

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**APLICAÇÕES DO MODELO SWAT NO BRASIL:  
REVISÃO E ESTUDO DE CASO - AMAZÔNIA**

**William Vieira de Souza**

**Juiz de Fora**

**2016**

# **APLICAÇÕES DO MODELO SWAT NO BRASIL: REVISÃO E ESTUDO DE CASO - AMAZÔNIA**

**William Vieira de Souza**

**William Vieira de Souza**

# **APLICAÇÕES DO MODELO SWAT NO BRASIL: REVISÃO E ESTUDO DE CASO - AMAZÔNIA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos

Orientador: Celso Bandeira M. Ribeiro

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO FINAL DE CURSO NÚMERO \_\_\_\_

Acadêmico (a): William Vieira de Souza

Matrícula: 200667001

Título do trabalho: Aplicações do Modelo SWAT no Brasil: Revisão e Estudo de Caso - Amazônia

**Banca Examinadora:**

Orientador(a): Celso Bandeira de Melo Ribeiro

1º Examinador(a): Rafael Alves Bonfim do Queiroz

2º Examinador(a): OTÁVIA EUNICE A. BRUNO

**Avaliação do Trabalho Final de Curso:**

Resultado	Orientador(a):	1º Examinador(a):	2º Examinador(a):	Resultado Final:
APR ou REPR	APR	APR	APR	APR

Concluídos os trabalhos de defesa do Trabalho Final de Curso, o acadêmico foi considerado Aprovado pela Banca Examinadora. A seguir, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos componentes da Banca Examinadora e pelo(a) acadêmico(a).

Juiz de Fora, 12/07/16

Orientador(a): Celso Bandeira

1º Examinador(a): Rafael Alves Bonfim do Queiroz

2º Examinador(a): OTÁVIA EUNICE A. BRUNO

Acadêmico (a): William Vieira de Souza

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sem O qual nada disso seria possível.

Aos meus pais, Lidio e Maria Luiza por todo amor e paciência.

Aos meus irmãos, Anderson e Priscila pelo carinho, amizade e por acreditarem em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Bandeira, pelo encorajamento e ajuda durante toda a elaboração do trabalho.

Ao Prof. Dr. Rafael Bonfim, do Mestrado em Modelagem Computacional, por ter gentilmente cedido um computador de seu departamento para a elaboração deste trabalho.

Aos amigos, Ricardo, Viviane, Júnior, Regina, Nielsen, Vanessa, Anaíra, Diomara, Bel, Hellen, Estefani e André, por estarem sempre presentes e tornarem a caminhada tão mais agradável.

## RESUMO

A Bacia Amazônica é a porção da América do Sul drenada pelo rio Amazonas e por seus tributários. Ela cobre uma área de aproximadamente 6.110.000 km<sup>2</sup>, o que corresponde a quase 35% de toda parte sul do continente. Dada a sua importância para o balanço hídrico da região, e até mesmo para o sudeste do Brasil que recebe chuvas a partir da umidade oriunda da Amazônia, a simulação hidrológica aparece como uma relevante ferramenta no auxílio à gestão dos recursos hídricos, uma vez que permite a previsão e análise da resposta da bacia em diferentes cenários. Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo preliminar de calibração do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação do escoamento superficial em toda a Bacia Amazônica, assim como fazer uma revisão de outros trabalhos desenvolvidos no Brasil utilizando o SWAT. Para a calibração, o modelo foi alimentado com dados mensais de vazão da estação fluviométrica de Óbidos (Cód. 17050001), mapas georreferenciados do tipo e do uso do solo e com o modelo digital de elevação da região.

## **ABSTRACT**

The Amazon basin is the portion of South America drained by the Amazon River and its tributaries. It covers an area of approximately 6.11 million square kilometers, which corresponds to almost 35% of the entire southern part of the continent. Given its importance for the water balance of the region, and even to the southeast of Brazil that receives rain from the moisture coming from the Amazon, the hydrological simulation appears as a relevant tool to aid in the management of water resources, since it allows forecasting and analysis of the basin's response in different scenarios. This study aimed to perform a preliminary study of calibration of the model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) to simulate the runoff throughout the Amazon basin, as well as to review other works developed in Brazil using SWAT. For calibration, the model was fed with monthly data from Obidos's fluviometric station (Cod. 17050001), georeferenced maps of the type of soil and of the land use and the digital elevation model of the region.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
ArcGIS	Sistema de informações geográficas desenvolvido pela Esri
ArcSWAT	Interface para configurar o SWAT dentro do ArcGIS
ARS/USDA	<i>Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture</i>
CH_N	Coefficiente de Manning para o canal principal
CN	Curva número
CN2	Curva número na condição de umidade média do solo
COE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona de saturação (adimensional)
GWQMN	Nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
HydroSHEDS	<i>Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NPERCO	Coeficiente de percolação de nitrogênio
PPERCO	Coeficiente de percolação de fósforo
SHE	<i>Système Hydrologique Européen</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SLOPE	Declividade média da sub-bacia (m/m)
SMoRMod	<i>Soil Moisture-based Runoff Model</i>
SOL_ORGP	Concentração inicial de P orgânico no solo (mg kg <sup>-1</sup> )
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWAT-CUP	<i>SWAT Calibration and Uncertainty Programs</i>
TOPMODEL	<i>Topography-based Hydrological Model</i>
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
USGS/Glovis	<i>United States Geological Survey/Global Visualization Viewer</i>
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	VIII
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	4
3.1 O modelo SWAT .....	4
3.2 Processos de calibração e validação de vazões em modelos hidrológicos.....	6
3.3 Aplicações do modelo SWAT no Brasil.....	6
<b>4 ESTUDO DE CASO: CALIBRAÇÃO PARA A BACIA AMAZÔNICA</b> .....	13
4.1 Área de estudo .....	13
4.2 Modelo digital de elevação .....	14
4.3 Mapa de uso e ocupação do solo e de tipos de solo .....	14
4.4 Dados meteorológicos e de vazão .....	16
4.5 Processo de calibração.....	18
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	22
5.1 Calibração do SWAT em grandes bacias .....	22
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	23
<b>7 RECOMENDAÇÕES</b> .....	24
7.1 Técnicas.....	24
7.2 De infraestrutura.....	24
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	25

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável à manutenção da vida na Terra, visto que ela está presente no metabolismo dos mais variados organismos vivos, nos diversos ecossistemas, na produção de alimentos, no abastecimento humano e dessedentação de animais, assim como em toda complexidade da dinâmica climática global.

Segundo Tucci, Hespanhol e Netto (2001, p. 42):

Os recursos hídricos superficiais gerados no Brasil representam 50% do total dos recursos da América do Sul e 11% dos recursos mundiais, totalizando [...] 168.870 m<sup>3</sup>/s. A distribuição desses recursos no País e durante o ano não é uniforme, destacando-se os extremos do excesso de água na Amazônia e as limitações de disponibilidade no Nordeste. A Amazônia brasileira representa 71,1% do total gerado da vazão no Brasil e, portanto 36,6 % do total gerado na América do Sul e 8% em nível mundial.

A floresta Amazônica desempenha papel fundamental no clima e no regime de chuvas de outras regiões do Brasil, pois ela retém as águas das chuvas provenientes da umidade trazida do Oceano Atlântico pelos ventos alísios, e num segundo momento libera esta umidade através da evapotranspiração para a atmosfera. Devido a existência da Cordilheira dos Andes, esta umidade não consegue continuar seguindo para oeste, e parte dela precipita nesta formação rochosa formando a cabeceira dos rios amazônicos, já o restante é redirecionado para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do país.

Dada a importância da água, tem-se desenvolvido uma série de estudos em bacias hidrográficas com o objetivo de melhor compreender a dinâmica do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e os impactos causados sobre os corpos hídricos devido a alterações no uso do solo e na cobertura vegetal. Nesse sentido, a modelagem ambiental tem sido amplamente adotada com o intuito de se representar a dinâmica da água e do transporte de sedimentos e nutrientes nas bacias hidrográficas.

Atualmente, há uma grande variedade de modelos disponíveis para a representação dos

processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Alguns exemplos destes modelos são: TOPOG desenvolvido pela *Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization*; MGB-IPH desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; SAC-SMA desenvolvido pelo *National Weather Service River Forecast System*; *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) desenvolvido pela USDA etc.

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo computacional gratuito que conjuga uma série de parâmetros físicos como: tipo e uso do solo, cobertura vegetal, relevo da região em estudo etc, o que permite a simulação de diversos cenários que já ocorram na bacia ou que possam vir a ocorrer, por processos naturais ou desencadeados pela intervenção humana.

Neste modelo há a integração entre interfaces de SIG (Sistema de Informação Geográfica) e equações matemáticas que representam o comportamento hidrológico da bacia. Essa integração é possível através da interface ArcSWAT, que permite que o modelo seja alimentado de maneira mais fácil e intuitiva, possibilitando também uma melhor compreensão dos resultados obtidos com as simulações.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo um estudo preliminar de calibração do escoamento superficial de toda a Bacia Amazônica com o modelo hidrológico SWAT, como também traçar um panorama da utilização deste modelo em bacias hidrográficas no Brasil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivo geral***

O objetivo geral deste trabalho é o de construir um panorama da utilização, e dos avanços alcançados com o modelo hidrológico SWAT na simulação de cenários em bacias hidrográficas no país.

### **2.2 *Objetivos específicos***

- Realizar um levantamento dos estudos e aplicações do modelo SWAT no Brasil;
- Calibração do modelo na Bacia Amazônica.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 O modelo SWAT

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture (ARS/USDA)* dos Estados Unidos. Ele permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a análise de diversos cenários, como a predição dos impactos: do manejo do solo sobre a qualidade da água, do transporte de sedimentos, e do transporte de químicos agrícolas. O SWAT possibilita a modelagem de grandes bacias hidrográficas, com diferentes tipos e usos do solo ao longo de grandes intervalos de tempo (NEITSCH *et al.*, 2005).

Assim como outros modelos (TOPMODEL, SHE, SMoRMod, WEPP etc), o SWAT permite a integração com sistemas de informações geográficas (SIG's). Neste contexto, foi desenvolvida a interface ArcSWAT que funciona como uma extensão do SIG ArcGIS e permite a utilização de suas ferramentas de geoprocessamento como suporte às etapas de modelagem, além de facilitar tornando mais intuitiva a alimentação com os dados de entrada do modelo (JUNIOR, 2014).

Uma das primeiras etapas da modelagem no SWAT é a delimitação da bacia e das sub-bacias. Estas são geradas a partir do modelo digital de elevação da área de estudo, ou por meio de uma bacia anteriormente vetorizada com as sub-bacias. A partir daí o modelo executa novas delimitações espaciais dentro das sub-bacias, chamadas Unidades de Resposta Hidrológica (URH), as quais são geradas através da sobreposição dos mapas de tipo de solo, uso e manejo do solo e do modelo digital de elevação (Figura 1). Em cada URH gerada é atribuída apenas uma classe de solo e um uso e manejo, representando assim, discretizações do espaço interno das sub-bacias. Então, as URH's são utilizadas como unidades para os cálculos realizados pelo modelo, e a finalidade desta subdivisão é justificada pelo ganho de tempo no processamento do SWAT nas áreas com características físicas iguais, nas quais a resposta hidrológica é a mesma (NEITSCH *et al.*, 2005).

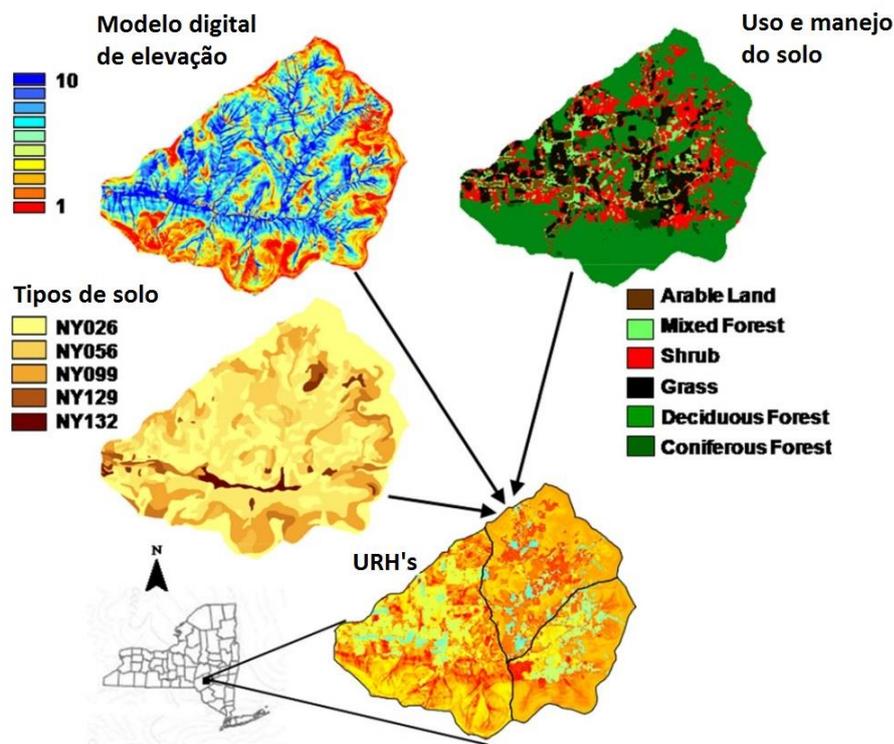


Figura 1 – Composição das unidades de resposta hidrológica (URH) a partir dos mapas de tipo de solo, cobertura vegetal e topografia.

Fonte: Easton *et al.* (2008).

O SWAT é baseado em uma estrutura de comandos que propagam o escoamento, o transporte de sedimentos e de químicos agrícolas através da bacia. O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração. O modelo requer dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar e umidade relativa (DURAES, 2010). Estes dados diários que alimentam o SWAT compõem as forçantes do modelo, variando durante o período estudado. Já os dados de tipo e uso do solo, assim como o modelo digital de elevação, são estáticos durante a modelagem, mantendo um mesmo valor durante toda a análise.

Independente da natureza do estudo realizado com o SWAT, o seu funcionamento será sempre uma função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica. Assim, o processamento do modelo SWAT pode ser resumido nas seguintes etapas: num primeiro momento são calculados os fluxos para cada URH; depois os resultados de cada URH são agregados por sub-bacia; por fim, as respostas para cada sub-bacia são direcionadas para a rede de drenagem existente na bacia hidrográfica (SALLES, 2012; NEITSCH *et al.*, 2005).

### **3.2 Processos de calibração e validação de vazões em modelos hidrológicos**

A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo à realidade da região em estudo, ou seja, esse procedimento visa encontrar os parâmetros que permitam ao modelo representar a bacia hidrográfica de forma adequada, coerente com a realidade observada (SOUZA, 2015).

O processo de calibração de modelos hidrológicos é geralmente feito realizando-se primeiramente uma análise de sensibilidade dos parâmetros, o qual identifica os parâmetros mais importantes, seguida da calibração desses parâmetros identificados na etapa anterior, podendo ser conduzida tanto de forma automática, utilizando algoritmos de otimização, quanto de forma manual (SALLES, 2012).

Já o procedimento que mede o quão bem o ajustamento dos parâmetros realizado na calibração fornece dados coerentes com a realidade denomina-se validação do modelo. Ela é a garantia de qualidade dos resultados obtidos por modelos, uma vez que se comparam as respostas modeladas com os valores observados (SOUZA, 2015).

### **3.3 Aplicações do modelo SWAT no Brasil**

Devido as proporções continentais do território brasileiro – o que permite uma grande variabilidade climática entre as diferentes regiões do país, como também a ocorrência de diferentes biomas – há a necessidade de toda uma gama de ferramentas no auxílio a tomada de decisões referentes ao manejo dos recursos naturais. Neste contexto, a modelagem de bacias hidrográficas aparece como uma poderosa ferramenta de gestão de recursos hídricos, e o SWAT, como um dos modelos mais consistentes e utilizados ao redor do mundo (BRESSIANI *et al.*, 2015).

Ainda segundo Bressiani *et al.* (2015), a utilização do SWAT no Brasil teve um grande crescimento na última década, com trabalhos que buscaram verificar desde a capacidade do modelo de representar satisfatoriamente as bacias hidrográficas brasileiras, até análises mais complexas, como a avaliação do impacto causado em bacias (alteração do volume de água escoado superficialmente, e transporte de sedimentos e aditivos agrícolas) pela mudança do uso do solo ou pelo desmatamento de florestas.

A seguir serão apresentados alguns dos trabalhos desenvolvidos no país com um breve comentário sobre os seus resultados e possíveis dificuldades encontradas pelos autores:

- CRUZ, (2012) - Monitoramento e modelagem hidrológica do rio Siriri Vivo

Em seu trabalho, Cruz (2012), realizou a calibração e validação da sub-bacia hidrográfica do rio Siriri Vivo – Sergipe, com área de aproximadamente 47 km<sup>2</sup>. Na alimentação do modelo utilizaram-se, o modelo digital de elevação (MDE), os mapas de uso e ocupação do solo da região, obtidos de SERGIPE (2004) e o mapa de tipo de solo. Os dados climatológicos foram obtidos a partir de quatro estações pluviométricas e uma estação agrometeorológica (localizadas nas proximidades do município de Siriri) em frequência diária de medição, para um período de 6 anos (de janeiro de 2000 a dezembro de 2005). Já as medições das vazões do rio foram realizadas através de um vertedouro retangular construído durante a realização da pesquisa.

Na calibração do modelo, inicialmente foi realizada uma análise de sensibilidade, e posteriormente os valores dos parâmetros CN (curva número) e ALPHA-BF (constante de recessão do escoamento de base) foram modificados manualmente até que a vazão simulada pelo modelo se aproximasse da vazão mensurada. O autor pôde concluir que a produção de água e de sedimentos (este último, apenas de forma qualitativa) foi maior nas áreas onde o uso e a ocupação do solo se caracterizavam como agricultura, especificamente a cana-de-açúcar.

- BALTOKOSKI *et al.* (2010) - Calibração de modelo para a simulação de vazão e fósforo

Neste trabalho objetivou-se avaliar a sensibilidade do modelo SWAT em prever a vazão e o fluxo total de fósforo em duas microbacias hidrográficas contíguas, dos rios Conrado (24,11 km<sup>2</sup>) e Pinheiro (28.86 km<sup>2</sup>), afluentes do rio Pato Branco, nos municípios de Pato Branco e Mariópolis – Paraná. O modelo foi alimentado com o MDE da região (composto a partir da carta topográfica Mariópolis MI – 2862/4 da Divisão de Serviços Geográficos do Exército), com mapa de uso e ocupação do solo obtido a partir de imagem de satélite Landsat TM5, bandas 3, 4 e 5 (de junho de 2000, com resolução espacial de 30 m), com mapa de tipos de solo obtidos de Machado (2006). Os dados climatológicos utilizados neste trabalho são provenientes da Estação Climatológica do Instituto Agrônomo do Paraná e do Sistema Meteorológico do Paraná, para o município de Pato Branco, já as medidas de vazão foram obtidas através de duas estações fluviométricas da ANA, a jusante dos rios Conrado e Pinheiro (códigos da ANA

65925780 e 65925770, respectivamente).

Baltokoski *et al.* (2010), realizou uma análise de sensibilidade dos parâmetros para a calibração da vazão, chegando no seguinte *ranking* de parâmetros, em ordem decrescente de sensibilidade: 1) NPERCO - coef. de percolação de nitrogênio, 2) PPERCO – coef. de percolação de fósforo e 3) CH\_N – coef. de Manning para o canal principal, para duas as estações fluviométricas utilizadas na calibração. Na auto-calibração para a estação do rio Conrado obteve-se um valor para o Coeficiente de Nash-Sutcliffe ou COE (coeficiente que mede a capacidade do modelo em bem representar a bacia, quanto mais próximo de 1, mais preciso é o modelo) de 0,68 e 0,70 para a estação do rio Pinheiro, sendo ambos resultados considerados satisfatórios de acordo com Silva *et al.* (2008). Já na análise de sensibilidade dos parâmetros para a calibração da exportação de fósforo total, obteve-se o seguinte *ranking*: 1) CN2 – curva número na condição de umidade média do solo, 2) SOL\_ORGP – concentração inicial de P orgânico no solo (mg/kg), 3) SLOPE – declividade média da sub-bacia (m/m). O procedimento de autocalibração para a exportação de fósforo total, não obteve um resultado adequado, portanto, foi necessária a calibração manual do modelo.

Por fim, os autores concluíram que a análise de sensibilidade realizada facilitou posteriormente no procedimento de calibração do modelo, o modelo conseguiu bem representar a realidade da bacia quando alimentado com dados de frequência regular e que quando a frequência de amostragem foi irregular e o número de dados pequeno, os procedimentos de análise de sensibilidade e autocalibração não foram eficientes na calibração do SWAT.

- PINTO, (2011) - Análise hidrossedimentológica no ribeirão Lavrinha

Pinto (2011), buscou em sua pesquisa, aplicar o modelo SWAT na simulação do escoamento, da produção e do transporte de sedimentos e da qualidade da água na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (com área de 6,88 km<sup>2</sup>), região da Serra da Mantiqueira – Minas Gerais. O modelo digital de elevação utilizado no SWAT foi gerado a partir de cartas topográficas vetoriais disponibilizadas pelo IBGE para o município de Bocaina de Minas (carta SF- 23-2-A-II-1). O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir de uma imagem de satélite IKONOS com resolução espacial de 5 m e levantamento em campo. Já o mapa de tipo de solos foi obtido do trabalho de Menezes (2007), que realizou o levantamento dos solos da região em estudo. Os dados climáticos foram obtidos no período de janeiro de 2006 a setembro de 2010 a

partir de uma estação climatológica completa. Os dados de vazão foram determinados através de medições em campo para a determinação de uma curva chave, e então por meio de regressão, relacionando a vazão com a altura da lâmina d'água obteve-se toda a série de vazões para o período de janeiro de 2006 a setembro de 2010.

Na calibração da vazão, Pinto (2011) obteve um COE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe, que mede a precisão do modelo em representar a bacia) de 0,79 considerado bom e adequado por Gottschalk & Motovilov (2000). Já na simulação do transporte de sedimentos, nutrientes e da qualidade da água, obteve 0,65, 0,41 e 0,69, respectivamente, considerados aceitáveis por Silva *et al.* (2008).

Com o modelo calibrado e validado, Pinto (2011) realizou a simulação de alguns cenários, como o da mudança no uso do solo, com a substituição de áreas de pastagem que ocorrem na região, por florestas de eucalipto, resultando na redução da produção e do transporte de sedimentos. Já a simulação que adotava a recomposição de matas ciliares ao longo de toda rede de drenagem, evidenciou a redução da concentração de sedimentos na calha do ribeirão Lavrinha, demonstrando assim a possibilidade de uso do SWAT como uma poderosa ferramenta no gerenciamento de recursos hídricos.

- SOUZA, (2015) - Monitoramento hidrossedimentológico na Amazônia

Em seu trabalho, Souza (2015) realizou a calibração e validação para a vazão e o transporte de sedimentos no SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Machadinho – Rondônia, com uma área de aproximadamente 5.485 km<sup>2</sup>. O MDE utilizado foi gerado através de imagens de satélite ASTER, do ano 2011 disponíveis no site da NASA. O mapa de uso e ocupação do solo também foi gerado a partir de imagens de satélite, LANDSAT 5, disponibilizadas pela organização americana USGS Glovis. Já o mapa de tipo de solo foi obtido do trabalho de Mercuri *et al.* (2009). Os dados climatológicos foram obtidos do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP), onde foram criadas estações virtuais para o aferimento dos dados da base de dados do GPCP, seguindo a mesma metodologia de Malutta (2012). A série histórica dos dados de vazão e descarga de sedimentos do rio Machadinho foram obtidas do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), para a estação com código 15575000.

Souza (2015) realizou uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros que tinham um maior impacto no modelo, e em seguida utilizou o programa SWAT-CUP para calibrar o

modelo através do ajustamento dos 10 parâmetros mais sensíveis, determinados na etapa anterior. Para a calibração da vazão, obteve um COE de 0,80, considerado adequado por Gottschalk & Motovilov (2000), já para a calibração da descarga de sedimentos obteve -11,04, o que para os padrões de Green & Van Griensven (2008), indica que o modelo não é representativo da bacia em estudo. Souza (2015) atribuiu este resultado ao pequeno conjunto de dados observados para a descarga de sedimentos, citando outros autores que utilizaram o SWAT e que também tiveram dificuldades em calibrar variáveis com poucas informações das mesmas. Nas simulações de cenários, Souza (2015) verificou tanto um aumento da vazão, como da produção de sedimentos, quando da conversão da mata nativa em pastagem e em área urbana.

A seguir é apresentada uma relação de outros trabalhos desenvolvidos no Brasil com o modelo SWAT (Tabela 1).

Tabela 1 – Relação de outras aplicações do modelo SWAT no Brasil.

<b>Autor (Ano)</b>	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Local de Aplicação</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
Baldissera (2005)	<i>Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT</i>	Cuiabá (MT)	29.000
Paim & Menezes (2009)	<i>Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo SWAT</i>	Tijucas e municípios vizinhos (SC)	2.840
Duraes (2010)	<i>Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído</i>	Paraopeba e municípios vizinhos (MG)	10.222,0

Continua...

Tabela 1 – Continuação.

Pacheco (2011)	<i>Aplicação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu (SC, Brasil)</i>	Itajaí e municípios vizinhos (SC)	15.000,0
Kuwajima (2012)	<i>Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo</i>	Itirapina, Brotas e São Carlos (SP)	6,8
Lelis <i>et al.</i> (2012)	<i>Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil</i>	Viçosa (MG)	54,2
Salles (2012)	<i>Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau</i>	Brasília (DF) e municípios vizinhos na porção norte do estado de Goiás	235,0
Andrade, Mello & Beskow (2013)	<i>Simulação hidrológica em bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG</i>	Nazareno (MG)	32,0
Farias <i>et al.</i> (2013)	<i>Calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a simulação da vazão líquida na bacia hidrográfica do rio Braço do Norte – Santa Catarina</i>	Braço do Norte e municípios vizinhos (SC)	1.975,0
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	<i>Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT</i>	Distrito Federal (DF)	16,6
Lessa <i>et al.</i> (2013)	<i>Modelo hidrológico SWAT na determinação das perdas de solo na bacia hidrográfica do rio Pardo – Botucatu / SP</i>	Botucatu (SP)	148,8
Neto (2013)	<i>Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT</i>	Nazareno e Conceição da Barra de Minas (MG)	32,0 e 4,7
Pereira (2013)	<i>Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT</i>	Barbacena e municípios vizinhos (MG e RJ)	8.600,0

Continua...

Tabela 1 – Conclusão.

Souza & Santos (2013)	<i>Estimativa da variabilidade especial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT</i>	Piên e municípios vizinhos (PR e SC)	788,0
Junior (2014)	<i>Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis</i>	Jundiá e municípios vizinhos (SP)	1.114,0
Veiga (2014)	<i>Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia – GO</i>	Goiânia (GO)	31,7
Ribeiro, Bressiani & Filho (2015)	<i>Modelagem hidrológica de vazões na Bacia Amazônica utilizando o modelo SWAT</i>	Bacia Amazônica	6.112.000,0
Louzada (2015)	<i>Modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Xingú</i>	Ao longo de municípios de Mato Grosso (MT) e Pará (PA)	509.000,0

Fonte: Autoria própria.

## 4 ESTUDO DE CASO: CALIBRAÇÃO PARA A BACIA AMAZÔNICA

O modelo hidrológico SWAT foi utilizado em um estudo preliminar de calibração do escoamento superficial para toda a Bacia Amazônica, de forma tal que a vazão simulada fosse comparada com valores reais de medição da estação fluviométrica de Óbidos. A escolha da estação de Óbidos como fonte de dados para calibração do modelo se justifica por esta ser a estação mais a jusante do rio Amazonas (que drena quase a totalidade da área da Bacia Amazônica através dos seus tributários), e, desta forma, registra os valores acumulados de vazão da bacia o mais próximo possível do exutório da mesma.

### 4.1 Área de estudo

O modelo hidrológico foi aplicado na bacia do rio Amazonas (Figura 2), localizada na América do Sul, com área de aproximadamente 6.110.000 km<sup>2</sup>; ocupando territórios do Brasil, Peru, Equador, Bolívia, Colômbia, Venezuela e Guiana. O rio Amazonas apresenta uma vazão média de 209.000 m<sup>3</sup>/s, com as cabeceiras do rio estando a cerca de 6.500 km da foz, no Oceano Atlântico (MOLINIER *et al.*, 1993 *apud* RIBEIRO, BRESSIANI e FILHO, 2015).

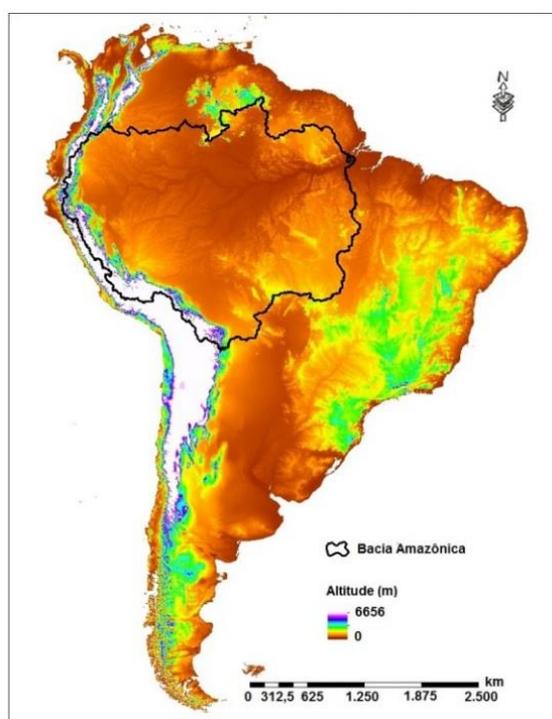


Figura 2 – Localização da Bacia Amazônica no continente Sul Americano.

Fonte: Ribeiro, Bressiani e Filho (2015).

## **4.2 Modelo digital de elevação**

O modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo foi obtido a partir da base de dados mundial HydroSHEDS – USGS, com resolução de aproximadamente 1 km. A Figura 3 mostra o MDE para a América do Sul, com destaque em laranja para o contorno da Bacia Amazônica.

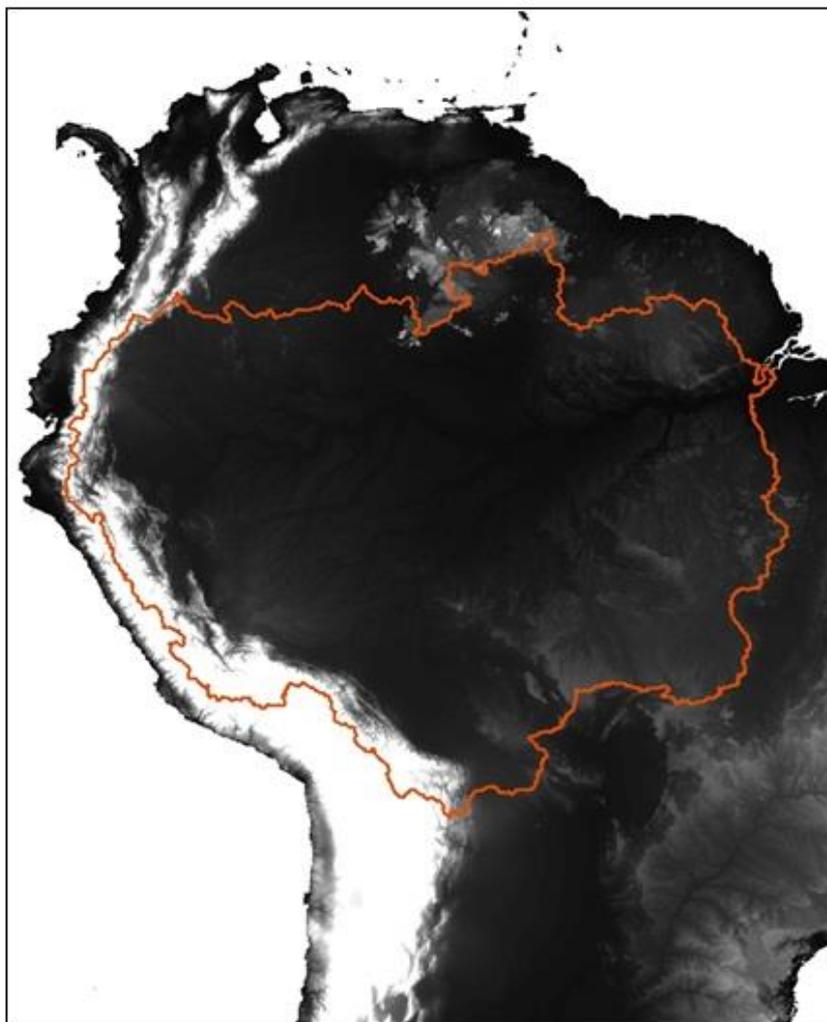


Figura 3 – Modelo digital de elevação para a Bacia Amazônica.

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014).

## **4.3 Mapa de uso e ocupação do solo e de tipos de solo**

O mapa de uso e ocupação do solo foi obtido pelo sensor MODIS - MCD12Q1, com resolução de 1 km (Figura 4). Já o mapa com os tipos de solo foi elaborado a partir de dados obtidos na fundação ISRIC – *World Soil Information*, conforme pode ser visto na Figura 5.

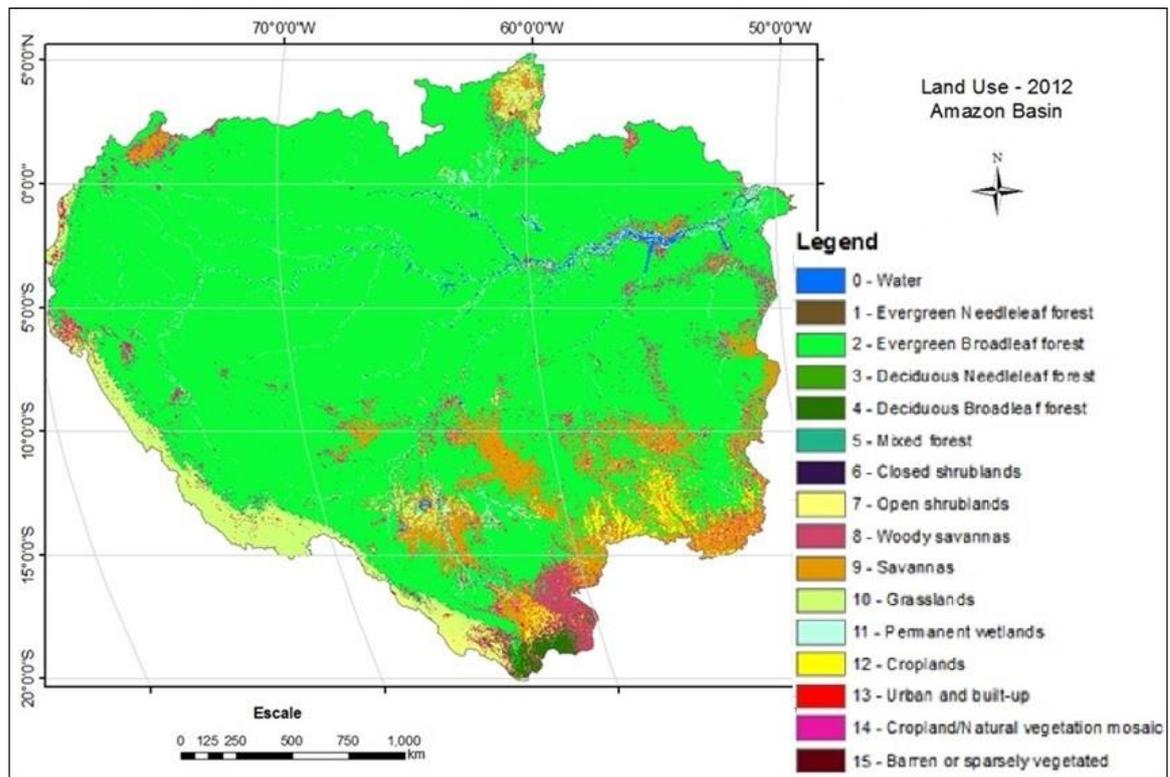


Figura 4 – Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia Amazônica.

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014).

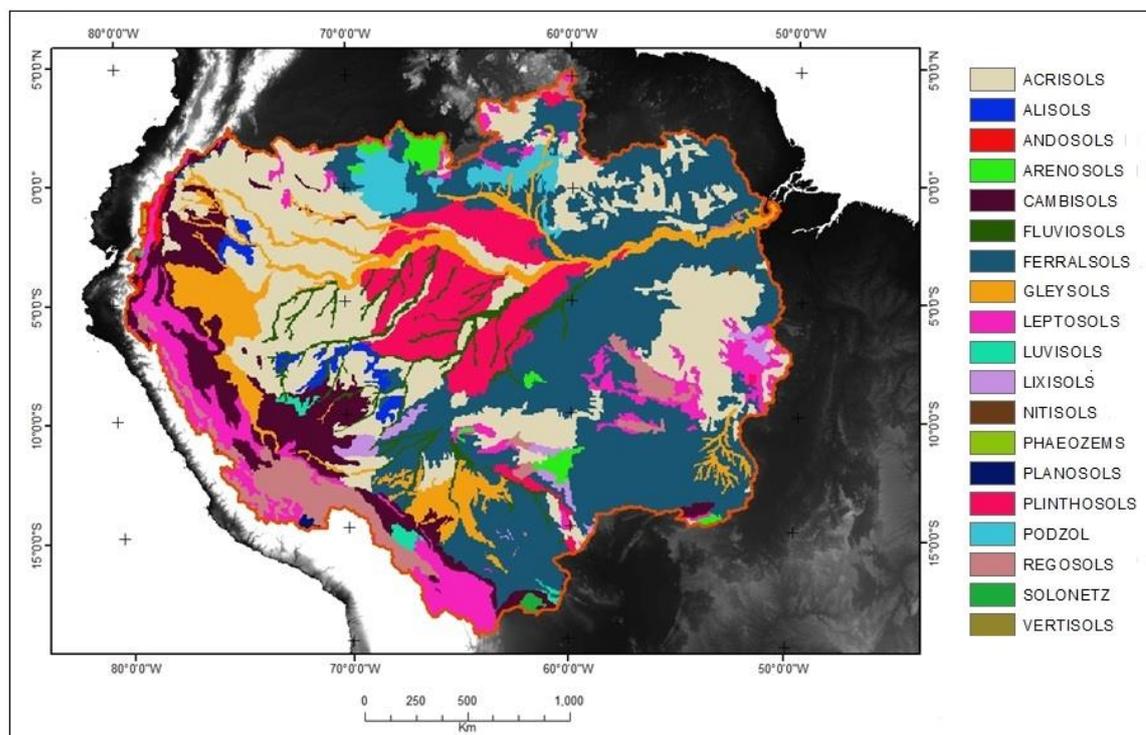


Figura 5 – Mapa de tipos de solo na Bacia Amazônica.

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014).

#### 4.4 Dados meteorológicos e de vazão

Os dados meteorológicos foram obtidos de estações da ANA e do INMET espalhadas na área de estudo, conforme mostra a Figura 6. Um total de 244 estações (ANA e INMET) realizaram o registro histórico da precipitação em frequência diária de janeiro de 1985 a dezembro de 2012. Já as medições, também em base diária, da umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e temperaturas máxima e mínima, foram realizadas por 40 estações do INMET (Figura 7). Nesta mesma figura também é possível ver a discretização da Bacia Amazônica em 3.221 sub-bacias.

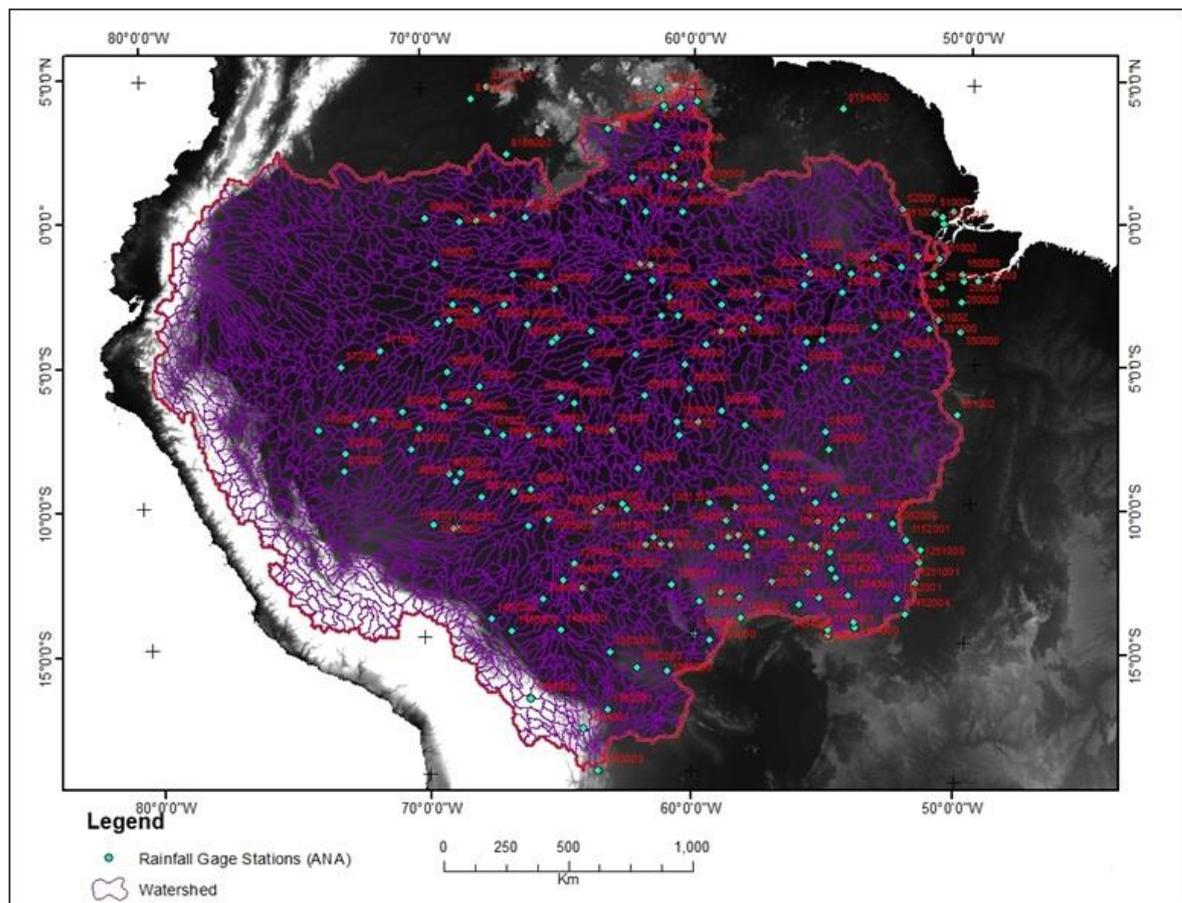


Figura 6 – Disposição espacial das estações da ANA e discretização da Bacia Amazônica em 3.221 sub-bacias.

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014).

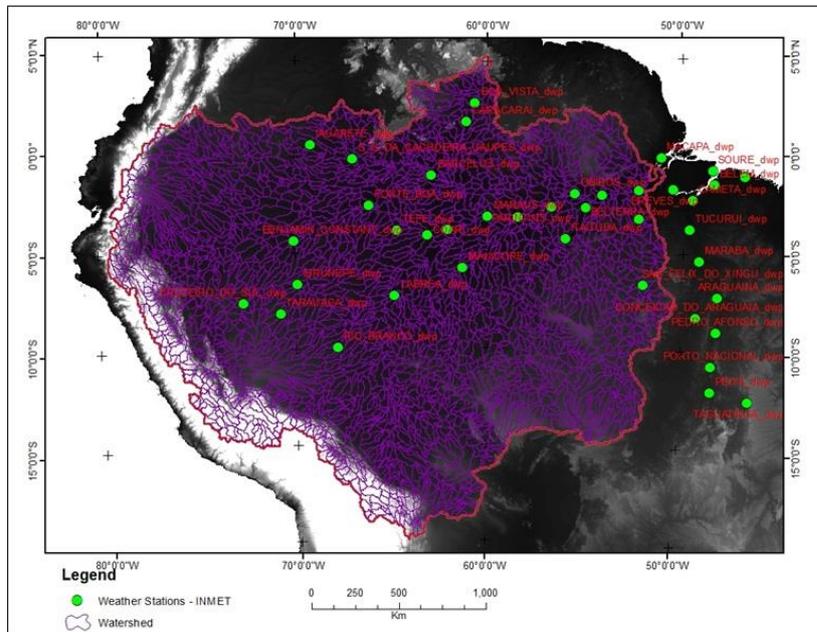


Figura 7 – Disposição espacial das estações do INMET.

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014).

Os dados de vazão foram obtidos da estação fluviométrica de Óbidos (Figura 8), operada pela ANA, com frequência mensal, para o período de janeiro de 1985 até dezembro de 2012. Esta estação foi escolhida por ser a que está o mais próximo do exutório da Bacia Amazônica.

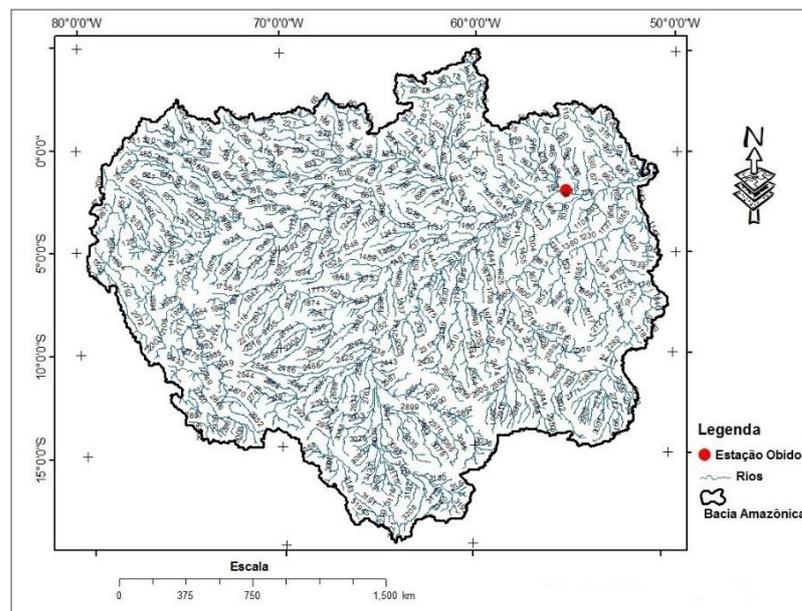


Figura 8 – Localização da estação fluviométrica de Óbidos operada pela ANA.

Fonte: Ribeiro, Bressiani e Filho (2015).

#### 4.5 Processo de calibração

Realizou-se um estudo preliminar de calibração do modelo hidrológico SWAT para a Bacia Amazônica, utilizando o módulo SWAT-CUP. Ao todo, foram utilizados três PC's da Faculdade de Engenharia da UFJF, com diferentes capacidades de processamento, o *hardware* deles é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Hardware dos PC's utilizados na calibração do modelo.

PC	Processador	N.P. <sup>1</sup>	Memória RAM	HD
1	Core 2 Duo 2.7 GHz	2	4 GB	500 GB
2	Xeon 3.1 GHz	4	8 GB	500 GB
3	Core i7 – 3.6 GHz	4	32 GB	2 TB

Fonte: Autoria própria.

Para a execução do modelo foram utilizados os programas ArcGIS 10.2 (SIG comercializado pela Esri) com a extensão ArcSWAT 2012.10\_2.15 (disponível gratuitamente na internet pelo desenvolvedor), e para a identificação dos parâmetros mais sensíveis foi utilizado o SWAT-CUP 5.1.6.2 (também disponível gratuitamente na internet pelo desenvolvedor).

Como haviam dados meteorológicos e de vazões de estações fluviométricas para os anos de 1985 a 2012, o período de 1985 a 1999 foi escolhido para a calibração, utilizando-se um período de aquecimento de 2 anos, sendo que o intervalo de aquecimento consistiu dos dois primeiros anos do período selecionado para a calibração, ou seja, de janeiro de 1985 até dezembro de 1986. Já o período de 2000 a 2012 foi reservado para a posterior validação do modelo.

Como relatam Mello *et al.* (2008), no início da simulação ocorrem grandes incertezas devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente a umidade do solo, justificando a utilização de um período de aquecimento do modelo, para que ao se iniciar a simulação, as variáveis de estado estejam livres da influência das condições iniciais.

---

1 Núcleos de processamento: basicamente, permitem trabalhar em um ambiente multitarefa.

Na preparação do SWAT para a modelagem da Bacia Amazônica, os dados de entrada do modelo foram carregados através da interface ArcSWAT, com toda a base de dados preparada anteriormente (Figura 9). Esta interface funciona como uma extensão do software ArcGIS, permitindo a alimentação do modelo de forma muito mais intuitiva e simplificada. Na configuração do SWAT, optou-se por uma frequência mensal para os dados de saída do modelo, ou seja, o escoamento superficial simulado para a bacia.

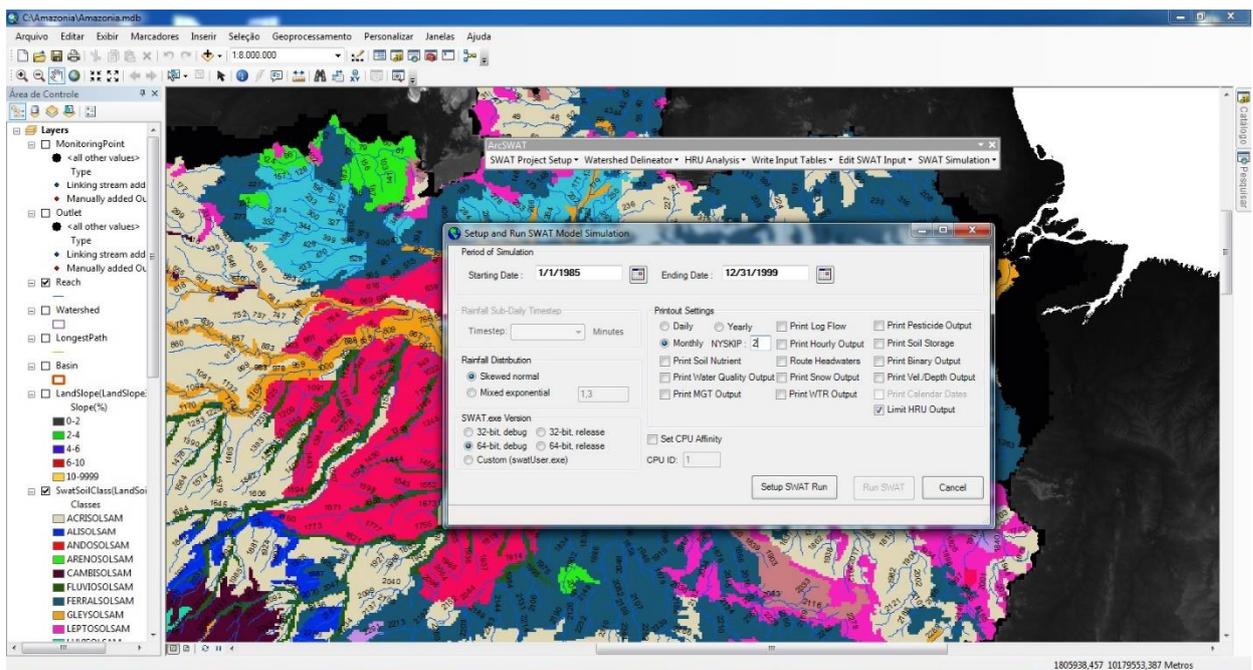


Figura 9 – Interface do ArcSWAT no ArcGIS.

Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que não foram realizados ajustes nos parâmetros do modelo neste passo, e assim o SWAT foi executado com êxito nos 3 PC's disponíveis, com um tempo médio de execução de 8 horas. Com os dados de saída desta primeira simulação, foi possível dar início ao segundo passo da tentativa de calibração da Bacia Amazônica, que consistia na identificação dos parâmetros mais sensíveis. Para tal, utilizou-se o software SWAT-CUP, que recebe como dados de entrada, os dados de saída simulados pelo SWAT.

Então o SWAT-CUP foi configurado para realizar diversas simulações, sendo que em cada uma delas eram sorteados valores (dentro da faixa de variação de cada parâmetro) para todos os parâmetros do modelo, de maneira a se identificar aqueles que tinham uma maior influência sobre o escoamento superficial.

Os parâmetros inicialmente escolhidos para calibração com o SWAT-CUP foram: CN2 (curva número na condição de umidade média do solo), ALPHA\_BF (constante de recessão do escoamento de base), GW\_DELAY (intervalo de tempo para a recarga do aquífero) e GWQMN (nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base), conforme mostra a Figura 10. A justificativa para a escolha destes quatro parâmetros está no fato, destes mesmos, serem as variáveis que mais interferem no escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, ou seja, são os parâmetros que tem o maior impacto sobre a variável (vazão) que está sendo modelada. A relação destes parâmetros com a vazão também pode ser observada em trabalhos como os de Duraes (2010), Lelis *et al.* (2012), Conceição *et al.* (2012) etc.

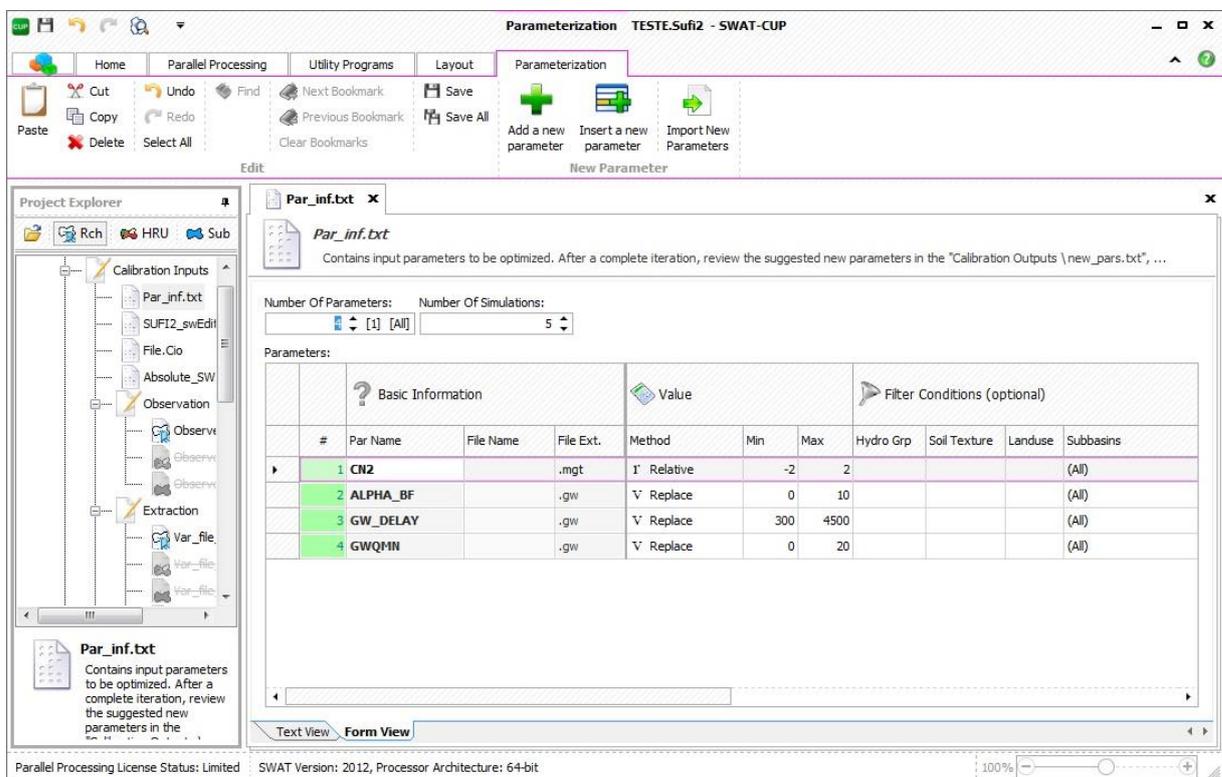


Figura 10 – Tela do SWAT-CUP com os parâmetros iniciais a serem calibrados.

Fonte: Autoria própria.

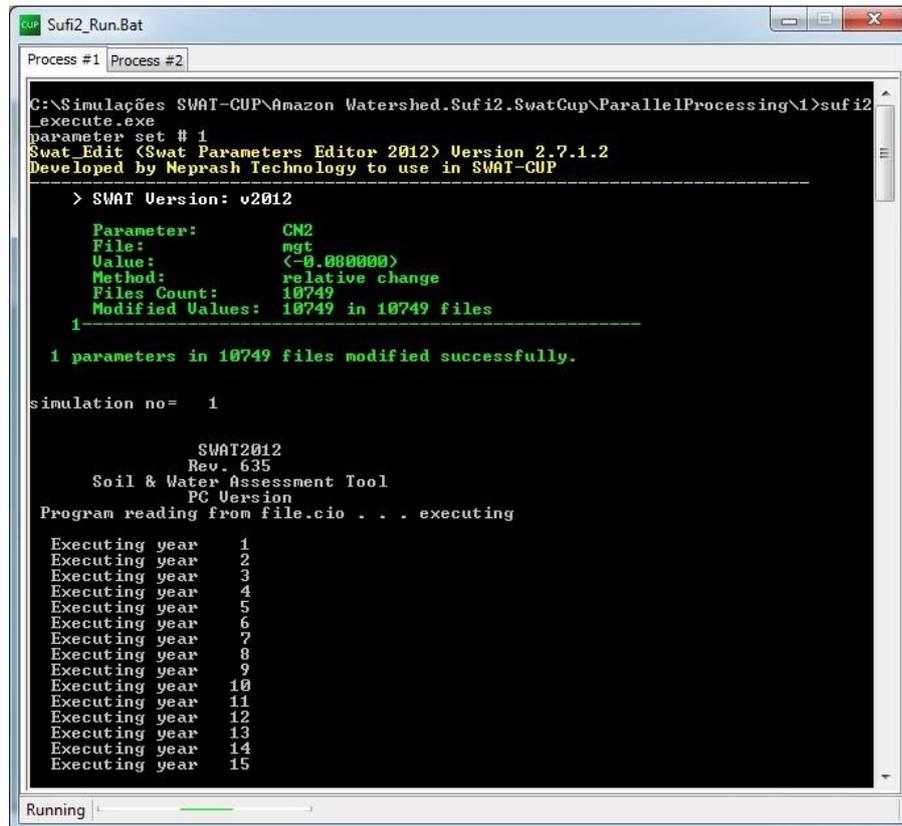


Figura 11 – Tela do SWAT-CUP executando a análise de sensibilidade.

Fonte: Autoria própria.

Mas devido ao enorme volume de dados a serem processados (em torno de 22 GB de dados, gerados como *output* da primeira etapa de simulação no SWAT, com a discretização da Bacia Amazônica em 3.221 sub-bacias e 10.749 HRU's), a execução desta etapa no SWAT-CUP (Figura 11), não foi finalizada em nenhum dos PC's utilizados. Na Tabela 3, a seguir, é apresentado o número de dias que cada PC permaneceu executando a aplicação, até causar o travamento do sistema operacional ou ser interrompida pelo usuário.

Tabela 3 – Tempo de execução da aplicação SWAT-CUP em cada PC.

PC	Nº de dias executando	Motivo da interrupção
1	5 dias	Travamento OS
2	9 dias	Abortado
3	14 dias	Abortado

Fonte: Autoria própria

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido ao grande volume de dados e da grande quantidade de parâmetros a serem processados pelo modelo, para a Bacia Amazônica, estas tentativas se mostraram inviáveis em computadores domésticos, até mesmo naqueles com alto desempenho.

Este obstáculo na execução do SWAT-CUP impossibilitou a determinação dos parâmetros mais sensíveis do modelo, e com isso inviabilizou a continuidade da calibração do modelo.

### 5.1 Calibração do SWAT em grandes bacias

Diante da dificuldade encontrada na fase de identificação dos parâmetros mais sensíveis do modelo, houve a busca por outros trabalhos que também tenham tentado fazer a calibração em bacias de grande escala. Desta pesquisa, destaca-se o trabalho de Bressiani *et al.* (2015) que realizou uma extensa revisão em mais de cem trabalhos que utilizaram o SWAT na calibração de algum parâmetro em bacias hidrográficas no Brasil. De toda essa revisão, a maior bacia já calibrada no país foi a do rio Cuiabá, no Mato Grosso, com área de 29.000 km<sup>2</sup>, realizada no trabalho de Baldissera (2005). Já na revisão de trabalhos realizados em todo o mundo, Gassman, Sadeghi e Srinivasan (2014) classificaram a bacia do rio Danúbio, no leste europeu, como a maior bacia já calibrada com o SWAT, no trabalho de Pagliero *et al.* (2014), com uma área de 803.000 km<sup>2</sup>.

Baldissera (2005) realizou a calibração para a bacia do rio Cuiabá alterando parâmetros do modelo manualmente, até atingir um melhor ajuste da vazão simulada a série de dados medidos pela estação fluviométrica. Já Pagliero *et al.* (2014) utilizou uma série de recursos matemáticos e estatísticos que permitiram, subdividir a área de estudo em regiões e realizar calibrações para estas regiões, extrapolando o resultado para as áreas vizinhas.

Mesmo diante da possibilidade de calibração através de um método alternativo a análise de parâmetros sensíveis através do SWAT-CUP, como já foi realizado em outros trabalhos em bacias de grande escala, ainda assim é bastante significativa a diferença de tamanho em área da Bacia Amazônica, com aproximadamente 6.110.000 km<sup>2</sup>, para qualquer outra bacia hidrográfica já calibrada com o SWAT.

## 6 CONCLUSÕES

Devido à diversidade climática, de biomas e também da disponibilidade hídrica encontrada ao longo do Brasil, faz-se necessário uma gestão adequada dos recursos hídricos no país, e para se atingir tal objetivo, ferramentas como o SWAT, tem grande potencial de auxiliar na tomada de decisões referentes a gestão eficiente de recursos hídricos.

Uma grande variedade de análises tem sido desenvolvida nos trabalhos utilizando o SWAT no Brasil, mas devido à falta de dados que permitam alimentar o modelo adequadamente, a grande maioria dos estudos tem se restringido a avaliar a capacidade do modelo em representar adequadamente as bacias hidrográficas brasileiras (BRESSIANI *et al.*, 2015).

No caso da calibração preliminar de vazões com o SWAT para a Bacia Amazônica, verificou-se uma grande dificuldade de processamento com modelos de otimização (no caso deste trabalho, o SWAT-CUP), proveniente do enorme volume de dados a serem processados em bacias de grande escala, se fazendo necessário um estudo mais aprofundado das possíveis alternativas para se conseguir avançar com o entendimento da calibração hidrológica nesta importante bacia.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Foram identificadas algumas alternativas que possivelmente poderiam contornar o obstáculo encontrado na fase de utilização do SWAT-CUP. Elas foram divididas em recomendações técnicas e de infraestrutura.

### **7.1 Técnicas**

- Realizar o processamento em paralelo do SWAT-CUP através de computadores com múltiplos núcleos de processamento, e com isso aumentar o poder de processamento e a velocidade de execução dos passos de calibração;
- Seguir a análise da Bacia Amazônica em suas cinco sub-bacias, realizando uma calibração para cada uma delas;
- Discretizar menos a bacia, no intuito de gerar também menos URH's e reduzir o volume de dados a serem processados;
- Calibrar o modelo manualmente sem a utilização de um programa de otimização (tentativa e erro);

### **7.2 De infraestrutura**

- Criação de um laboratório computacional para apoio ao desenvolvimento de modelos matemáticos aplicados à engenharia, especialmente à Engenharia Ambiental e Sanitária.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESCOW, S. *Simulação hidrológica em bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, Vol. 17, No. 1, p. 69-76, 2013. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v17n01/v17n01a10.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2015.
- ArcGIS 10.2 for Windows 7: Environmental Systems Research Institute, 2013. 1 DVD-ROM.
- ArcSWAT 2012.10\_2.15 for Windows 7: University of Texas, 2012. 1 CD-ROM.
- BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2005. Disponível em: <[http://pgfa.ufmt.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=62](http://pgfa.ufmt.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=62)>. Acesso em: 25 mar. 2015.
- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. *Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR)*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Vol. 34, p. 253-261, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n1/a26v34n1>>. Acesso em: 17 fev. 2015.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, 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, Beijing, Vol. 8, No. 3, 2015. Disponível em: <<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/download/1765/pdf>>. Acesso em: 11 set. 2015.
- CONCEICAO, G.; KOBIYAMA, M.; FILHO, B. F.; MIRANDA, C. R.; MULLINARI, M. *Simulação de vazão e sedimento em bacia hidrográfica rural com alta concentração de suínos e diferentes usos do solo*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10., 2012, Paraná. *Anais...* Paraná, 2012. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78387/1/MIRANDA-ENES114.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2016.
- CRUZ, S. I. V. L. *Monitoramento e modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Siriri Vivo – SE*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2012. Disponível em: <[https://bdtd.ufs.br/bitstream/tede/1329/1/SANDRO\\_IURY\\_VALVERDE\\_LIMA\\_CRUZ.pdf](https://bdtd.ufs.br/bitstream/tede/1329/1/SANDRO_IURY_VALVERDE_LIMA_CRUZ.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2015.

DURAES, M. F. *Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/853M.PDF>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. *Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas*. Journal of Hydrology, 2008. Disponível em: <<http://www.hydrology.bee.cornell.edu/Papers/EastonJHYDROL08.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2016.

FARIAS, M. G.; PEREIRA, A. P. E.; BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a simulação da vazão líquida na bacia hidrográfica do rio Braço do Norte – Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais...* Bento Gonçalves, 2013. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/storage/24/4096947/1454328265/Zorl-ZINQVGoAREZL-kYxQ/4096947.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2015.

FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H.; KOIDE, S. Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais...* Bento Gonçalves, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Henrique\\_Roig2/publication/260422891\\_AVALIACA\\_O\\_DA\\_UTILIZACAO\\_DE\\_DIFERENTES\\_METODOS\\_NA\\_CALIBRACAO\\_AUTOMATICA\\_DO\\_MODELO\\_SWAT/links/0deec5312a0191e535000000.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&orig=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Henrique_Roig2/publication/260422891_AVALIACA_O_DA_UTILIZACAO_DE_DIFERENTES_METODOS_NA_CALIBRACAO_AUTOMATICA_DO_MODELO_SWAT/links/0deec5312a0191e535000000.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&orig=publication_detail)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. *Applications of the SWAT model special section: overview and insights*. Journal of Environmental Quality, 2014. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/pdfs/43/1/1>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modeling: a Scandinavian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON: CAN SCIENCE AND SOCIETY SAVE THE WATER CRISIS IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY: REPORTS FROM THE WORLD, 1., 2000, Tokyo. *Proceedings...* Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, p. 38-45. 2000. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626660109492889>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. *Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds*. Environmental Modelling & Software, Vol. 23, p. 422-434. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815207001168/pdf?md5=caec5e7d2eb97c4d1a50c78aae8bc91d&pid=1-s2.0-S1364815207001168-main.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

JUNIOR, J. L. B. *Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000926942&fd=y>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

KUWAJIMA, J. I. *Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-14062013-112915/publico/DissertacaoJulioIssaoKuwajima.pdf>>. Acesso em: 9 abr. 2015.

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, Vol. 36, No. 2, p. 623-634, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v36n2/a31v36n2.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2015.

LESSA, L. G. F.; ZIMBACK, C. R. L.; LIMA, S. L.; MACHADO, R. E. *Modelo hidrológico SWAT na determinação das perdas de solo na bacia hidrográfica do rio Pardo – Botucatu / SP*. Revista Energia na Agricultura, Vol. 28, No. 3, p. 170-178, 2013. Disponível em: <<http://energia.fca.unesp.br/index.php/energia/article/download/672/845>>. Acesso em: 28 jan. 2015.

LOUZADA, V. M. *Modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Xingú*. Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2015. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/TCC\\_final.pdf](http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/TCC_final.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2015.

MACHADO, W.C. P. *Indicadores de qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do rio Pato Branco - Sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/bitstream/handle/1884/10963/TESE%20WILLIAM.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>. Acesso em: 3 abr. 2015.

MALUTTA, S. *Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/96212/302405.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. *Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin*. Catena Journal, Vol. 75, No. 3, 2008.

MENEZES, M. D. *Levantamento de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga de aquíferos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3584/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_Levantamento%20de%20solos%20em%20sub-bacias%20hidrogr%C3%A1ficas%20como%20apoio%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20uso%20da%20terra%20e%20da%20potencialidade%20da%20recarga%20de%20aq%C3%BC%C3%ADferos.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3584/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Levantamento%20de%20solos%20em%20sub-bacias%20hidrogr%C3%A1ficas%20como%20apoio%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20uso%20da%20terra%20e%20da%20potencialidade%20da%20recarga%20de%20aq%C3%BC%C3%ADferos.pdf)>. Acesso em: 24 mar. 2015.

MERCURI, E. G. F.; DEPPE, F. A. C.; LOHMANN, M.; SIMOES, K. Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, RN. *Anais...* Natal: INPE, p. 4773-4780. 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.20.51/doc/4773-4780.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V.; CHAVES, A. *Hydrologie du bassin de l'Amazonie*. Colloque Grands Bassins Fluviaux, Paris, p. 335-344. 1993.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY J.R.; WILLIAMS, J.R. *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation*, version 2005. Agricultural Research Service and Texas AgriLife Research. Texas, 2005. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

NETO, J. O. M. *Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/803/1/DISSERTACAO\\_An%C3%A1lise%20de%20sensibilidade%20escalar%20do%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20SWAT....pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/803/1/DISSERTACAO_An%C3%A1lise%20de%20sensibilidade%20escalar%20do%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20SWAT....pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2015.

PACHECO, M. G. *Aplicação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu (SC, Brasil)*. Monografia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, SC, 2011. Disponível em: <<http://siaibib01.univali.br/pdf/Marina%20Garcia%20Pacheco.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. *Large-scale hydrological simulations using the soil water assessment tool, protocol development and application in the Danube Basin*. Journal of Environmental Quality, 2014. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/pdfs/43/1/145>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

PAIM, J. B.; MENEZES, J. T. *Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo SWAT*. Revista Geografia Acadêmica, Vol. 3, No. 2, p. 5-14, 2009. Disponível em: <<http://rga.ggf.br/index.php?journal=rga&page=article&op=viewFile&path%5B%5D=74&path%5B%5D=7>>. Acesso em: 7 fev. 2015.

PEREIRA, D. R. *Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

Disponível em:

<<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1010743/1/TeseDonizetedosReisPereira.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

PINTO, D. B. F. *Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011. Disponível em:

<[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3150/1/TESE\\_%20Aplica%C3%A7%C3%A3o%20do%20modelo%20SWAT%20%28Soil%20and%20Water%20Assessment%20Tool%29%20na%20simula%C3%A7%C3%A3o%20hidrossedimentol%C3%B3gica%20em%20bacia%20hidrogr%C3%A1fica%20da%20Serra%20da%20Mantiqueira%2c%20MG.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3150/1/TESE_%20Aplica%C3%A7%C3%A3o%20do%20modelo%20SWAT%20%28Soil%20and%20Water%20Assessment%20Tool%29%20na%20simula%C3%A7%C3%A3o%20hidrossedimentol%C3%B3gica%20em%20bacia%20hidrogr%C3%A1fica%20da%20Serra%20da%20Mantiqueira%2c%20MG.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2015.

RIBEIRO, C. B. M.; BRESSIANI, D. A.; FILHO, O. C. R. Modelagem hidrológica de vazões na Bacia Amazônica utilizando o modelo SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. *Anais...* Brasília, 2015. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/profile/Danielle\\_Bressiani/publication/285538281\\_MODELAGEM\\_HIDROLOGICA\\_DE\\_VAZOES\\_NA\\_BACIA\\_AMAZONICA\\_UTILIZANDO\\_O\\_MODELO\\_SWAT\\_STREAMFLOW\\_MODELING\\_IN\\_THE\\_AMAZON\\_BASIN\\_USING\\_SWAT/links/565ee9e408aefe619b274837.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Danielle_Bressiani/publication/285538281_MODELAGEM_HIDROLOGICA_DE_VAZOES_NA_BACIA_AMAZONICA_UTILIZANDO_O_MODELO_SWAT_STREAMFLOW_MODELING_IN_THE_AMAZON_BASIN_USING_SWAT/links/565ee9e408aefe619b274837.pdf)>. Acesso em: 2 dez. 2015.

RIBEIRO, C. B. M.; MOHANTY, B. P.; BRESSIANI, D. A.; FERNANDES, J. G.; FILHO, O. C. R. Parameterization of physical and climatic characteristics in the Amazon basin for hydrological simulation with SWAT model. In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE, 11., 2014, Pernambuco. *Anais...* Pernambuco, 2014. Disponível em:

<<http://swat.tamu.edu/media/99107/a1-2-ribeiro.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

SALLES, L. A. *Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

Disponível em:

<[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012\\_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2014.

SERGIPE. Superintendência de Recursos Hídricos. *Atlas Digital sobre os Recursos Hídricos de Sergipe*, Aracaju: SEPLANTEC-SRH, 2004. 1 CD-Rom.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. *Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, Vol. 12, No. 3, p. 258-265, 2008.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n3/v12n03a06.pdf>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. *Estimativa da variabilidade especial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT*. Revista RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise, Vol. 28, p. 134-153, 2013. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/raega/article/view/32304>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

SOUZA, V. A. S. *Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc\\_download/2598-vinicius-alexandre-sikora-de-souza?Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc_download/2598-vinicius-alexandre-sikora-de-souza?Itemid=)>. Acesso em: 3 mar. 2015.

SWAT-CUP 5.1.6.2 for Windows 7: Neprash Technology, 2013. 1 CD-ROM.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. *Gestão da Água no Brasil*. 1ª. Ed. Brasília: UNESCO, 2001.

VEIGA, A. M. *Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia – GO*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/3497/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Aldrei%20Marucci%20Veiga%20-%202014.pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2015.