	4,127
<b>PAST</b>	394	12	5,913	6,154	7,878
<b>PAST</b>	395	12	20,138	21,525	27,367
<b>PAST</b>	396	12	34,46	37,478	47,265
<b>SUGC</b>	397	12	0,013	0,012	0,02
<b>SUGC</b>	398	12	0,03	0,023	0,04
<b>MATA</b>	399	13	0,257	0,137	0,168
<b>MATA</b>	400	13	0,05	0,028	0,033
<b>MATA</b>	401	13	0,162	0,083	0,104
<b>MATA</b>	402	13	0,019	0,01	0,013
<b>MATA</b>	403	13	0,056	0,018	0,031
<b>MATA</b>	404	13	0,073	0,018	0,037
<b>CERR</b>	405	13	1,029	0,582	0,665
<b>CERR</b>	406	13	5,427	3,242	3,359
<b>CERR</b>	407	13	3,614	1,989	2,246
<b>CERR</b>	408	13	1,439	0,381	0,712
<b>CERR</b>	409	13	1,177	0,4	0,629
<b>CERR</b>	410	13	0,445	0,168	0,258

<b>EUCA</b>	411	13	0,011	0,008	0,008
<b>EUCA</b>	412	13	0,008	0,008	0,007
<b>EUCA</b>	413	13	0,002	0,005	0,004
<b>CAMP</b>	414	13	0,121	0,079	0,101
<b>CAMP</b>	415	13	0,177	0,107	0,148
<b>CAMP</b>	416	13	0,037	0,027	0,032
<b>CAMP</b>	417	13	0,01	0,01	0,012
<b>CAMP</b>	418	13	0,03	0,02	0,027
<b>CAMP</b>	419	13	0,037	0,02	0,031
<b>PAST</b>	420	13	10,382	8,29	8,543
<b>PAST</b>	421	13	6,47	4,839	5,279
<b>PAST</b>	422	13	2,099	1,527	1,681
<b>PAST</b>	423	13	3,926	1,478	2,297
<b>PAST</b>	424	13	1,085	0,542	0,744
<b>PAST</b>	425	13	2,741	1,279	1,788
<b>AGRL</b>	426	13	10,629	6,927	9,158
<b>AGRL</b>	427	13	0,925	0,678	0,813
<b>AGRL</b>	428	13	3,075	2,056	2,619
<b>SUGC</b>	429	13	0,008	0,007	0,007
<b>SUGC</b>	430	13	0,034	0,024	0,028
<b>SUGC</b>	431	13	0,078	0,048	0,063
<b>SUGC</b>	432	13	0,004	0,007	0,006
<b>SUGC</b>	433	13	0,019	0,016	0,018
<b>SUGC</b>	434	13	0,023	0,015	0,019
<b>WATR</b>	435	13	0	0	0
<b>WATR</b>	436	13	0	0	0
<b>MATA</b>	437	14	0,151	0,079	0,099
<b>MATA</b>	438	14	0,05	0,028	0,034
<b>MATA</b>	439	14	0,21	0,121	0,147
<b>MATA</b>	440	14	0,05	0,017	0,028
<b>MATA</b>	441	14	0,064	0,016	0,031
<b>MATA</b>	442	14	0,017	0,009	0,012
<b>CERR</b>	443	14	1,076	0,609	0,697
<b>CERR</b>	444	14	6,47	3,911	3,971
<b>CERR</b>	445	14	3,677	2,039	2,303
<b>CERR</b>	446	14	1,274	0,335	0,627
<b>CERR</b>	447	14	1,014	0,344	0,539
<b>CERR</b>	448	14	0,364	0,135	0,205
<b>EUCA</b>	449	14	0,04	0,026	0,031
<b>EUCA</b>	450	14	0,011	0,009	0,009
<b>EUCA</b>	451	14	0,081	0,047	0,061
<b>CAMP</b>	452	14	0,205	0,124	0,171
<b>CAMP</b>	453	14	0,118	0,077	0,098
<b>CAMP</b>	454	14	0,035	0,025	0,03
<b>CAMP</b>	455	14	0,037	0,02	0,031
<b>CAMP</b>	456	14	0,01	0,01	0,011

<b>CAMP</b>	457	14	0,029	0,019	0,026
<b>PAST</b>	458	14	2,09	1,528	1,683
<b>PAST</b>	459	14	9,857	8,366	8,605
<b>PAST</b>	460	14	6,073	4,61	5,042
<b>PAST</b>	461	14	3,817	1,411	2,204
<b>PAST</b>	462	14	2,705	1,234	1,711
<b>PAST</b>	463	14	0,965	0,467	0,633
<b>AGRL</b>	464	14	7,209	4,905	6,305
<b>AGRL</b>	465	14	16,903	10,905	14,451
<b>AGRL</b>	466	14	2,165	1,526	1,963
<b>SUGC</b>	467	14	0,081	0,05	0,066
<b>SUGC</b>	468	14	0,004	0,003	0,004
<b>SUGC</b>	469	14	0,026	0,019	0,022
<b>WATR</b>	470	14	0	0	0
<b>WATR</b>	471	14	0	0	0