

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS - IRN

MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS -

MEMARH

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS NO USO E MANEJO

DO SOLO SOBRE AS VAZÕES DA BACIA DO RIBEIRÃO JOSÉ

PEREIRA, UTILIZANDO O MODELO SWAT.

FILIFE OTÁVIO PASSOS

PROF. DR. FERNANDO DAS GRAÇAS BRAGA DA SILVA

Orientador

PROF. DR. BENEDITO CLÁUDIO DA SILVA

Co-orientador

ITAJUBÁ 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS - IRN

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS NO USO E MANEJO

DO SOLO SOBRE AS VAZÕES DA BACIA DO RIBEIRÃO JOSÉ

PEREIRA, UTILIZANDO O MODELO SWAT.

MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS -

MEMARH

FILIPPE OTÁVIO PASSOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, sob orientação do Professor Dr. Fernando das Graças Braga da Silva.

ITAJUBÁ 2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

Título da Dissertação: "Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo sobre as Vazões da Bacia do Ribeirão José Pereira, utilizando o Modelo SWAT"

Autor: **Filipe Otávio Passos**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
 - (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
 - (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 27 de Março de 2017

Prof. Dra. Nívea Adriana Dias Pons
2ª Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva
3º Examinador (Coorientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e paz, por ter me guiado nos momentos de escuridão e por ter me livrado de todo mal.

A meus pais Lúcio Otávio Passos e Eliane Aparecida da Silva Passos que sempre foram a base para que eu pudesse continuar em meus estudos e também fonte de carinho e amor nos momentos de dificuldades.

A minha esposa Vânia de Azevedo Passos que sempre me apoiou e acreditou em mim, mesmo quando eu já não acreditava.

Ao meu orientador Fernando das Graças Braga da Silva pela oportunidade de trabalho e aprendizado e não menos importante ao meu coorientador Benedito Cláudio da Silva por todo ensinamento e apoio dado nos momentos de dúvidas e por todo o suporte nos momentos de dificuldade e de crise.

Ao Programa MEMARH, Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela oportunidade. Aos amigos do MEMARH, que contribuíram de forma muito importante em alguns os momentos dessa jornada.

A CAPES pela disponibilização de bolsas de estudo no projeto que permitiram a dedicação exclusiva a titulação.

A Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), por todo suporte técnico e científico, obtido através de um dos projetos financiados pela agência, a saber, Rede de pesquisa em monitoramento e modelagem de processos hidrossedimentológicos em bacias representativas rurais e urbana do bioma mata Atlântica (RHIMA).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO AO TEMA	4
3.1.1 Ciclo hidrológico	4
3.1.2 Bacias hidrográficas	5
3.1.3 Solos	6
3.1.4 Sedimentos	9
3.1.5 Perda de solo	10
3.1.6 Uso e ocupação do solo	11
3.2 ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APPs)	13
3.3 APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS NA CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	18
3.4 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	24
3.5 CALIBRAÇÃO	29
4 METODOLOGIA	33
4.1 DESCRIÇÃO GERAL	33
4.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
4.2.1 Localização da seção de controle	35
4.3 CLIMA E PRECIPITAÇÃO	36
4.4 HIPSOMETRIA	37
4.5 MAPA DE SOLOS	38
4.6 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	39
4.7 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)	40
4.8 DADOS DE CLIMA E HIDROLOGIA	40
4.9 CURVA-CHAVE DO POSTO FLUVIOMÉTRICO	43
4.10 SOFTWARES UTILIZADOS	43
4.11 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	44
4.12 CENÁRIOS	46
5 RESULTADOS	48
5.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA	48
5.2 DETERMINAÇÃO DO MAPA DE DECLIVIDADES DA BACIA	48

5.3 ADEQUAÇÃO DO BANCO DE DADOS DE SOLO DO SWAT	49
5.4 ASSOCIAÇÃO DO USO DO SOLO NO MODELO SWAT	53
5.5 DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICAS (HRUs)	55
5.6 DADOS CLIMÁTICOS	58
5.7 DETERMINAÇÃO DA CURVA CHAVE DO POSTO UNIFEI	61
5.8 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A BACIA DO RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA	63
5.9 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	69
5.9.1 Cenário 2: manejo da pastagem.....	69
5.9.2 Cenário 3: área ocupada por floresta	72
5.9.3 Cenário 4: área de preservação permanente	76
5.9.4 Cenário 5: crescimento urbano.....	81
5.9.6 Comparação dos 5 cenários.....	86
6 CONCLUSÕES	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Tipos de solos encontrados no Brasil, características principais e porcentagem da área de ocorrência no território brasileiro (EMBRAPA, 2006).	7
Tabela 2: Classificação dos sedimentos segundo a granulometria (TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2003).	9
Tabela 3 Classificação do grau de erosão hídrica, (ALMOROX, 1994 <i>apud</i> PEREIRA, 2010).10	
Tabela 4 Evolução da taxa de urbanização do Brasil, (IBGE, 2010).....	12
Tabela 5 Faixas de declividade do relevo e classificação, (EMBRAPA, 1979).	17
Tabela 6 Parâmetros calibráveis modelo SWAT para a vazão (WINCHELL, 2013).	30
Tabela 7 Ranque de sensibilidade dos parâmetros relacionados à variável vazão (PEREIRA, 2010).	31
Tabela 8 Componentes de calibração e descrição dos parâmetros (BONUMÁ, 2013).	31
Tabela 9 Parâmetros climáticos de entrada no modelo e respectivas unidades.	42
Tabela 10: Características Físicas do Solo. Fonte: Uzeika, 2009.	50
Tabela 11: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.	50
Tabela 12: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.	51
Tabela 13: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.	51
Tabela 14 Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.	51
Tabela 15 Usos encontrados na bacia em estudo.	55
Tabela 16 Unidades de resposta hidrológica	56
Tabela 17 Parâmetros calculados para a estação de Itajubá (PEDROSA, 2015).	61
Tabela 18 Valores iniciais e alterados de parâmetros calibráveis.	63
Tabela 19 Valores dos indicadores na calibração final.	64
Tabela 20: Valores de CN2 substituídos no calibrador manual para o cenário 1.	66
Tabela 21: Valores de CN2 substituídos no calibrador manual para o cenário 2.	70
Tabela 22 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 3.....	73
Tabela 23 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 4.....	78
Tabela 24 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 4.....	83
Tabela 25 Comparação das vazões extremas e desvios para os 5 cenários.	86
Tabela 26 Parcelas do fluxos hidrológicos pra cada cenário.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes do Ciclo Hidrológico (MMA, 2017).	4
Figura 2 Hidrograma hipotético, (TUCCI, 1995).	5
Figura 3 Modelo de uma bacia hidrográfica e seus principais componentes, (NOWATZKI, 2011).	6
Figura 4 Evolução da urbanização no Brasil, (IBGE, 2016).	12
Figura 5: Esquema da delimitação das APPs de topo de morro, (CARVALHO, 2013).	17
Figura 6: Fluxograma da metodologia utilizada.	33
Figura 7 Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira (LIMA, 2012).	34
Figura 8 Detalhes da seção transversal.	35
Figura 9 Perfil topográfico do Ribeirão José Pereira.	36
Figura 10 Precipitações médias mensais de Itajubá registradas no período de 2000 a 2013 (SINDA, 2015).	37
Figura 11 Mapa hipsométrico da bacia do Ribeirão José Pereira, (FLAUZINO, 2012).	38
Figura 12 Mapa de solos da bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira (LIMA, 2012).	39
Figura 13 Mapeamento do uso e ocupação na bacia do ribeirão José Pereira, (FLAUZINO, 2012).	40
Figura 14 Informações da Estação pluviométrica de Maria da Fé.	41
Figura 15 Localização das estações utilizadas para os dados climáticos.	42
Figura 16 Sensor de nível d'água (AGSOLVE, 2016).	45
Figura 17 DGPS (SURVEY SERVICES, 2016)	45
Figura 18 Estação meteorológica do CEPremG.	46
Figura 19 Bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira no posto fluviométrico UNIFEI.	48
Figura 20 Banco de dados de declividades da bacia do Ribeirão José Pereira	49
Figura 21 Solos da bacia do ribeirão José Pereira após inserção no SWAT.	52
Figura 22 Revisão dos solos encontrados na bacia do ribeirão José Pereira.	53
Figura 23 Uso do solo na bacia do ribeirão José Pereira após inserção no SWAT.	54
Figura 24 Revisão do uso do solo da bacia do ribeirão José Pereira.	54
Figura 25 Definições sugeridas pelo SWAT para as HRUs.	56
Figura 26 Unidades de resposta hidrológicas (HRUs).	57
Figura 27 Série de dados de temperaturas máximas e mínimas de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).	58
Figura 28 Série de dados diários de umidade relativa do ar de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).	59
Figura 29 Série de dados diários da velocidade do vento de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).	59
Figura 30 Série de dados diários de precipitação de 2010 à 2016, (HIDROWEB, 2016).	60

Figura 31 Série de dados diários de radiação solar de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).	60
Figura 32 Batimetria realizada na seção de controle.....	62
Figura 33: Curva chave da seção de controle.	62
Figura 34 Gráfico da calibração realizada.	64
Figura 35 Curva de permanência de vazões observadas e simuladas.	65
Figura 36 Correlação entre as vazões simuladas e calculadas.	65
Figura 37: Pastagem degradada. Fonte: Flauzino, 2012.....	66
Figura 38 Vazões observadas e simuladas no cenário atual.	67
Figura 39 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 1, valores em mm.	68
Figura 40 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário Atual.	69
Figura 41 Vazões simuladas para o cenário Atual e Cenário de manejo agrícola.	70
Figura 42 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 2, valores em mm.	71
Figura 43 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 2.....	72
Figura 44 Nova entrada do mapa de uso do solo, 100% Floresta.	73
Figura 45 Vazões simuladas para o cenário Atual observadas e cenário de reflorestamento.	74
Figura 46 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 3, valores em mm.	75
Figura 47 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 3.....	76
Figura 48 Buffer gerado das APPs de margens de rios.	77
Figura 49 Nova entrada do mapa de uso do solo com as APPs.....	77
Figura 50 Vazões simulados no cenário Atual e cenário das APPs.	79
Figura 51 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 4, valores em mm.	80
Figura 52 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 4.....	81
Figura 53 Crescimento da urbanização idealizado para o cenário 5.	82
Figura 54 novo mapa de uso do solo para crescimento urbano, cenário 5.	82
Figura 55 Vazões do cenário Atual e simuladas no cenário de crescimento urbano.	84
Figura 56 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 5, valores em mm.	85
Figura 57 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 5.....	86
Figura 58 Comparação dos hidrogramas mensais para os cinco cenários.....	89
Figura 59 Curvas de Permanência para cada cenário.....	91

RESUMO

Em bacias hidrográficas existem diversos processos naturais que ocorrem, podendo causar mudanças nos fluxos hidrológicos e por consequência nos fluxos de sedimentos. Nesse sentido, a perda de solo pode ser potencializada por ações antrópicas que mudem as características físicas da bacia, principalmente, aquelas relacionadas ao tipo de solo e ao uso do solo. Neste trabalho foi feita uma calibração de um modelo de transformação chuva x vazão e posterior simulação hidrossedimentológica, para a estimativa das vazões e dos valores de perda de solo por erosão hídrica, para a bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, em Itajubá, sul de Minas Gerais, utilizando o modelo distribuído *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. Foram gerados cinco cenários de uso e ocupação do solo, que foram idealizados a partir de características observadas na bacia. Cenário atual, onde a pastagem se encontra degradada, cenário de manejo agrícola, cenário de reflorestamento, cenário das áreas de preservação permanente (APPs) de margens de rios e finalmente cenários do crescimento da urbanização. Os resultados indicam que o manejo agrícola e o reflorestamento da bacia são mais eficientes na diminuição do escoamento superficial que o cenário das APPs, chegando a uma diminuição de aproximadamente 40% nas vazões máximas simuladas. O cenário de urbanização se mostrou com maiores vazões máximas e consequentemente maiores parcelas de escoamento superficial, como era esperado, efeito associado ao aumento da impermeabilização do solo. O transporte de sedimentos parece acompanhar os efeitos ocorridos nas vazões, ou seja, nas áreas onde ocorrem o manejo agrícola ou o aumento da área vegetada e conseqüente diminuição do escoamento superficial, o valor médio de sedimento simulado diminuiu, ocorrendo o contrário para os cenários das APPs e de crescimento urbano. Com o aumento do escoamento superficial, há um aumento na média anual de sedimento transportado ao longo da bacia. Os valores máximos de sedimentos simulados nos cenários 4 e 5 aumentam significativamente, ou seja, vão de 59,47 Mg/ha no cenário 1, para 150,71 Mg/ha e 150,07 Mg/ha respectivamente, onde se verifica novamente a influência do escoamento superficial nos resultados de sedimentos transportados dentro da bacia.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, chuva x vazão, SWAT, uso e ocupação do solo.

ABSTRACT

In watersheds, there are several naturally occurring processes that can cause changes in hydrological flows and consequently in sediment flows. In this manner, soil loss can be increased by anthropic actions that change the physical characteristics of the basin, especially those related to soil type and soil use. In this research, calibration of a rainfall \times flow transformation model and subsequent hydrosedimentological simulation to estimate the flow rates and soil loss values by water erosion were performed for the José Pereira river watershed in Itajubá, south of Minas Gerais, using the distributed Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Five land use scenarios were generated, which were idealized based on characteristics observed in the basin. The results indicated that agricultural management and basin reforestation were more efficient in reducing surface runoff than the permanent preservation area (PPA) scenario, because this did not have the expected effect on the flows. The urbanization scenario had the highest flow rates and consequently larger plots of surface runoff, as expected. Sediment transport seemed to accompany the effect that occurred in the flows, which was that in the areas where there was agricultural management or where there was an increase in vegetated area and consequent decrease of the surface runoff, the mean the simulated sediment value decreased. The opposite occurred for PPA scenarios and urban growth. With increasing runoff, there is an increase in the annual mean sediment transported along the basin. The maximum sediment values simulated in scenarios 4 and 5 increased significantly, from 59.47 Mg/ha in scenario 1, to 150.71 Mg/ha and 150.07 Mg/ha in scenarios 4 and 5, respectively, which showed the influence of runoff on sediment transported within the basin.

Key words: hydrological modeling, rain \times flow, SWAT, use and occupation of soil.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a ocupação desordenada das cidades, provocam uma preocupante situação de uso e ocupação do solo, principalmente no que diz respeito a alterações que possam causar mudanças nos fluxos hidrológicos e, por consequência, alterações no fluxo sedimentológico, potencializando a perda de solo por erosão hídrica, causando o assoreamento de corpos d'água e, com isso, uma maior incidência de enchentes e inundações.

Com isso, o estudo dos efeitos gerados por tais mudanças, tem se tornado muito importante, e a cada dia surgem, na literatura, novos estudos que tentam, de alguma forma, explicar e representar tal processo, a partir de modelos de transformação chuva x vazão e da simulação hidrológica e hidrossedimentológica.

A modelagem matemática se tornou uma ferramenta importante para os estudos em diversas áreas da hidrologia, pois podem representar, numericamente, um objeto ou sistema, possibilitando estimativas e simulações. Um modelo pode ser a representação simplificada, com menor número de equações e variáveis, o que facilita a solução destas que representam tal fenômeno e a consequente obtenção de resultados. A representação sem simplificações ou com menos simplificações também tem sido utilizada, ocorrendo então, o contrário, maior número de equações e variáveis e dificultando as soluções.

Dentre os modelos utilizados, o modelo SWAT tem se destacado, e tem sido amplamente utilizado em estudos no Brasil e no mundo para simular a vazão, qualidade da água, sedimentos, pesticidas e nutrientes, entre outros. Ele permite a simulação de diferentes cenários de uso e ocupação de uma bacia hidrográfica, servindo então, como ferramenta de decisão de órgãos gestores, para o planejamento da ocupação da área da bacia, para o tipo de manejo agrícola e a cultura a ser aplicada em uma determinada área, medidas preventivas de recuperação do solo, entre outros.

Esse trabalho está inserido no projeto: Rede de pesquisa em monitoramento e modelagem de processos hidrossedimentológicos em bacias representativas rurais e urbana do bioma mata Atlântica (RHIMA), que tem como objetivo investigar os processos de produção de água e sedimentos em bacias experimentais representativas do bioma Mata Atlântica, por meio de monitoramento e modelagem hidrossedimentológica e de qualidade de água, visando a determinação dos efeitos de escala e de uso do solo.

O presente trabalho realiza a calibração do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, através da vazão observada e simulada e posterior

simulação da vazão e da produção e transporte de sedimentos ao longo da bacia sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

A Universidade Federal de Itajubá está inserida na bacia hidrográfica, e gerar resultados que possam de alguma forma melhorar as condições da instituição é de grande importância. Nessa bacia, os usos do solo, floresta e pastagem são os mais recorrentes, com mais de 80% da área, e verifica-se que a pastagem se encontra degradada.

A área da bacia, tem sofrido com frequentes inundações e, um estudo que possa servir de base para acompanhar os efeitos nas vazões, após mudanças que possam ocorrer no uso e ocupação do solo, principalmente o crescimento da urbanização, com loteamentos e moradias, podem ser de grande apoio nas tomadas de decisões do plano diretor que está sendo desenvolvido para a região. A Bacia possui uma boa quantidade de trabalhos realizados o que poderia auxiliar na obtenção de dados de entradas necessários.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica de pequena escala sujeita a alterações de uso e ocupação do solo por atividades agropecuárias e de expansão urbana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os dados fisiográficos necessários como entrada para o modelo SWAT;
- Calibrar um modelo SWAT para a condição atual de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão José Pereira;
- Construir cenários de uso ocupação do solo na bacia e simular os impactos no comportamento hidrológico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO AO TEMA

3.1.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, que tem a energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre como os principais agentes. Parte do ciclo ocorre pela circulação da água na própria superfície terrestre, ou seja, a circulação de água no interior e na superfície dos solos e rochas, nos oceanos e nos seres vivos e o ciclo se completa na atmosfera que possui diversas condições físicas importantes, principalmente, nas camadas conhecidas como troposfera e estratosfera (TUCCI, 1995). A Figura 1 apresenta de maneira esquemática, o ciclo hidrológico com os seus principais componentes retirada do site do Ministério do Meio Ambiente (MMA,2017).

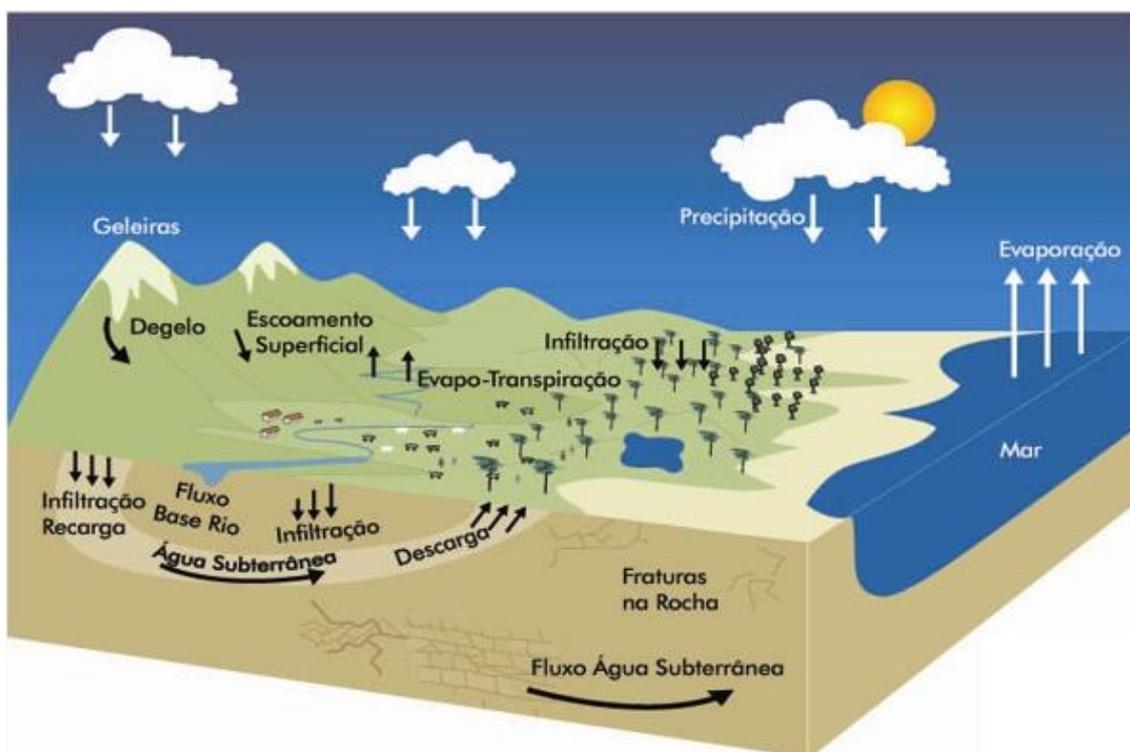


Figura 1: Componentes do Ciclo Hidrológico (MMA, 2017).

Com relação aos componentes do ciclo hidrológico, os que mais influenciam a perda de solo nas bacias hidrográficas são o escoamento superficial e a infiltração. Além disso, dependendo da cobertura vegetal ou do uso do solo naquela bacia, o processo de perda de solo pode ser ainda mais potencializado. Bacias com características mais próximas a naturais, chamadas bacias rurais, tendem a possuir parcelas maiores de

infiltração do que bacias urbanizadas e, por consequência, parcelas menores de escoamento superficial do que as urbanizadas, conforme apresenta a Figura 2.

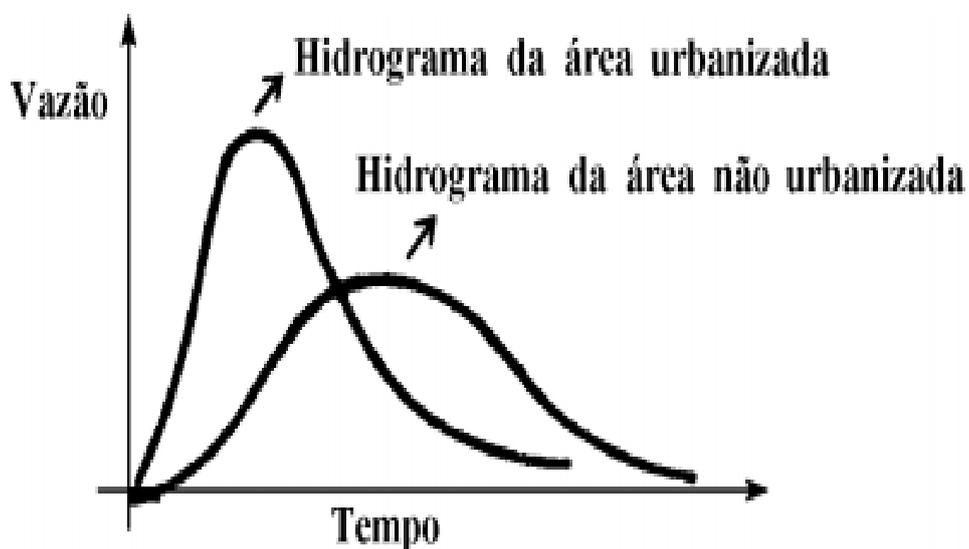


Figura 2 Hidrograma hipotético, (TUCCI, 1995).

3.1.2 Bacias hidrográficas

As bacias hidrográficas, também chamadas de bacia de captação, bacia de drenagem superficial ou bacia de contribuição, podem ser definidas como uma porção de área fechada topograficamente em um ponto do curso d'água, sendo que a água drenada pode ser medida ou descarregada através desse ponto (GARCEZ E ALVAREZ, 1988).

A bacia hidrográfica pode ser definida, também, como a área geográfica coletora de água de chuva que, escoando pela superfície do solo, atinge a seção considerada (PINTO *et al.*, 1976).

Em função de suas características naturais, as bacias hidrográficas têm se tornado importantes unidades espaciais utilizadas para gerenciar atividades de uso e conservação dos recursos naturais, principalmente nas situações atuais de grande preocupação sobre o ambiente, em função do crescimento populacional e do desenvolvimento (MORO, 2005). A Figura 3 mostra um modelo de uma bacia hidrográfica com os seus componentes.

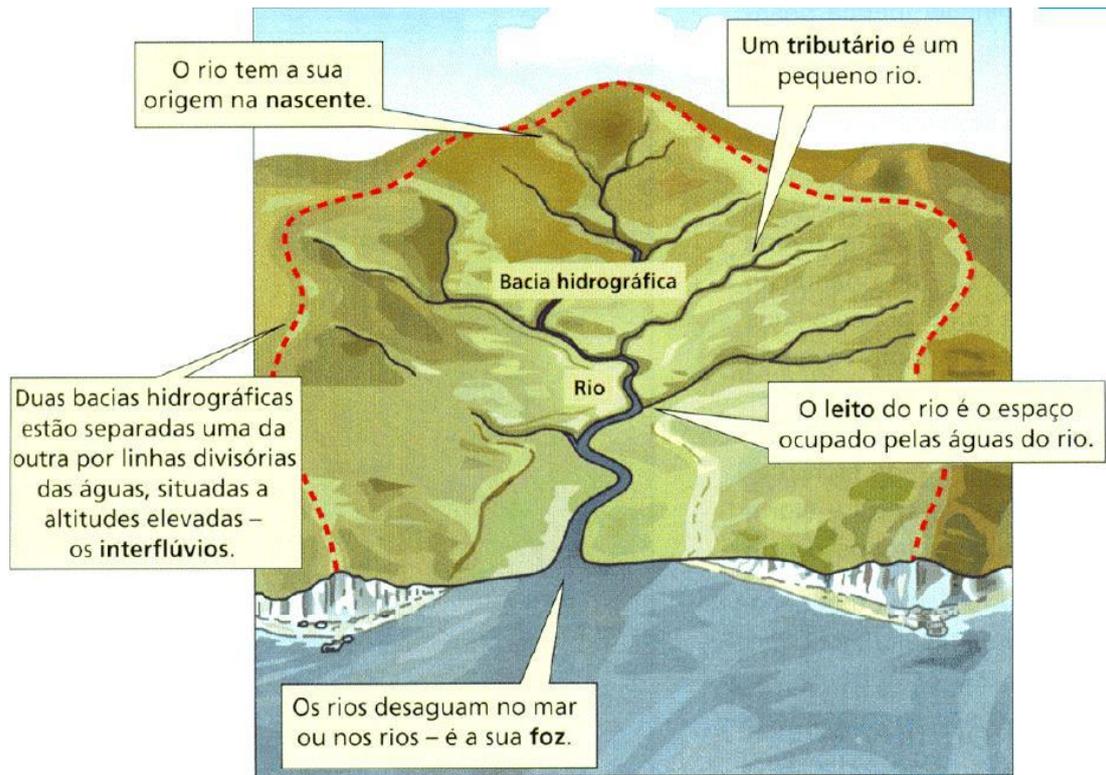


Figura 3 Modelo de uma bacia hidrográfica e seus principais componentes, (NOWATZKI, 2011).

3.1.3 Solos

Teixeira *et al.* (2003) definem solos como produtos frágeis e móveis formados na superfície do planeta Terra, resultado da desagregação de rochas pela ação do intemperismo, seja ele químico ou físico.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995) define solo como material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

Os solos podem ser classificados de maneiras diferentes ao redor do planeta, no Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) classifica os solos como sendo 14 tipos diferentes, podendo ter algumas variações desses tipos devido a características particulares (Embrapa, 2006).

A Tabela 1 apresenta os tipos de solos definidos pela Embrapa, suas características e a distribuição das classes em área de cada um desses solos no território brasileiro.

Tabela 1 Tipos de solos encontrados no Brasil, características principais e porcentagem da área de ocorrência no território brasileiro (EMBRAPA, 2006).

Solo	Características	Área (%)
Neossolo	Pouco evoluído com ausência de horizonte B. Predominam características herdadas do material original.	13,18
Vertissolo	Solos com desenvolvimento restrito, apresenta expansão e contração pela presença de argilas expansivas.	0,21
Cambissolo	Solo pouco desenvolvido, com horizonte B insipiente.	5,26
Chernossolo	Desenvolvimento médio, atuação de processos de bissialitização, podendo ou não apresentar acumulação de carbonato de cálcio.	0,44
Luvissolo	Solo com horizonte B de acumulação, formado por argila de atividade alta (bissialitização), horizonte superior lixiviado.	2,84
Argissolo	Bem evoluído, argiloso, apresentando mobilização de argila da parte mais superficial	26,84
Nitossolo	Bem evoluído (argila caulínica - oxihidróxidos), fortemente estruturado (em blocos), apresentando superfícies brilhantes.	1,13
Latossolo	Altamente evoluído, laterizado, rico em argilominerais e oxihidróxidos de ferro e alumínio.	31,49
Espodossolo	Atuação do processo de podzolização, forte eluviação de compostos aluminosos, com ou sem ferro, presença de húmus ácido.	1,89
Planossolo	Solo com forte perda de argila na parte superficial e concentração intensa de argila no horizonte superficial.	2,66
Plintossolo	Solo com expressiva plintitização (segregação e concentração localizada de ferro)	6,98
Gleissolo	Solo hidromórfico (saturado em água), rico em matéria orgânica, apresentando intensa redução dos compostos de ferro.	4,67
Organossolo	Essencialmente orgânico, material original constitui o próprio solo.	0,03

Segundo a Embrapa (2006) existe grande diversidade de tipos de solos que é condicionada pelas formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos do solo. A empresa ainda confeccionou um mapa dos tipos de solos do Brasil, onde pode-se distinguir 13 grandes classes de solos e suas variações. Sendo que aproximadamente, 58 % do território brasileiro é ocupado por Latossolos e Argissolos, sendo o restante dividido entre os outros 11 tipos de solos. O Quadro 1 apresenta a classificação, segundo Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), dos solos brasileiros nos grupos hidrológicos, conforme algumas características destes.

Quadro 1 Classificação dos solos brasileiros nos grupos hidrológicos (SARTORI, LOMBARDI NETO e GENOVEZ, 2005)

Grupo Hidrológico A

Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm);
 Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão;
 → Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20);
 → Solos de textura média;
 → Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil;
 → Solos bem drenados ou excessivamente drenados;
 → Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
 → A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.

Continua.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.

Grupo Hidrológico B

- Solos profundos (100 a 200 cm);
- Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão;
- Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;
- Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso;
- Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil;
- Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
- A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.

Grupo Hidrológico C

- Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm);
- Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;
- São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;
- Solos associados a argila de atividade baixa (Tb);
- A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/ argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.

Grupo Hidrológico D

- Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão;
- Solos rasos (prof. < 50 cm);
- Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1;
- Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta);
- Solos orgânicos.

Enquadra-se neste grupo o:

NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

3.1.4 Sedimentos

Nesse contexto, sedimentos podem ser definidos como sendo partículas derivadas de rochas ou de materiais biológicos, que podem ser transportados por fluidos, ou seja, partícula de rocha que sofreu o intemperismo, e que é transportada pela ação do vento ou da água, de seu local de origem até rios e/ou locais de deposição. É o material sólido suspenso na coluna d'água ou depositado no leito dos rios (CARVALHO, 2008).

Sedimentos de diferentes tamanhos apresentam velocidades e mecanismos de transportes diferentes. Os principais mecanismos são a suspensão para partículas menores; saltação, onde ocorre a manutenção temporária do sedimento em suspensão; arrasto, onde o deslocamento ocorre rente a interface sedimento/fluido e rolamento que ocorre com a rotação do grão em torno de um eixo por sobre outros grãos (TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Os sedimentos podem ser classificados segundo a sua granulometria, ou seja, pelo tamanho do grão. Várias tabelas são encontradas na literatura com essa classificação. A Tabela 2 apresenta uma dessas tabelas de classificação feita por Teixeira *et al.* (2003), onde se observa que existem 4 tipos principais de sedimentos subdivididos por causa das diferentes faixas de diâmetros dos grãos.

Tabela 2: Classificação dos sedimentos segundo a granulometria (TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Intervalo Granulométrico (mm)	Nomenclatura	Classificação nominal
> 256	Cascalho	Matacão
256 - 64		Bloco ou Calhal
64 - 4,0		Seixo
4,0 - 2,0		Grânulo
2,0 - 1,0	Areia	Muito grossa
1,0 - 0,50		Grossa
0,50 - 0,250		Média
0,250 - 0,125		Fina
0,125 - 0,062		Muito fina
0,062 - 0,031	Silte	Grosso
0,031 - 0,016		Médio
0,016 - 0,008		Fino
0,008 - 0,004		Muito fino
< 0,004	Argila	Argila

Existem alguns problemas que podem ser gerados pelos sedimentos. Dentre eles Carvalho (2008) cita que com a erosão o solo pode perder gradualmente a fertilidade, além de que, tais solos erodidos formam depósitos muito indesejáveis. O sedimento diluído na coluna d'água pode diminuir a qualidade da água, causando gastos temporais

e financeiros na remoção deste. Porém, o sedimento pode ter um efeito benéfico, pois pode carregar nutrientes, fertilizando locais onde se depositam.

3.1.5 Perda de solo

A erosão é um processo de desgaste das rochas e solos e tem como consequência a desagregação, deslocamento ou arrastamento de partículas por ação de algum agente, a saber, água e vento, por exemplo (CARVALHO, 2008).

Já erosão hídrica, como é de se deduzir, é o processo de erosão que tem como agente a água, e é um dos mais importantes problemas de degradação ambiental, provocado pelo impacto da chuva no solo e pelo escoamento superficial. Tal processo tem a capacidade de desagregar e transportar sedimentos (CAMPOS, DIAS e SANTOS, 2007).

A Tabela 3 apresenta as recomendações da organização das nações unidas para agricultura e alimentação, Programa das Nações Unidas para o Meio ambiente (PNUMA) e Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), referentes à classificação do grau de erosão hídrica.

Tabela 3 Classificação do grau de erosão hídrica, (ALMOROX, 1994 *apud* PEREIRA, 2010).

Perda de Solo (ton/ha.ano)	Grau de Erosão
< 10	Nenhuma ou Baixa
10 - 50	Moderada
50 - 200	Alta
> 200	Muito Alta

Carvalho (2008) cita que, em relação a perda de solos nos continentes, a quantificou dos valores médios de tais perdas anuais:

Europa = 84 toneladas $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$

América do Norte e Central = 491 toneladas $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$

Ásia = 610 toneladas $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$

América do Sul e Antilhas = 701 toneladas $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$

África = 715 toneladas $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$

Um dos modelos de predição da erosão de origem hídrica mais conhecido é o método centrado na Equação Universal de Perda de Solos (USLE). Devido à

simplicidade dos parâmetros envolvidos e da facilidade de ser implementada de forma distribuída, a Equação Universal de Perda de Solo vem sendo bastante utilizada, apesar do caráter eminentemente empírico, o que implica em resultados restritos às condições de calibragem do ponto de vista quantitativo (PEREIRA, 2010).

$$Y = R.K.L.S.C.P \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Y = Perda anual de solo calculada por unidade de área, (t/ha.ano);

R = Fator chuva – índice de erosão pela chuva, (MJ/ha.mm/h);

K = Fator de erodibilidade do solo, t/ha/(MJ.mm);

L.S = Fator conjunto de comprimento e declividade do solo, (adimensional);

C = Fator de uso e manejo do solo, (adimensional);

P = Fator de práticas conservacionistas, (adimensional).

Esta equação pode superestimar a produção de sedimentos, uma vez que fornece a produção bruta de sedimentos que é a erosão total ocorrida no solo ou o sedimento disponível a ser transportado pelo escoamento superficial.

3.1.6 Uso e ocupação do solo

Segundo Takeda (2013), o uso e ocupação do solo é o conjunto das atividades e práticas de uma sociedade sobre uma aglomeração urbana ou rural, combinadas com seus padrões ou tipos de assentamentos, do ponto de vista da regulação espacial. Pode-se dizer que o uso do solo é a representação da sociedade naquele determinado local e a ocupação do solo, por sua vez, é a maneira pela qual a edificação pode ocupar o terreno, ou seja, é uma combinação de um tipo de atividade e de um tipo de assentamento.

O uso inadequado do solo vem acarretando diversos problemas ambientais, tais como, o comprometimento de fontes e mananciais de água, degradação de habitats naturais, erosão, enchentes e assoreamento do solo. Estes estão diretamente ligados a um mau gerenciamento do espaço que, por estar desprovido de algum critério técnico ou projeto ambiental, tal como um zoneamento do solo, não respeitam a capacidade de suporte da natureza (LEITE *et al.* 2010 *apud* WEISS *et al.* 2013).

Tucci (1995) afirma que os principais impactos decorrentes do processo de urbanização sobre o ciclo hidrológico resultam da ocupação do solo. No espaço urbano

as atividades antrópicas diversificadas, contribuem para redução da porcentagem da água que infiltra no solo, diminuição da rugosidade das superfícies, substituição de pequenos canais da drenagem natural por tubulações subterrâneas, retificação dos canais da drenagem natural, entre outras. A Tabela 4 apresenta a evolução da taxa de urbanização ocorrida no Brasil para o período de 1940 a 2010. Em seguida, é apresentado o gráfico na Figura 4 dessa evolução, onde pode ser visto que em 70 anos, cerca de 50% da população brasileira saiu da zona rural e passou a habitar áreas urbanizadas.

Tabela 4 Evolução da taxa de urbanização do Brasil, (IBGE, 2010)

Período	Taxa de Urbanização (%)
1940	31.24
1950	36.16
1960	44.67
1970	55.92
1980	67.59
1991	75.59
2000	81.23
2007	83.48
2010	84.36

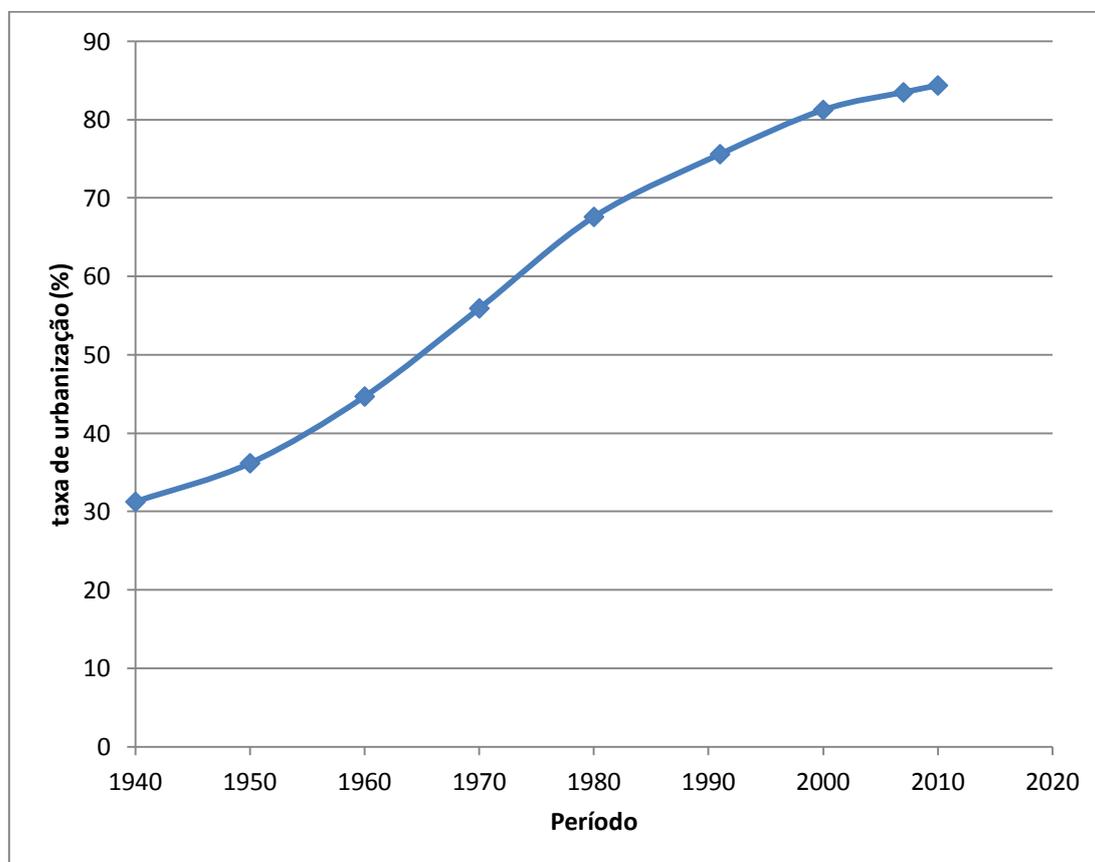


Figura 4 Evolução da urbanização no Brasil, (IBGE, 2016).

3.2 ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APPs)

Segundo Castro (2002), desde a época colonial já haviam normas e regras que limitavam o desmatamento e a exploração das florestas brasileiras, preconizando medidas conservacionista, com práticas de gestão e de manejo adequadas e eficientes. Tais normas foram editadas pela coroa Portuguesa que previa diversas penalidades àqueles que descumprissem.

Pelo Decreto 23.793, de 23 de janeiro de 1934, foi instituído o “Código Florestal Brasileiro”. Estabeleceu, entre outros pontos, o conceito de florestas protetoras semelhantes ao das Áreas de Preservação Permanente (APPs), porém, o decreto não previa as distâncias mínimas para a proteção dessas áreas. Previa, também, a obrigatoriedade de uma espécie de “reserva florestal” nas propriedades com objetivo de assegurar o fornecimento de carvão e lenha, utilizados como insumo energético de grande importância nessa época, permitindo a abertura das áreas rurais em, no máximo, 75% da área de matas existentes na propriedade (BRASIL, 1934).

Essa linha foi seguida pela Lei 4.771/65, texto que deu origem ao Código Florestal, que juntamente com as posteriores alterações, estabeleceram, entre outros pontos, as limitações ao direito de propriedade no que se refere ao uso e exploração do solo e das florestas e demais formas de vegetação. Nela, determinou-se a Reserva Legal (RL) e as APPs (BRASIL, 1965).

Em 1986 foi criada a Lei 7511 que modificava a reserva florestal e as APPs. O conceito de área de reserva florestal, posteriormente denominado de reserva legal, sofreu diversas alterações, principalmente no que diz respeito ao regime da reserva florestal. Na lei anterior, as áreas de reserva florestal podiam ser 100% desmatadas, desde que substituídas as matas nativas por plantio de espécies, inclusive exóticas. Embora essa lei tenha modificado o conceito de reserva florestal, não mais permitindo o desmatamento das áreas nativas, manteve a autorização para o proprietário repor as áreas desmatadas até o início da vigência dessa lei, com espécies exóticas, e fazer uso econômico das mesmas. Essa lei também alterou os limites das APPs, originariamente de 5 metros para 30 metros, sendo que nos rios com mais de 200 metros de largura, a APP passou a ser equivalente à largura do rio (BRASIL, 1986).

Em BRASIL (1989), Lei Federal 7.803, tem-se determinado que a reposição das florestas utilizasse, prioritariamente, espécies nativas, embora não proibisse a utilização de espécies exóticas. Nela foi instituída a Reserva Legal, que é um percentual de

limitação de uso do solo na propriedade rural. Essa área não é passível de conversão às atividades que demandem a remoção da cobertura vegetal. Também criou-se a obrigação de 20% de Reserva Legal para áreas de cerrado que, até esse momento, era somente para áreas florestadas, encerrando, assim, a fase da “reserva florestal”, substituída pela “reserva legal e definindo que a averbação da reserva legal fosse feita à margem da matrícula do imóvel no registro de imóveis competente.

A Lei 7.803 alterou novamente o tamanho das APPs nas margens dos rios e criou novas áreas localizadas ao redor das nascentes, olhos d’água; bordas dos tabuleiros ou chapadas, a partir da linha de ruptura do relevo, ou, ainda, se a propriedade estiver em altitude superior a 1,8 mil metros; ou se ocorrer qualquer das situações previstas no artigo 3º, da Lei Florestal (BRASIL, 1989).

Em 1996 foi criada a primeira de uma a série de Medidas Provisórias (MP) editadas, até a MP 2166-67/2001, que restringiu a abertura de área em florestas. Embora não tenha aumentado a reserva legal, passou a permitir apenas o desmatamento de 20% nos ambientes de fito fisionomia florestal. A partir da MP 2080/2000, a reserva legal em áreas de floresta passou a ser de 80% (AGÊNCIA CÂMARA, 2012).

Já em 1998, conforme cita Brasil (1998), foi criada a Lei de crimes ambientais que também mudou dispositivos do Código Florestal, transformando diversas infrações administrativas em crimes, alterando a Lei 4.771/65, abrindo brecha para a aplicação de multas pesadas pelos órgãos de fiscalização ambiental, criando novas infrações, inexistentes anteriormente.

No ano de 2001, uma nova MP 2166-67/2001 foi criada, alterando novamente os conceitos de reserva legal e áreas de preservação permanente. Definindo a reserva legal como a área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, excetuada a de preservação permanente, necessária ao uso sustentável dos recursos naturais, à conservação e reabilitação dos processos ecológicos, à conservação da biodiversidade e ao abrigo e proteção de fauna e flora nativas. O tamanho mínimo da reserva depende do tipo de vegetação existente e da localização da propriedade. No Bioma Amazônia, o mínimo é de 80%. No Cerrado Amazônico, 35%. Para as demais regiões e biomas, 20% (BRASIL, 2001). As APPs sofreram diversas modificações e passou a ser a faixa marginal dos cursos d’água cobertos ou não por vegetação. Nas pequenas propriedades ou posse rural familiar, ficou definido que poderiam ser computados no cálculo da área de reserva legal os plantios de árvores frutíferas ornamentais ou industriais, compostos

por espécies exóticas, cultivadas em sistema intercalar ou em consórcio com espécies nativas.

Enfim, a Comissão Especial do Código Florestal aprovou, no dia 6 de julho de 2010, a proposta do deputado Aldo Rebelo para modificação do Código Florestal Brasileiro. E, finalmente, em 2012, o novo código florestal foi aprovado e embora muitos artigos e parágrafos tenham sido vetados, está em vigência no Brasil e sobre ele, alguns aspectos podem ser apresentados a seguir (FERREIRA, 2014).

O Artigo 3º define como área de preservação permanente: área protegida coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

Segundo Carvalho (2013), o tema APPs é um dos mais polêmicos, sendo alvo de inúmeras críticas, sejam elas positivas ou negativas. O autor ainda classifica as APPs de acordo com a finalidade, função desempenhada pela mesma, da seguinte forma:

- APP protetora das águas: curso d'água, nascentes, olhos d'água, lagos e lagoas naturais, entorno de reservatórios artificiais.
- APP protetora de montanhas e do solo: encostas, borda de tabuleiros e chapadas, topo de morros e áreas com altitude superior a 1800 metros.
- APP protetora de determinados ecossistemas: restingas, manguezais e veredas.

O capítulo II dispõe sobre as áreas de preservação permanente e em sua seção I, sobre a delimitação das Áreas de Preservação Permanente, no artigo 4º delimita-se APPs, seja em áreas rurais ou urbanas, da seguinte maneira (BRASIL, 2012).

I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de:

- a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;
- b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;
- c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;

Brasil (2012) define o leito regular como: "a calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano".

II - as áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais, em faixa com largura mínima de:

a) 100 (cem) metros, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 (vinte) hectares de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros;

b) 30 (trinta) metros, em zonas urbanas;

IV - as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros;

Brasil (2012) define nascente e olho d'água, respectivamente como: "afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d'água" e "afloramento natural do lençol freático, mesmo que intermitente".

V - as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°, equivalente a 100% (cem por cento) na linha de maior declive;

Art. 4º; IX - no topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação (BRASIL, 2012).

A Figura 5 de Carvalho (2013) apresenta, de forma esquemática, como é feita a divisão do morro e a indicação do local onde é considerada APP de topo de morro, para o Novo Código Florestal.

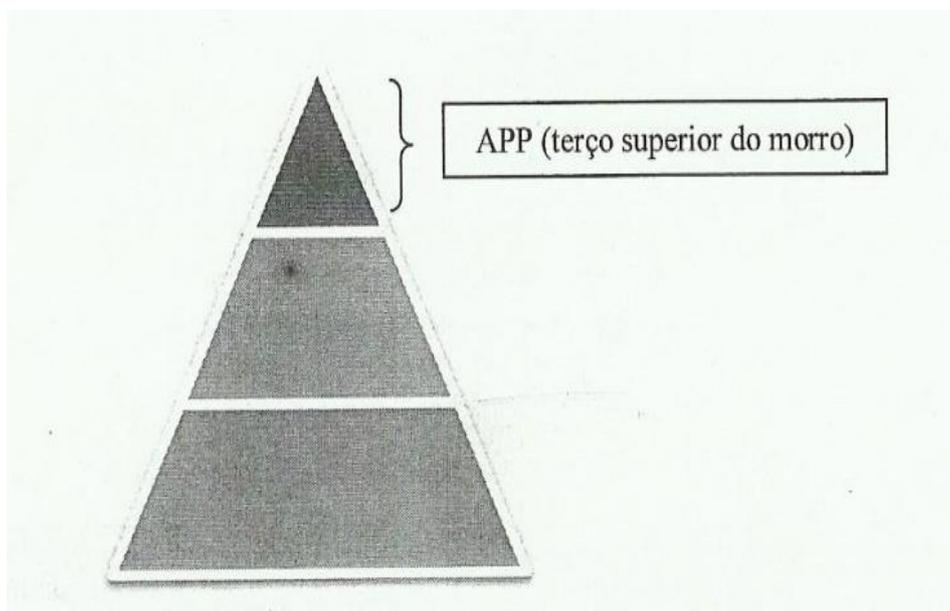


Figura 5: Esquema da delimitação das APPs de topo de morro, (CARVALHO, 2013).

Embrapa (1979) adota os seguintes intervalos, mostrados na Tabela 5, para diferenciação dos tipos de relevos citados no Novo Código Florestal e facilitar os cálculos das APPs de topos de morro.

Tabela 5 Faixas de declividade do relevo e classificação, (EMBRAPA, 1979).

Faixa de declividade do relevo	Classificação
0 - 3%	relevo plano
3 - 8%	relevo suave ondulado
8 - 20%	relevo ondulado
20 - 45%	relevo fortemente ondulado
45 - 75%	relevo montanhoso
> 75%	relevo fortemente montanhoso

Segundo Carvalho (2013), as inclinações superiores a 45° possuem maior tendência a erosão e deslizamento, além de ser importante na captação da água a ser infiltrada no solo. Desta maneira, possuem função primordial na proteção da água e do solo.

§ 1º Não será exigida Área de Preservação Permanente no entorno de reservatórios artificiais de água que não decorram de barramento ou represamento de cursos d'água naturais.

Art. 6º Consideram-se, ainda, de preservação permanente, quando declaradas de interesse social por ato do Chefe do Poder Executivo, as áreas cobertas com florestas ou outras formas de vegetação destinadas a uma ou mais das seguintes finalidades:

I - conter a erosão do solo e mitigar riscos de enchentes e deslizamentos de terra e de rocha;

III - proteger várzeas;

O Código Florestal ainda trata do uso alternativo do solo e o define em seu Artigo 3º, inciso IV como:

Substituição da vegetação nativa e formações sucessoras por outras coberturas do solo, como atividades agropecuárias, industriais, de geração e transmissão de energia, de mineração e de transporte, assentamentos urbanos ou outras formas de ocupação humana (BRASIL, 2012).

Tal artigo torna-se importante devido às mudanças ocorridas ao longo do tempo no uso e ocupação do solo de bacias hidrográficas, limitando, de alguma forma, a ocupação desordenada e a conseqüente substituição da vegetação por qualquer estrutura civil, ou até mesmo, por práticas agrícolas que prejudiquem a qualidade do solo.

3.3 APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS NA CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Segundo Rennó e Soares (2000), na natureza, a manutenção dos recursos hídricos, no que diz respeito ao regime de vazão dos cursos d'água e da qualidade de água depende de uma relação íntima que existe entre a cobertura vegetal e a água. Este equilíbrio dinâmico vem sendo constantemente alterado pelo homem através do desmatamento, expansão da agricultura, abertura de estradas, urbanização e vários outros processos de transformação da paisagem que alteram o ciclo da água.

Aronica e Cannarozzo (2000 apud ZHOU *et al.*, 2013) citam que com a urbanização ocorre a substituição de uma área permeável, por uma área com superfície impermeável e isso gera mudanças significativas nos fluxos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, provocando diminuições na infiltração pela perda da interceptação vegetal e da diminuição da capacidade de retenção de água na bacia. Enfim, alguns autores estudaram tais impactos ocorridos devido às alterações do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas, e a seguir são apresentados alguns deles.

Vanzela, Hernandez e Franco (2010) verificaram a influência do uso e ocupação dos solos sobre os recursos hídricos do córrego Três Barras, município de Marinópolis, SP, utilizando a correlação de Pearson entre os parâmetros de qualidade e disponibilidade de água e o uso e ocupação dos solos. Os autores concluíram que as áreas ocupadas por matas e pastagens, com menor intensidade, favoreceram a disponibilidade e a qualidade da água na sub-bacia e que, de maneira geral, as áreas habitadas, agricultadas e as matas degradadas, reduziram a disponibilidade e a qualidade da água da sub-bacia.

Vieira (2011) apresentou um prognóstico do escoamento superficial para três cenários de uso e ocupação do solo na bacia experimental de Santana do Ipanema (BESI), uso atual, uso atual associado às APPs e mudanças climáticas referenciadas pelos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*, utilizando o modelo hidrológico Kineros2. O cenário 2, apresentou os menores volumes escoados e os maiores volumes interceptados e infiltrados, enquanto que no cenário 3, esta relação se inverte. Percebe-se que nas áreas estudadas, o efeito do desmatamento do solo, cenário 3, conduz a um acréscimo considerável no volume escoado, contribuindo ainda mais para a escassez hídrica da região.

Godoy (2011) estudou a alteração da profundidade do estuário do rio Jaguaribe ocorrida devido ao aumento da entrada de sedimentos com a mudanças no uso do solo da bacia hidrográfica. O autor fez uma estimativa de carga de sedimento dos diversos usos do solo na bacia hidrográfica do baixo estuário, essa estimativa mostrou que as principais atividades que contribuía com sedimento para o estuário eram a agricultura (282.322 t/ano), tendo como os principais contribuintes, as plantações de feijão, de mandioca e as de milho, seguida pelas áreas urbanas (115.076 t/ano), as fazendas de camarão (13.475 t/ano) e a pecuária (1.374 t/ano).

Dias e Walde (2012) modelaram a dinâmica espacial do uso e ocupação do solo em unidades da bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF, identificando processos de mudança no uso e ocupação do solo por meio de análises multitemporais de imagens de satélite e criaram cenários de tendência histórica para os anos de 2014 e 2020 nas sub-bacias do Bananal, do Ribeirão do Gama e do Lago Paranoá. Para isso utilizaram o software Dinâmica EGO como plataforma para modelagem. Os prognósticos modelados para os dois períodos futuros indicaram uma saturação no espaço territorial das unidades hidrográficas estudadas caso mantenha-se a tendência de mudança no uso do solo avaliado nos períodos anteriores.

Gomes *et al.* (2012) apresentaram uma caracterização físico-ambiental e de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Almada na Bahia. Basearam-se no reconhecimento e caracterização dos atributos ambientais, através de levantamento de dados de trabalhos anteriores realizados na área da bacia e da utilização de técnicas de mapeamento de sensores remotos e por Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Os resultados mostraram no oeste e sudeste a fragilidade em função do processo de uso e ocupação do solo, visto que áreas de cobertura de cabruca e floresta estão sendo substituídas por áreas de pastagens. Tal processo vem acompanhado pelo aumento de áreas degradadas por solo exposto potencializando a ocorrência de processos erosivos.

Macedo *et al.* (2012) apresentam uma metodologia para simulação da produção de sedimentos em cenários distintos de uso e ocupação do solo, utilizando de forma combinada a equação da perda de solo modificada, um modelo hidrológico ABC e um SIG. Analisada a influência de matas secundárias, em dois cenários distintos de uso e ocupação do solo, para a minimização da produção de sedimento e controle do processo erosivo na sub-bacia do Rio Jacaré, no Estado de Sergipe. Concluíram que a mata secundária exerce efeito benéfico no controle da produção de sedimentos em bacias hidrográficas e que o aumento da vegetação proporcionou melhores efeitos para diminuição das perdas de solo e o escoamento superficial direto na sub-bacia do riacho Jacaré.

Araújo (2012) estimou e analisou o crescimento da demanda de água utilizando como dados de entrada, o uso e ocupação do solo atual e mais dois cenários futuros (de curto prazo, $t = 5$ anos e de longo prazo, $t = 10$ anos), produzidos através de dados coletados em campo na área de estudo e de simulação das mudanças de uso do solo no modelo Dinâmica EGO. Entre os resultados encontrados a estimativa da demanda de água para o uso do solo atual, cenário futuro de curto prazo e o cenário futuro de longo prazo foi obtida, onde verificou-se um crescimento da demanda de água em torno de 20%.

Cuartas *et al.* (2012) utilizaram o modelo *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) na reserva de Caieiras a noroeste de Manaus no estado do Amazonas, para testar a capacidade de simular respostas hidrológicas e para representar a distribuição espacial dos fenômenos hidrológicos, tais como evapotranspiração, umidade do solo e profundidade do lençol freático, uma vez que, a região contém floresta tropical intocada. As simulações do modelo para umidade do solo, níveis de águas subterrâneas e de descarga foram comparados com os dados observados e exibiu

um desempenho satisfatório no geral, com a exceção da profundidade do lençol freático que subestimou os fluxos de picos durante a estação chuvosa.

Dalmas (2013) desenvolveu cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape, baseando-se na evolução desta durante 24 anos (1986 - 2010) e assim previu cenários para 2025, aplicando a técnica de Titus e Narayanan, Pfeffer, Ramhstorf e o modelo do *Intergovernmental Panel on Climate Change* no ArcGis. O autor conclui que o uso de diferentes ferramentas geotecnológicas mostraram-se eficazes mesmo integrando diferentes frentes de trabalho, como o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa e erosão, mapeamento de uso e cobertura do solo e simulação do cenário para 2025, além do cálculo da vulnerabilidade a um potencial aumento do nível do mar e com estes, foi gerado um produto final com as classes de uso e ocupação do solo do Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape e Cananéia para 2025.

Pontremolez (2013) estudou as inundações geradas por precipitações de diferentes tempos de retorno em cenários alternativos de ocupação da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho. Utilizando o modelo *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS) para construção de hidrogramas de cheias e manchas de inundação da bacia, comparando com os cenários alternativos. Os resultados demonstram que o plano diretor municipal não considera o controle de inundações, e que caso a região se desenvolva segundo o plano ocorrerá ampliação das inundações na bacia e aumento das vazões descarregadas no exultório.

Van Wie, Adam e Ullman (2013) analisaram o potencial de armazenamento de água sob a adoção em larga escala de práticas de cultivo de plantio direto e de preparo convencional na região de Palouse - USA, aplicando o DHSVM com modificações, para representar as mudanças físicas à infiltração, evaporação e escoamento, que resultam da gestão de plantio direto. Concluíram que o plantio direto tem o potencial de aumentar o armazenamento de água no solo de precipitação de inverno na zona de raiz, o que pode levar a uma maior produção de trigo na região de Palouse. Além disso, afirmam que o DHSVM é adequado para a investigação de algumas oportunidades de gestão de bacias hidrográficas agrícolas e tem o potencial para tratar de questões adicionais relativas à agricultura sustentável.

Moreira (2013) simulou o escoamento superficial, provocado por chuvas com vários tempos de retornos, tanto para o cenário atual, quanto para vários cenários fictícios da bacia, utilizando o método desenvolvido pelo Serviço de Conservação do

Solo (SCS) e o modelo *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS). Os resultados mostraram que três sub-bacias contribuem com 46% do escoamento total no exutório, além disso que um crescimento de ocupação da bacia em 15%, praticamente dobrará a probabilidade de cheias no canal do rio Granjeiro, enquanto a diminuição desta ocupação em 15%, praticamente reduz a possibilidade de cheias no canal do rio Granjeiro pela metade.

Halwatura e Najim (2013) utilizaram o modelo HEC-HMS para simulação em bacias hidrográficas no Sri Lanka, os parâmetros do modelo foram alterados, uma vez que, o modelo não está calibrado e nem validado para bacias hidrográficas da região, a calibração do modelo foi realizada separadamente para três métodos selecionados, o Método do Serviço de Conservação (SCS), o Método do hidrograma unitário de Snyder e do hidrograma unitário de Clark. Os autores validaram o modelo com um conjunto de dados de precipitação e vazão de 2008-2010. Os fluxos simulados de cada métodos foram testados estatisticamente empregando o coeficiente de desempenho, o erro relativo e o método residual. O método do hidrograma unitário de Snyder se mostrou o mais confiável na simulação dos fluxos do que o método do hidrograma unitário Clark, já o método SCS não teve um bom desempenho.

Ohnuma Júnior e Mendiondo (2014) analisaram cenários ambientais para compor o plano diretor do município de São Carlos - SP com medidas de recuperação ambiental para bacias urbanas a partir de simulações hidrológicas. A metodologia utiliza base regional para espacializar bacias embutidas com uma classificação de uso e ocupação do solo para os anos: 1962, 1972 e 1998. São simulados cenários retrospectivos de 50 anos, 40 anos e 15 anos, e cenários prospectivos de 10 anos, com plano diretor (CPD) e sem plano diretor (SPD). Segundo os autores os resultados para o planejamento ambiental (CPD) indicam melhorias na carga de poluição hídrica e preveem a recuperação das funções hidrológicas e ambientais.

Santos (2014) fez uma previsão em termos quantitativos do uso e ocupação do solo em Portugal utilizando um modelo de Markov para os anos de 2020, 2030 e 2040, tendo como base as alterações ocorridas entre 1990 e 2000. Numa segunda parte, o modelo espacial de simulação de alteração de uso e ocupação do solo para o ano de 2040, utilizando cadeias de Markov com autômatos celulares e com base em regressão logística, foram simulados três cenários futuros: cenário de sustentabilidade ambiental, cenário de desenvolvimento industrial e cenário de desertificação utilizando como referência a previsão para 2040. Conclui que em 2040 haverá um aumento da área

florestal e um decréscimo da área agrícola, as zonas artificializadas também aumentarão prevendo-se esse aumento nas zonas de Lisboa e Porto, como já acontece hoje e que as classes restantes permanecerão praticamente inalteradas.

Bezerra e Silva (2014) avaliaram o risco à perda de solo, com base nos cenários de uso atual e potencial, na bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas, na região litorânea sul do estado da Paraíba. Para isso, avaliaram a propensão ao risco à perda de solo, considerando o uso potencial das terras das sub-bacias dos rios, definido por meio da distribuição do coeficiente de rugosidade. A comparação dos cenários de uso do solo atual e potencial permitiu aos autores concluir que a forma atual de ocupação está mais propensa a perda de solo, em 67,24% da área da bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas.

Mohammadi, Nazariha e Mehrdade (2014) por meio de modelos de SIG, HEC-RAS e software HEC-GEORAS, simularam as condições hidráulicas de inundação e determinaram as áreas propensas a inundações para diferentes períodos de retorno. Baseado no resultado deste passo, utilizando o *Hydrologic Engeneering Center - Flood Demage REduction Analysis* (HEC-FDA), uma análise de risco foi realizada e os danos de inundação foram estimados quantitativamente e finalmente os danos anuais esperados (DAE) foram obtidos. Dentre os resultados obtiveram um mapeamento usando um zoneamento da análise de risco de inundação, e com isso, proporcionaram um mapa de alívio e resgate da área e um planejamento da gestão de desastres de inundação com base nestas informações.

Viola *et al.* (2014) usaram o modelo Lavras Simulação de Hidrologia (LASH), para simular os impactos no regime hidrológico na bacia do rio Grande, com cinco tendências de uso do solo: S1 e S2 - reflorestamento com eucalipto cobrindo 20% e 50%, respectivamente, da área de pastagem atual; S3 - reflorestamento com eucalipto cobrindo 100% da área de pastagem atual somente nas sub-bacias onde essa tendência é predominante; S4 e S5 de 30% e 70% dos remanescentes florestais da região da Mantiqueira para o cultivo de pastagens, respectivamente. Os resultados demonstraram que o escoamento seria reduzido devido às mudanças no uso do solo em 51,65 mm/ano, 110,29 mm/ano e 59,48 mm/ano para os cenários S1, S2 e S3, respectivamente. No entanto, os cenários S4 e S5 poderiam aumentar em 57,63 mm/ano e 156,78 mm/ano, respectivamente.

Wehmann e Liu (2015) desenvolveram um classificador espaço-temporal, *Markovian Support Vector Classifier*, a classificação foi feita em uma área de estudo

nos Apalaches, utilizando sete imagens do satélite *Landsat*. Os autores afirmam que tal classificador é substancialmente mais preciso e que os produtos de cobertura do solo multi-temporais e que são mais consistentes e adequados para possíveis estudos detalhados das mudanças de cobertura do solo.

Abarquero *et al.* (2015) avaliaram os impactos da mudança do uso do solo no escoamento superficial, usando dados da estação experimental de Tinoco - Costa Rica. Basearam-se na hipótese principal que o fluxo hidrológico de florestas secundárias é inferior ao gerado em outros tipos de cobertura do solo. Para este efeito as respostas de escoamento na escala de plotagem foram analisadas para diferentes usos do solo: florestas secundárias, plantações florestais, plantações de dendezeiros e pastagens. Os resultados mostraram que florestas secundárias tem uma resposta ao escoamento significativamente menor do que as plantações de dendezeiros e de pastagem, apesar de não haver diferenças significativas entre as parcelas em variáveis como a condutividade hidráulica saturada.

Koumrouyan (2015) apresenta um trabalho que relaciona as modificações do novo código florestal no que diz respeito a topos de morro, faz o uso de cenários de cobertura vegetal e assim analisa e compara as respostas hidrológicas destes cenários de cobertura aplicando o modelo DHSVM. A autora observou uma relação inversamente proporcional entre a mudança da área florestada e a vazão no exutório da bacia e concluiu que o novo Código Florestal diminuiu em 99,98% a proteção dos topos de morro em relação ao antigo Código Florestal e que as consequências hidrológicas podem ser detectadas pelo DHSVM numa bacia de mesoescala.

3.4 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Koumrouyan (2007) afirma que existem muitos estudos de modelagem hidrológica distribuída que se utilizam de cenários de uso e cobertura do solo para entender a influência mudanças sobre os processos hidrológicos nas bacias hidrográficas. Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade, estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso do solo e prever alterações futuras nos ecossistemas.

Segundo Marinho Filho *et al.* (2012), através da aplicação de princípios teóricos e conceituais, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos dentro

de uma escala de tempo definida, estimando componentes anteriormente desconhecidos ou não quantificados.

Lelis e Calijuri (2010) aplicaram o modelo SWAT na bacia do ribeirão São Bartolomeu, localizada na zona da mata de Minas Gerais, para identificação das áreas de maior sensibilidade à erosão em relação ao uso e tipo do solo. Em seus resultados de campo e das simulações concluíram que o SWAT se mostra eficiente na caracterização da produção de sedimentos e que as perdas de solo, as quais são influenciadas por fatores como umidade do solo, intensidade de precipitação, uso e tipo de solo podem ser reduzidas significativamente pela substituição de culturas com melhor manejo. Outro resultado obtido foi através de uma simulação de cenário de substituição de parte da cobertura de pastagens por eucalipto, o qual reduziu significativamente a perda de solo em várias regiões da bacia.

Baltokoski *et al.* (2010) utilizaram o modelo SWAT para avaliar a sensibilidade na predição da vazão e do fluxo de massa do fósforo total. O estudo foi realizado em duas microbacias hidrográficas contíguas, dos rios Conrado e Pinheiro, afluentes do rio Pato Branco, localizadas nos municípios de Pato Branco e Mariópolis, no Estado do Paraná. Os resultados mostraram que com a frequência de amostragem regular, o modelo SWAT realizou de forma aceitável as simulações de vazão e fluxo do fósforo total. Já com frequência de amostragem irregular e pequeno número de dados, os procedimentos de análise de sensibilidade e de autocalibração não foram eficientes na calibração do modelo SWAT para a simulação de vazão e fluxo do fósforo total. Outro resultado da simulação mostrou que a distribuição mensal do fluxo de fósforo se apresentam heterogêneas ao longo do ano.

Em seu estudo Durães (2010) propôs e avaliou um método para estimar o estresse hidrológico em bacias hidrográficas, utilizando curvas de permanência de longo termo, através do modelo SWAT. Ele estruturou séries históricas abrangendo o período de 1983 a 2005, sendo utilizados nas etapas de calibração e validação os períodos de 1983 a 1989 e o de 2000 a 2005, respectivamente. O autor utilizou o coeficiente estatístico de *Nash-Sutcliffe* (COE) e, complementarmente, analisou variáveis frequentemente extraídas dos hidrogramas. Os resultados das estatísticas de precisão, com COE superior a 0,75 nas fases de calibração e validação, demonstraram que o modelo pode simular adequadamente os impactos hidrológicos causados devido a alterações no uso do solo na bacia do rio Paraopeba e que o estresse hidrológico foram

baixo e médio em Ponte Nova do Paraopeba e em Porto do Mesquita, respectivamente, em todos os cenários simulados.

Pereira (2010) estimou os valores de perda de solo por erosão hídrica para a bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeirinha - MG, com o auxílio de SIGs e do modelo SWAT. Realizando simulações no ano de 1999 utilizando cenários hipotéticos: mata, pastagem e cultura do milho para ilustrar a influência do uso do solo nos valores de perda encontrados. Os resultados obtidos com o modelo SWAT demonstraram a sua aplicabilidade para este tipo de estudo, embora a falta de alguns dados climáticos e de um mapa de solo mais detalhado tenham imposto alguns limites para as simulações.

Aguiar (2011) calibrou um modelo SWAT para avaliar sua sensibilidade em bacias hidrográficas do sul de estado de Minas Gerais, no município de Santa Rita do Sapucaí e realizou simulações para previsão da produção e do transporte de sedimentos. O modelo SWAT apresentou boa capacidade de reproduzir as condições de produção de sedimentos na bacia estudada e o estudo demonstrou um bom ajuste dos parâmetros de vazão simulados e observados. Os resultados sem calibração do modelo subestimaram tanto a vazão como perda de solo de janeiro a setembro de 1999, tendo superestimado ambas nos meses de outubro, novembro e dezembro.

Blainski *et al.* (2011) aplicaram o modelo hidrológico SWAT à bacia hidrográfica do Rio Araranguá e avaliaram, por meio de cenários, uso atual, com predominância da rizicultura nas áreas agrícolas, substituição da agricultura por reflorestamento e remoção da cobertura vegetal das áreas agrícolas, a influência das atividades agrícolas sobre a distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica da área estudada. Os resultados demonstraram a eficiência do modelo em representar o regime hidrológico da área estudada e que a vazão média diária anual foi maior no cenário com solo exposto, sendo esse aumento atribuído à redução da infiltração de água no solo e ao aumento do escoamento superficial. O cenário com reflorestamento apresentou a menor ocorrência de $Q_{simulada} < Q_{95}$, sugerindo maior regularização de vazão ao longo do ano.

Roffe (2012) aplicou o modelo SWAT para prever os riscos de erosão devido às mudanças no uso da solo, na bacia do rio Chambas - Cuba. Desenvolveu diferentes cenários de previsão de comportamento das taxas de erosão do solo, segundo mudanças da cobertura e uso da solo. A análise dos resultados das simulações no âmbito destes cenários permitiu identificar as mudanças e contrastes que ocorreram e potenciais mudanças dos processos hidrossedimentológicos na bacia, o cálculo dos volumes do

fluxo de escoamento e as taxas na produção de sedimentos anual e mensal e a sazonalidade destes processos. Concluiu que a aplicação de diferentes cenários de uso e ocupação do solo, com base na projeção das tendências atuais, mostrou um incremento progressivo na produção de sedimentos na bacia.

Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013) simularam diferentes cenários de uso do solo para a bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia - SC, utilizando o modelo SWAT, e analisaram os efeitos dessas mudanças no fluxo de água e de sedimentos. Os cenários gerados foram agricultura, mata nativa e pastagem. Na etapa de calibração, os autores obtiveram o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* mensais de 0,82 para escoamento e 0,83 para sedimento. Como resultado o cenário mata nativa apresentou o maior decréscimo na vazão média, em relação ao cenário atual, cerca de 8,7 %. O cenário agricultura produziu a maior taxa de produção de sedimentos, aproximadamente 3 vezes maior que o cenário atual. Observaram ainda que alterações no uso do solo impactaram o regime e a disponibilidade hídrica da bacia.

Zhou *et al.* (2013) quantificaram as respostas hidrológicas ao uso do solo e mudanças da cobertura vegetal, utilizando o modelo SWAT. Os resultados mostraram que a expansão das zonas urbanas tinha um ligeira influência na vazão anual simulada e evapotranspiração, mostraram também que o escoamento superficial e escoamento de base foram encontrados mais sensíveis à urbanização e que mudanças na vazão, evapotranspiração e escoamento superficial foram mais pronunciadas durante a estação chuvosa. Os resultados do modelo apresentaram um aumento na vazão de pico de 1,6 - 4,3% e no volume de inundação de 0,7 - 2,3% para os eventos de tempestade. Os autores concluíram que a urbanização tem um ligeiro impacto no rendimento anual de água, mas um impacto notável no escoamento superficial, vazão de pico e volume de inundação, especialmente em bacias suburbanas na área de estudo.

Galharte, Villela e Crestana (2014) estimaram a produção de sedimentos em cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, localizada no município de São Carlos, SP, aplicando o modelo de simulação espacial CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent*) e gerando cenários, expansão da cana-de-açúcar e expansão da laranja, para o ano de 2025 da área de estudo. Os autores estimaram a produção de sedimentos desses cenários com o auxílio do modelo de simulação SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Verificaram que a cultura da cana-de-açúcar de variedades RB72-454, CTC6 e CTC11 e do híbrido entre

Eucalyptus grandis e *Eucalyptus urophylla* foi mais significativa no que diz respeito a geração de sedimentos na bacia.

Ferrigo *et al.* (2014) avaliaram 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 - DF, utilizando o modelo SWAT, que segundo os autores apresentou, com base em dados experimentais, resultados satisfatórios ao reproduzir a carga de sedimentos. Concluíram que em média, a relação entre a mudança na precipitação e a produção de sedimentos foi diretamente proporcional na razão de 1:2, e que para a 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.

Wagner *et al.* (2015) realizaram projeções do modelo de uso do solo com o modelo SWAT para analisar os impactos potenciais de futuras mudanças do uso do solo sobre os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica em Pune - Índia. Os impactos de mudanças de uso do solo sobre os componentes do balanço hídrico foram avaliados para o futuro próximo de 2009 - 2028. Os resultados mostraram que a produção de água aumenta no início da monção até 11,0 milímetros por mês, devido ao aumento da área impermeável, enquanto evapotranspiração diminui na estação seca até 15,1 milímetros por mês, como resultado da perda de superfície agrícola irrigada.

Serpa *et al.* (2015) avaliaram os impactos das alterações do clima e uso do solo em vazão e sedimentos em São Lourenço e Guadalupe - México, utilizando o modelo SWAT. Os autores simularam mudanças de uso do solo a partir de dados históricos socioeconômicos em que a agricultura tradicional é substituída por usos do solo mais rentáveis, ou seja, cultura de milho e girassol e de silvicultura comercial. Mudanças de uso do solo resultaram em um aumento na vazão, mas a resposta erosiva diferiu entre as bacias hidrográficas. A combinação de cenários de mudança de uso do solo e do clima levou a uma redução na vazão para ambas, sugerindo um domínio da resposta climática. Os resultados destacaram ainda a importância dos impactos das mudanças do uso do solo induzidas pelo clima, o que poderia ser semelhante ou mais grave do que os impactos diretos da mudança climática por si só.

Lin *et al.* (2015) realizaram uma investigação abrangente sobre as respostas de escoamento na escala de tempo diária, bem como escalas anuais e mensais utilizando SWAT, e compararam os impactos das escalas de tempo com diferentes indicadores. O modelo foi aplicado em Jinjiang - China. Os autores simularam dois cenários diferentes

de uso do solo de 1985 e 2006, com a floresta reduzida e aumento da área plantada e área urbanizada. Os resultados mostraram que o escoamento anual teve o menor aumento entre os dois cenários, escoamentos mensais tinham taxas médias, aumentando em todos os meses, exceto outubro/novembro, e no escoamento diário ocorreram as maiores taxas com o aumento de picos de cheias, mas diminuição nos fluxos de seca.

Ghoraba (2015) simulou a hidrologia da bacia hidrográfica de Simly Dam em Islamabad - Paquistão, usando o modelo SWAT, mais especificamente, foram simulados os fluxos, assim estabelecido o balanço hídrico e estimado o fluxo de volume mensal para Simly Dam, a fim de ajudar os gestores a planejar e lidar com um importante reservatório. O modelo foi calibrado para o período de 1990-2001 e validado de 2002 a 2011. Com base em quatro coeficientes estatísticos recomendados, a avaliação indicou um bom desempenho em ambos os períodos de calibração e validação, para os valores medidos e simulados. Os componentes do balanço hídrico foram corretamente estimados e a entrada Simly Dam foi reproduzida com sucesso, com coeficiente de determinação R^2 de 0,75. Segundo o autor os resultados revelaram que, se devidamente calibrado, o modelo SWAT pode ser usado de forma eficiente em regiões semiáridas para apoiar as políticas de gestão da água.

3.5 CALIBRAÇÃO

A calibração pode ser definida como o conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre valores indicados por uma medição ou simulação e os valores correspondentes ao padrão utilizado.

A calibração no modelo SWAT pode ser realizada de duas maneiras, utilizando o calibrador manual, que está inserido nas funções do próprio modelo, que permite que os parâmetros a serem calibráveis sejam mudados, somando um determinado valor, multiplicando por um determinado valor os valores iniciais dos parâmetros ou então a substituição do valor inicial do parâmetro por outro que esteja dentro da faixa do parâmetro em questão. A outra maneira de fazer a calibração é por meio da utilização de outro software chamado SWAT Cup que realiza a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza de modelos SWAT.

No modelo SWAT vinte e seis parâmetros são utilizados na simulação da vazão, tais parâmetros podem ser observado na Tabela 6 (WINCHELL, 2013).

Tabela 6 Parâmetros calibráveis modelo SWAT para a vazão (WINCHELL, 2013).

Parâmetro	Descrição
ALPHA_BF	Coefficiente do fluxo de base
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
CN2	Curva número na condição II de umidade
SURLAG	Coefficiente de LAG do escoamento superficial
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal
GWQMN	Água do aquífero profundo que retorna ao canal
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo
SLOPE	Declividade da encosta
GW_DELAY	Tempo de fluxo da água subterrânea
BLAI	Máxima área foliar potencial da cultura
CANMX	Máxima interceptação da cultura
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_Z	Profundidade do solo
GW_REVAP	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
BIOMIX	Eficiência biológica
SOL_ALB	Albedo do solo úmido
REVAPMN	Tempo de retorno da água do aquífero para o canal
EPCO	Fator de crescimento da cultura
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta na sub-bacia SFTMP
SFTMP	Temperatura em q a precipitação é igual a neve - temperatura da neve
SMFMN	Fator para derreter a neve em 21 de dezembro
SMTMX	Fator para derreter a neve em 21 de junho
SMTMP	Temperatura base para derretimento da neve
TIMP	Fator de retardo da temperatura na neve
TLAPS	Fator de temperatura

Segundo Aguiar (2011), os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram: o coeficiente de fluxo base (**ALPHA_BF**), condutividade hidráulica efetiva do canal (**CH_K2**), curva número na condição II de umidade (**CN2**), coeficiente de LAG do escoamento superficial (**SURLAG**), condutividade hidráulica saturada (**SOL_K**), coeficiente de Manning para o canal (**CH-N2**), água do aquífero profundo que retorna ao canal (**GWQMN**), coeficiente de compensação da evaporação de água do solo (**ESCO**), declividade média da encosta (**SLOPE**), o tempo de fluxo de água subterrânea (**GW_DELAY**) e o fator de crescimento da cultura (**EPCO**).

Segundo Baldissera (2005), a calibração do modelo SWAT pode ser realizada em quatro etapas, balanço hídrico e escoamento, sedimentos, nutrientes e pesticidas. A autora definiu os seguintes parâmetros para a calibração, de acordo com o manual do SWAT: ALPHA_BF, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, SLSOIL, LAT_TIME e CN.

Pereira (2010) realizou uma análise dos parâmetros calibráveis e os ranqueou de acordo com a sensibilidade que proporcionaram aos resultados no modelo. Tal análise

foi realizada, baseada em diversos cenários. A Tabela 7 apresenta tais parâmetros, a descrição e o ranque.

Tabela 7 Ranque de sensibilidade dos parâmetros relacionados à variável vazão (PEREIRA, 2010).

Parâmetros simulados	Descrição do parâmetro	Ranque
SOLK20	Condutividade hidráulica saturada variação 20)	1
CN_35	Curva número na condição II de umidade (variação 35)	2
GW_DELAY_400	Tempo de fluxo da água subterrânea(variação 400)	3
GWQMN	Água do aquífero profundo que retorna ao canal	4
SOLK2000	Condutividade hidráulica saturada(variação 2000)	5
SLOPE_0.50	Declividade da encosta (variação 0,50)	6
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal	7
ALPHA_BF_0,007	Coefficiente do fluxo de base(variação 0,007)	8
CH_K2_145	Condutividade hidráulica efetiva do canal (variação 145)	9
CH_K2_35	Condutividade hidráulica efetiva do canal	10
ALPHA_BF_0,8	Coefficiente do fluxo de base(variação 0,8)	11
CN95	Curva número na condição II de umidade(variação 95)	12
ECPO_0.9	Fator de crescimento da cultura	13
ESCO_094	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo (variação 094)	14
SLOPE_0.10	Declividade da encosta (variação 0,10)	15
ESCO_053	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo (variação 053)	16

Segundo Bonumá (2013), a calibração pode ser feita por três componentes inerentes ao modelo SWAT, conforme a Tabela 8, que apresenta tais componentes e a indicação dos parâmetros a serem calibrados.

Tabela 8 Componentes de calibração e descrição dos parâmetros (BONUMÁ, 2013).

Componente do SWAT	Indicação dos parâmetros
Hidrologia	<ul style="list-style-type: none"> • Análise do balanço hídrico (anual) • Separação do escoamento • Calibração da vazão
Sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Análise do aporte de sedimentos (MUSLE) • Análise da erosão/deposição no canal • Calibração da produção de sedimentos
Nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Análise do ciclo dos nutrientes no solo • Análise do transporte no canal • Calibração do nitrogênio e fósforo

Bonumá (2013) ainda sugere que para a calibração do componente hidrologia, alguns parâmetros podem ser trabalhados, ou seja, alterados manualmente, dependendo do que acontece com a simulação.

→ Para o caso do escoamento superficial simulado estar muito alto:

- Diminuir o CN (CN2);
- Diminuir o conteúdo de água disponível (SOL_AWC);
- Diminuir o fator de compensação da evaporação do solo (ESCO).

→ Para o caso do escoamento superficial simulado estar muito baixo:

- Aumentar o CN (CN2);
- Aumentar o conteúdo de água disponível (SOL_AWC);
- Aumentar o fator de compensação da evaporação do solo (ESCO).

→ Para o caso da vazão de base simulada estar muito alta:

- Aumentar o coeficiente de “REVAP” do escoamento subterrâneo (GW_REVAP), o valor máximo é 0,2;
- Diminuir a profundidade mínima para o “REVAP” ocorrer (REVAPMN), o valor mínimo é 0;
- Aumentar a profundidade de água no aquífero raso requerida para o escoamento de base ocorrer (GWQMN).

→ Para o caso da vazão de base simulada estar muito baixa:

- Diminuir o GW_REVAP, o valor mínimo é 0,02;
- Aumentar o REVAPMN;
- Diminuir o GWQMN, o valor mínimo é 0.

→ Problemas na forma do hidrograma:

- Ajustar a condutividade hidráulica do canal (CH_K);
- Ajustar o fator alfa do escoamento de base (ALPHA_BF).

4 METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO GERAL

De maneira esquemática as etapas do desenvolvimento do trabalho podem ser colocadas na forma de fluxograma, conforme mostra a Figura 6.

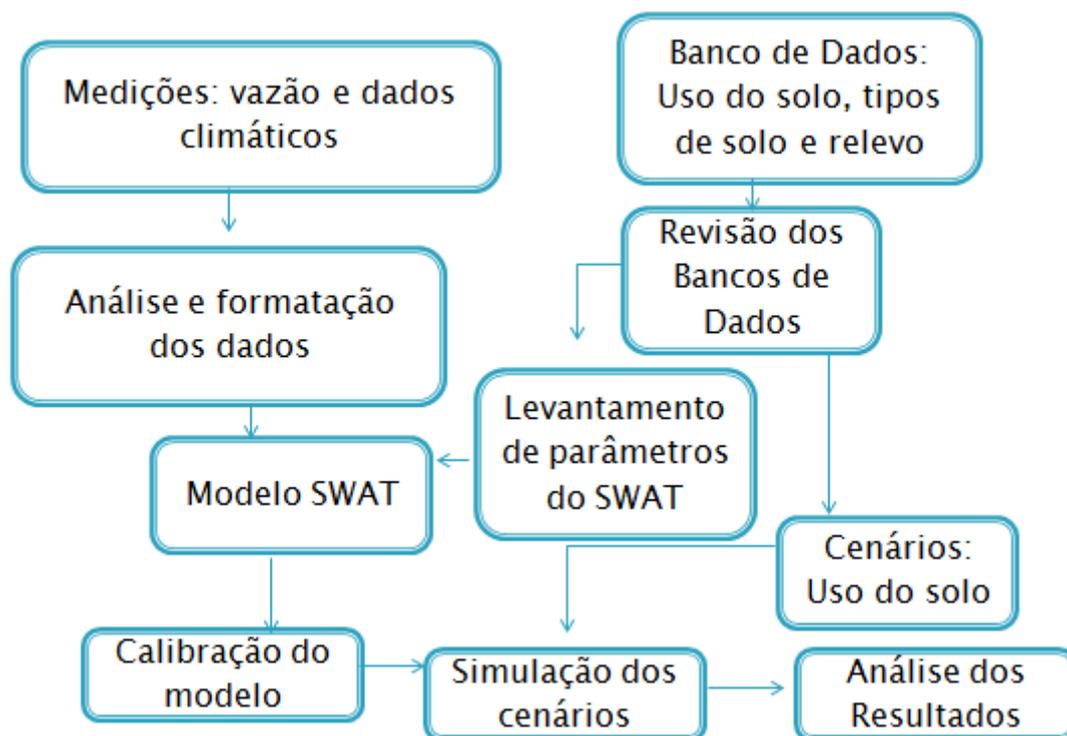


Figura 6: Fluxograma da metodologia utilizada.

Inicialmente, dados de nível d'água são medidos no posto fluviométrico, instalado próximo a portaria da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), na cidade de Itajubá, sul de Minas Gerais. Em conjunto a estes, dados climáticos também são necessários, como dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar, temperaturas máximas e mínimas e precipitação. Os quatro primeiros foram adquiridos da estação do Centro de Previsão e Estudos de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG), instalada dentro da Unifei, e os dados de precipitação foram retirados do site HydroWeb da Agência Nacional das Águas (ANA), para a estação de Maria da Fé.

Os bancos de dados do uso e ocupação do solo e de solos foram obtidos de Flauzino (2012) e de Lima (2012), respectivamente, juntamente com um modelo digital de elevação (MDE) do site da Embrapa. Dados relativos a características dos solos, definidos por Lima (2012), são necessários, os quais foram da literatura e inseridos no banco de dados do SWAT.

Após as entradas dos mapas revisados de solo e de uso e ocupação do solo, do MDE e das entradas dos dados climáticos necessários, realizou-se uma simulação inicial, onde verificou-se a necessidade da calibração do modelo, necessidade esta encontrada após a comparação da vazão observada e da vazão simulada. Enfim, cinco cenários baseados em manejo do solo, tendência de crescimento urbano e critérios da legislação ambiental foram simulados e os resultados analisados.

4.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira está inserida totalmente no município de Itajubá, no sul do Estado de Minas Gerais. Com área aproximada de 40 km², é delimitada ao sul, pela Serra da Pedra Amarela, a leste, pela Serra da Água Limpa, a norte, pelas serras do Juru e dos Toledos, e a oeste por pequenos divisores que a separam da bacia do rio Sapucaí. O ribeirão José Pereira nasce na reserva biológica da Serra dos Toledos, cruza os bairros urbanos Cruzeiro, Pinheirinho, BPS e Centro, e deságua no rio Sapucaí na área comercial do município. A Figura 7 apresenta a localização da bacia nos limites da cidade de Itajubá, conforme supracitado.

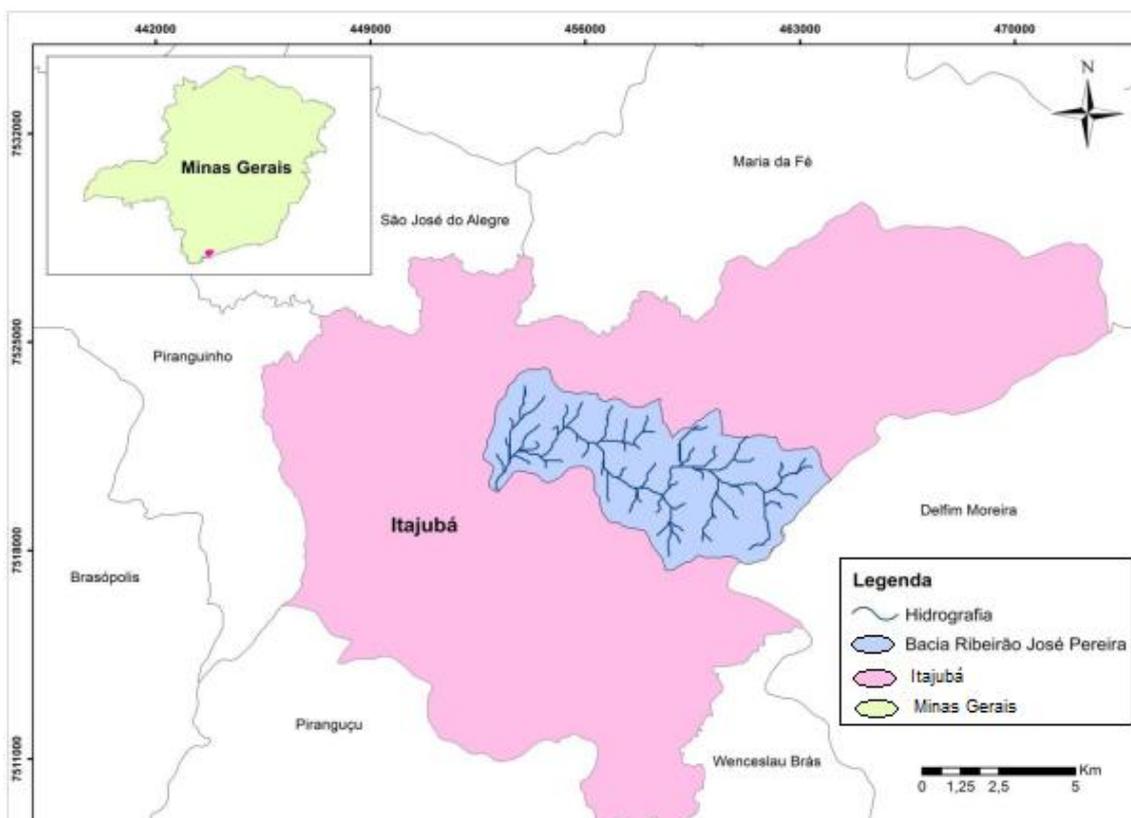


Figura 7 Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira (LIMA, 2012).

4.2.1 Localização da seção de controle

Próximo a portaria da Unifei está localizado nas coordenadas $22^{\circ}24'49.74''\text{S}$ e $45^{\circ}27'3.33''\text{O}$ está localizado o posto fluviométrico, para medições de nível d'água do ribeirão José Pereira, utilizado no presente estudo. A Figura 8 apresenta detalhes da seção transversal e do posto fluviométrico e a Figura 9 apresenta um perfil topográfico do ribeirão José Pereira, desde a sua cabeceira até a sua foz no posto fluviométrico.



Figura 8 Detalhes da seção transversal.



Figura 9 Perfil topográfico do Ribeirão José Pereira.

4.3 CLIMA E PRECIPITAÇÃO

Seguindo a classificação climática de Köppen-Geiger, a bacia do Ribeirão José Pereira apresenta as duas variações do Clima Tropical de Altitude (CW), o tipo Cwa, predominante em grande parte da área, e Cwb, restrito a uma pequena porção noroeste da bacia. O clima pode ser descrito como mesotérmico (C), no qual a temperatura média do mês mais frio está entre -3°C e 18°C , com chuvas de verão (w) e verões quentes no tipo Cwa (mês mais quente com média igual ou superior a 22°C), e brandos no tipo Cwb, média do mês mais quente inferior a 22°C (FLAUZINO, 2012).

A região de Itajubá apresenta um regime pluviométrico característico de regiões monçônicas (Zhou e Lau, 1998; Garcia e Kayano, 2009), isto é, distribuição de precipitação ao longo do ano bem definida (Figura 10), com grande quantidade de chuvas na estação quente (verão) e pouca chuva na estação mais fria (inverno).

A série histórica (2000 - 2013) obtida do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) do INPE mostra que a precipitação ocorre com maior frequência nos meses de dezembro a fevereiro, conforme mostra a Figura 10. Além disso, a cidade de Itajubá também apresenta uma grande variabilidade da precipitação anual, o que caracteriza um potencial pluviométrico alto.

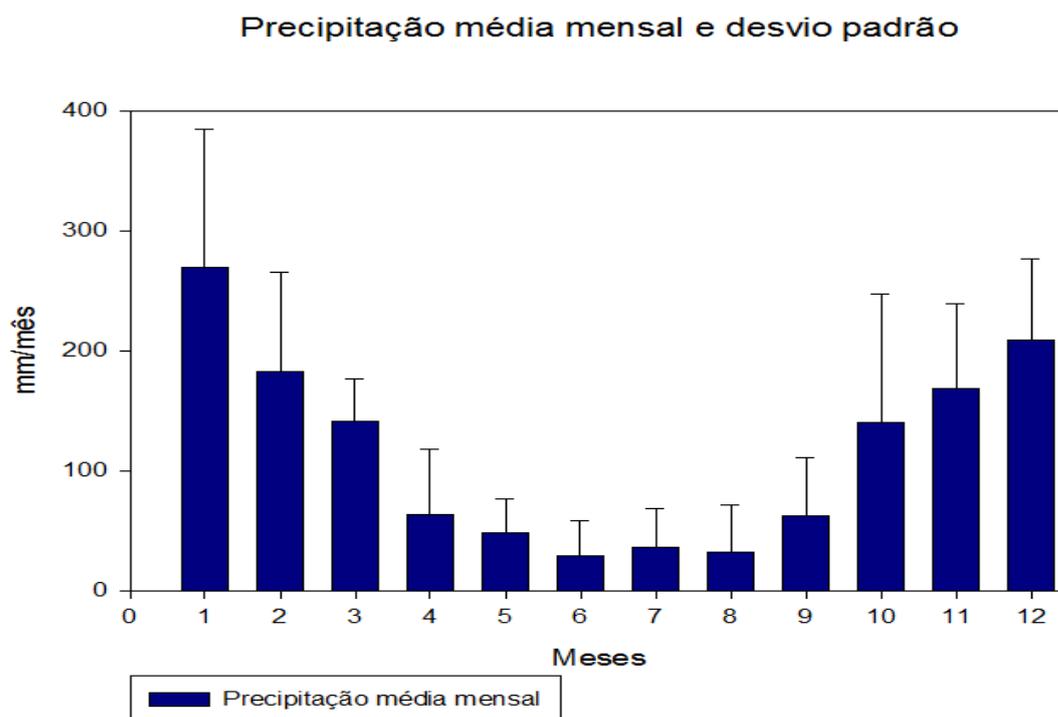


Figura 10 Precipitações médias mensais de Itajubá registradas no período de 2000 a 2013 (SINDA, 2015).

4.4 HIPSOMETRIA

Segundo Flauzino (2012), na área de estudo, a altitude varia entre 840 e 1.760 m, sendo que a porção oeste da bacia apresenta as menores altitudes, local de ocorrência das planícies fluviais e do núcleo urbano. Já as maiores elevações são observadas a leste, onde estão presentes a Serra do Juru e a Serra dos Toledos, como é apresentado na Figura 11.

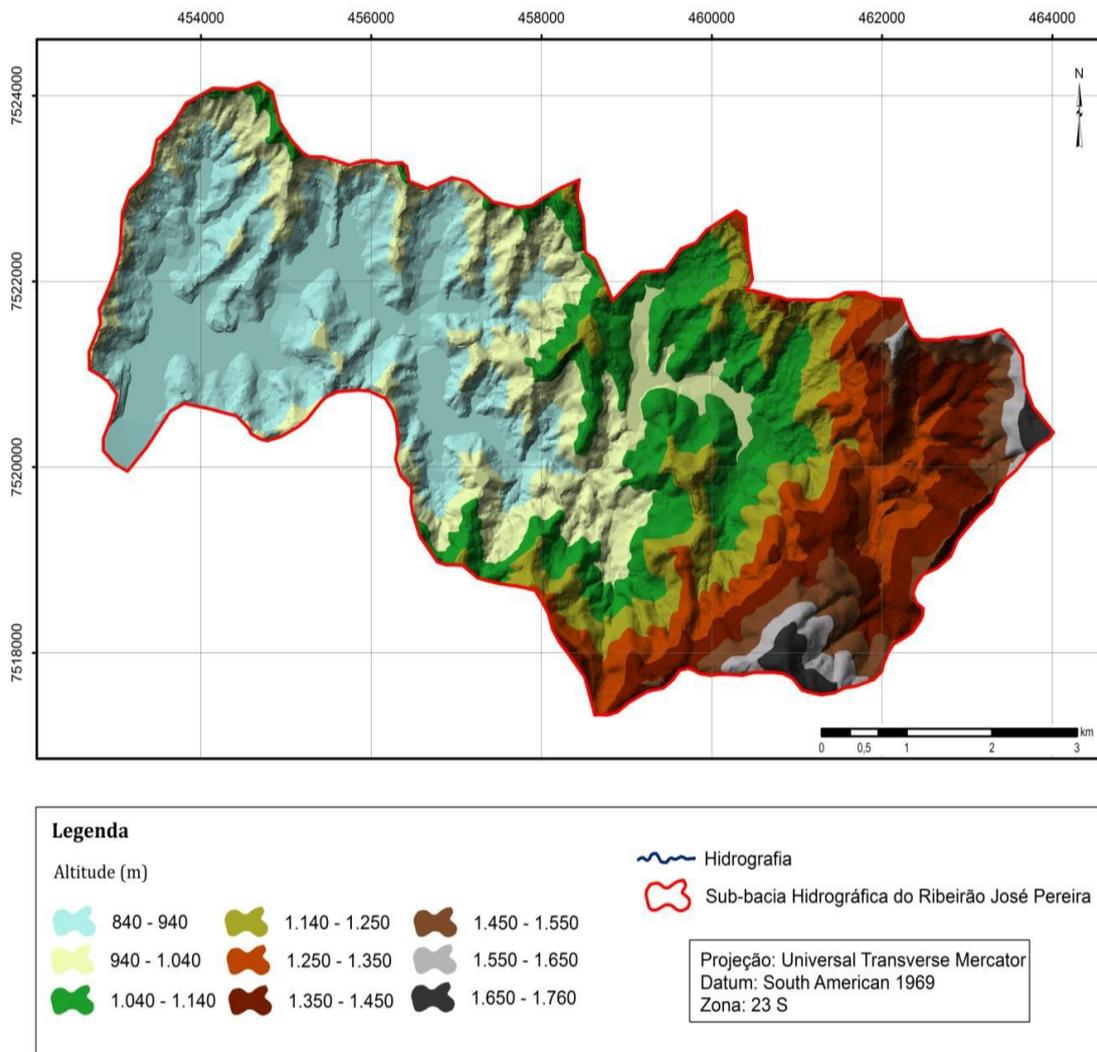


Figura 11 Mapa hipsométrico da bacia do Ribeirão José Pereira, (FLAUZINO, 2012).

4.5 MAPA DE SOLOS

O mapa de solos na escala 1:25.000, utilizado no trabalho é proveniente de um estudo realizado por Lima (2012). De acordo com a autora, a bacia do Ribeirão José Pereira possui oito unidades de mapeamento, considerando a classe do solo e sua posição no relevo, conforme apresentado na Figura 12.

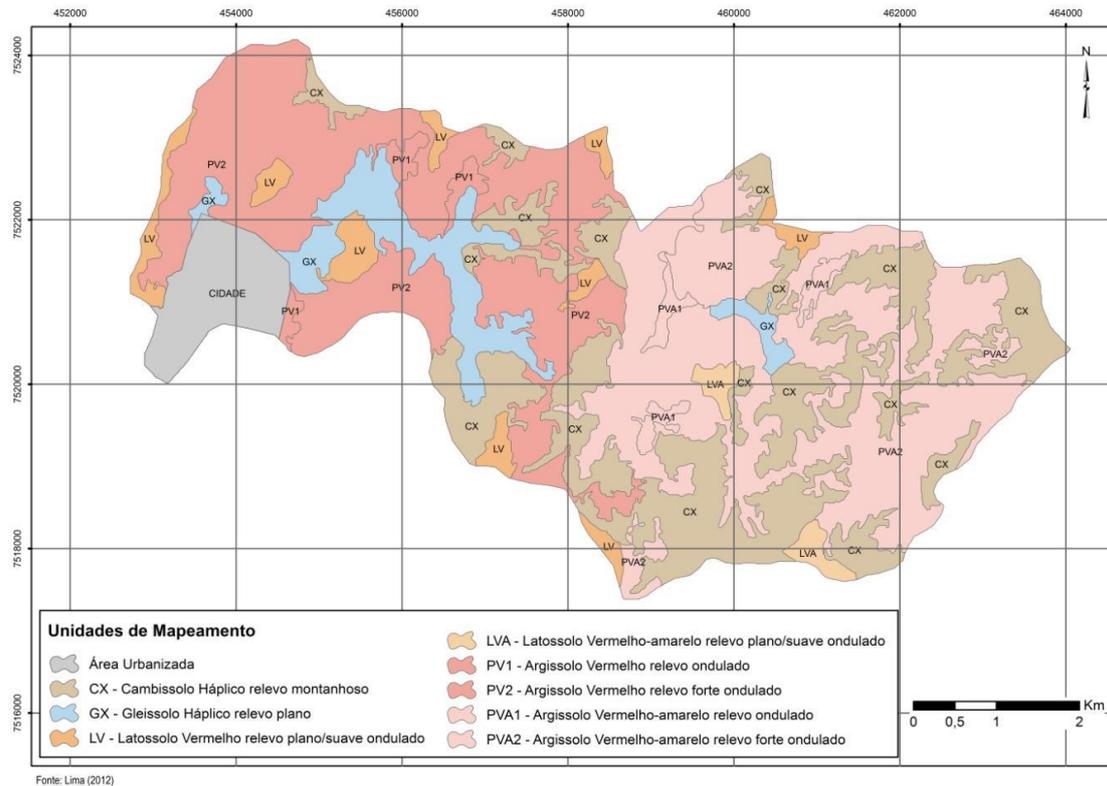


Figura 12 Mapa de solos da bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira (LIMA, 2012).

Lima (2012) determinou que os Cambissolos Háplicos ocupam 26% da área, predominando no relevo montanhoso. Os Gleissolos ocupam 7% da bacia, localizados nas baixadas, onde se formam zonas de acúmulo de água. Condicionando aos solos características hidromórficas, os Latossolos predominaram no relevo plano-ondulado, principalmente nos topos de morros, ocupando 6% da área. Os Argissolos constituíram a classe de solo dominante na bacia, representando 56% da área, ocupando o relevo ondulado e forte ondulado.

4.6 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O mapa de uso e ocupação do solo utilizado no trabalho é proveniente do estudo realizado por Flauzino (2012).

De acordo com o mapeamento de uso e ocupação do solo realizado por Flauzino (2012), as pastagens representam a forma de uso predominante na área de estudo, sendo aproximadamente, 50% da área. As matas ocupam cerca de 41%, dos quais, aproximadamente metade são os remanescentes de Mata Atlântica protegidos pela reserva biológica da Serra dos Toledos. A urbanização que engloba parte da cidade de Itajubá, representa 6,5% da área. O solo exposto que ocupa 1,10% da bacia, é

representado pelas estradas vicinais, áreas de empréstimo, área de estrada pavimentada (trecho da rodovia estadual MGC-383) que corta a bacia e, indiretamente, divide a área urbana da rural. A classe água abrange lagos e lagoas distribuídos, sendo que grande parte é utilizada para piscicultura. Na Figura 13 são apresentados os diferentes usos na bacia.

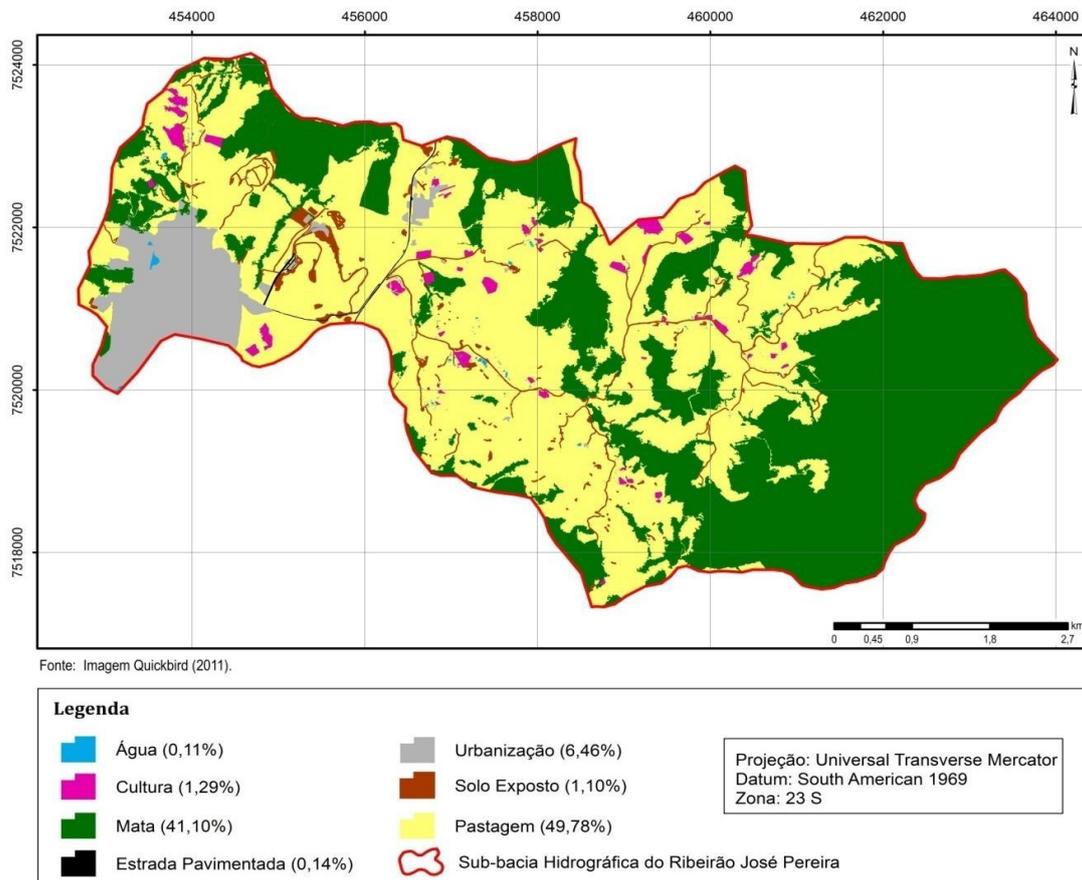


Figura 13 Mapeamento do uso e ocupação na bacia do ribeirão José Pereira, (FLAUZINO, 2012).

4.7 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

O Modelo Digital de Elevação do terreno foi obtido do site da Embrapa, Brasil em Relevo, com resolução espacial de 90 metros, onde a quadrícula do SRTM utilizada foi a de código SF-23-Y-B, na escala 1:250.000, que se apresenta no Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS84.

4.8 DADOS DE CLIMA E HIDROLOGIA

Dentre os dados de entrada do modelo SWAT são necessários dados climáticos. O usuário pode entrar com parâmetros de um posto meteorológico e a ferramenta Weather Generator gera séries sintéticas, sendo também utilizado para preencher falhas

nas séries observadas fornecidas pelo usuário. Pode-se ainda, serem utilizadas séries históricas em intervalos de tempo sub-diário, diário ou mensal.

São utilizados dados diários de precipitação, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar.

Como a estação do CEPreMG possuía uma série de dados nos anos de 2010 a 2016, as entradas dos dados climáticos diários serão utilizadas, com a ressalva da necessidade do preenchimento de falhas encontradas nas séries. Verificou-se, além do preenchimento, a necessidade de se obter os dados de precipitação diferentes daqueles encontrados na estação da Unifei e, para isso, foram utilizados dados de precipitação retirados da Hidroweb (ANA), da cidade de Maria da Fé, cidade vizinha a Itajubá, da estação Maria da Fé com o código 02245069, por possuir maior consistência, Figura 14.

MARIA DA FÉ (02245069)

Dados da Estação	
Código	02245069
Nome	MARIA DA FÉ
Código Adicional	-
Bacia	RIO PARANÁ (6)
Sub-bacia	RIO GRANDE (61)
Rio	-
Estado	MINAS GERAIS
Município	MARIA DA FÉ
Responsável	ANA
Operadora	ANA
Latitude	-22:18:0
Longitude	-45:23:0
Altitude (m)	1180
Área de Drenagem (km ²)	-

Figura 14 Informações da Estação pluviométrica de Maria da Fé.

Na Figura 15 tem-se um mapa com os limites municipais, a bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira e as estação do CEPreMG e a estação pluviométrica de Maria da Fé. A Tabela 9 contém cada um dos dados climáticos necessários a simulação do modelo e suas respectivas unidades.

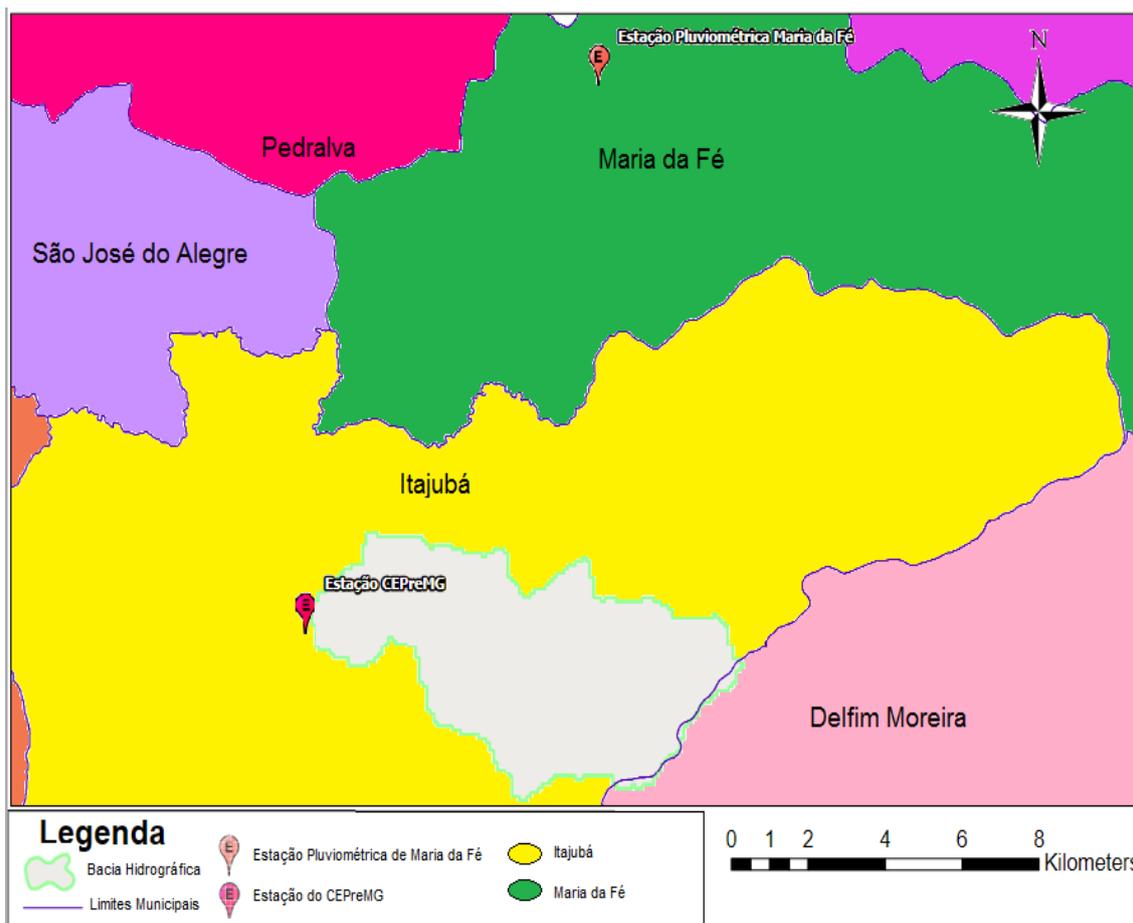


Figura 15 Localização das estações utilizadas para os dados climáticos.

Tabela 9 Parâmetros climáticos de entrada no modelo e respectivas unidades.

Parâmetro climático	Unidade de entrada no SWAT
Temperatura máxima e mínima	[°C]
Precipitação	[mm]
Umidade relativa	[fração]
Radiação solar	[MJ/m ²]
Velocidade do vento	[m/s]

Ao inserir uma estação no banco de dados do modelo SWAT são necessárias as seguintes informações: localização geográfica da estação, altitude, número de anos dos dados acumulados, média mensal de temperatura máxima diária (TMPMX), média mensal de temperatura mínima diária (TMPMN), desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX), desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN), média mensal da precipitação total (PCPMM) desvio padrão para a precipitação diária do mês (PCPSTD), probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o determinado mês (PR_W1), probabilidade de dias

úmidos seguidos de dias úmidos para o determinado mês (PR_W2), média mensal de dias de precipitação 30 (PCPD), valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês (RAINHHMX), média de radiação solar diária para um determinado mês (SOLARAV), media diária do ponto de orvalho para determinado mês (DEWPT), média diária da velocidade do vento para determinado mês (WNDAY).

4.9 CURVA-CHAVE DO POSTO FLUVIOMÉTRICO

Para obtenção da curva-chave são necessários parâmetros geométricos da seção do ribeirão, a saber, raio hidráulico, perímetro molhado, declividade da linha d'água da seção e o coeficiente n de Manning, além de dados de nível d'água, que foram obtidos pela batimetria da seção de controle.

Em razão da indisponibilidade de medições de descarga no local, a curva-chave foi construída utilizando a equação de Manning para escoamentos em canais, dada por:

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_0}} = A \cdot R_h^{2/3} \quad \text{Equação [2]}$$

Onde:

n é o coeficiente de Manning da rugosidade das paredes do canal;

A é a área molhada;

Rh é o raio hidráulico;

I₀ é a declividade da linha d'água do canal.

4.10 SOFTWARES UTILIZADOS

Para realização do trabalho foram utilizados o ArcGis, que é um sistema de informação geográfica (SIG) que trabalha com mapas e informações geográficas. Ele é usado na criação e utilização de mapas, compilação de dados geográficos, análise de informações mapeadas, utilizando mapas e informações geográficas em uma gama de aplicações.

O ArcSWAT 2012, é um modelo de escala da bacia hidrográfica desenvolvido para quantificar o impacto das práticas de gestão dos solos em grandes bacias hidrográficas. Também um modelo hidrológico que pode simular os seguintes componentes: escoamento superficial, fluxo de retorno, percolação, evapotranspiração,

o crescimento das culturas e irrigação, o fluxo de águas subterrâneas, nutrientes e pesticidas.

O modelo hidrossedimentológico SWAT foi desenvolvido em 1996 pelo Agricultural Research Service e pelo Texas A&M University. É um modelo matemático de parâmetro distribuído, o qual permite que diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água em bacias hidrográficas agrícolas (NEVES *et al.* 2006 *apud* PEREIRA, 2010).

O modelo opera em passo de tempo diário, ou sub-diário e simula longos períodos, para computar os efeitos de diferentes cenários de manejo. Os resultados mais importantes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (NEVES *et al.* 2006 *apud* PEREIRA, 2010).

4.11 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a etapa do trabalho onde serão medidos alguns parâmetros, principalmente a vazão que será gerada a partir dos dados de nível d'água medidos na estação fluviométrica UNIFEI, e os dados climáticos necessários como velocidade do vento por um anemômetro, radiação solar medida por um piranômetro também, termômetros de máxima e de mínima medindo as temperaturas máximas e mínimas, entre outros, instalados na estação meteorológica operada pelo Centro de Previsão e Estudos de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG).

Foi necessário ainda a utilização de um DGPS na realização da batimetria da seção de controle, seção onde foi instalado o sensor de nível, na estação Unifei. Os equipamentos são apresentados na Figuras 16 a 18.



Figura 16 Sensor de nível d'água (AGSOLVE, 2016).



Figura 17 DGPS (SURVEY SERVICES, 2016)



Figura 18 Estação meteorológica do CEPreMG.

4.12 CENÁRIOS

Foram definidos cinco cenários de uso e ocupação do solo, sendo eles:

Cenário 1 - Bacia Hidrográfica com os usos identificados por Flauzino (2012), representando o estado atual, com as pastagens degradadas, ou seja, em más condições, característica deste uso, mencionada pela autora.

Cenário 2 - Mesmas condições de uso e ocupação do solo do cenário anterior, prevendo o manejo agrícola e posterior recuperação da pastagem degradada, tendo como resultado pastagens em boas condições.

Cenário 3 - Substituição dos usos identificados por Flauzino (2012) para a bacia hidrográfica por floresta mista, a partir do reflorestamento. O objetivo é a comparação entre os cenários mesmo que, isto seja algo impossível de ocorrer.

Cenário 4 - Recuperação das APPs de margens de rios, baseada no Novo Código Florestal, onde foi definido que para rios com largura inferior a 10 metros, a faixa marginal deve ser de 30 metros.

Cenário 5 - Crescimento urbano, tendência observada na área da bacia após a transferência da prefeitura para dentro da bacia, sendo limitado por topos de morros e principalmente pela Rodovia Itajubá - Maria da Fé e a Reserva Biológica da Serra dos Toledos. Substituição de pastagem, solo exposto e agricultura, por urbanização de baixa a média densidades.

5 RESULTADOS

5.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA

Para início dos trabalhos com o modelo SWAT é necessária a delimitação da bacia hidrográfica que se deseja obter os resultados e, para isso, é necessária a entrada do modelo digital de elevação (MDE). No presente trabalho utilizou-se o SRTM do site da Embrapa, com resolução espacial de 90 metros e com isso foi gerada pelo modelo a bacia hidrográfica, conforme apresenta a Figura 19. Foi escolhido um ponto para que o modelo pudesse definir a bacia hidrográfica, na seção de controle onde está localizado o posto fluviométrico, nas coordenadas 22°24'49.74"S e 45°27'3.33"O. A área resultante dessa bacia hidrográfica foi de aproximadamente 3505 hectares.

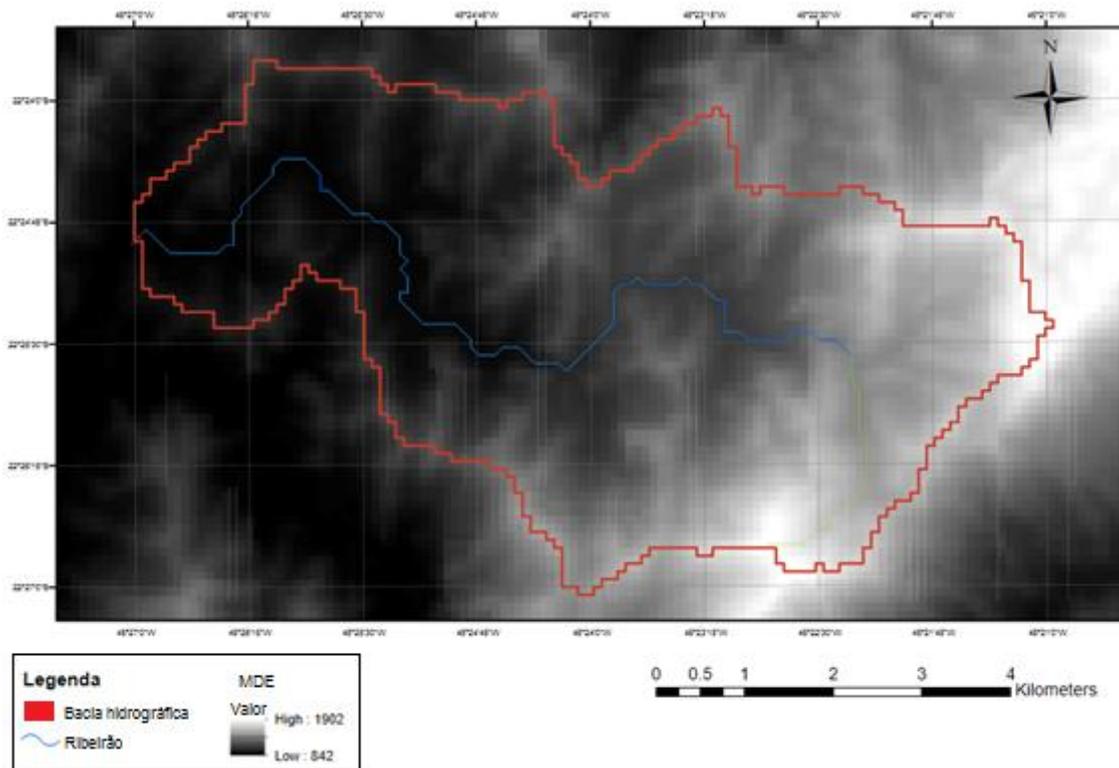


Figura 19 Bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira no posto fluviométrico UNIFEL.

5.2 DETERMINAÇÃO DO MAPA DE DECLIVIDADES DA BACIA

Para delimitação das unidades de resposta hidrológicas (HRUs) o modelo necessita de uma combinação de três características da bacia. Uma delas é a declividade da bacia, a qual pode ser gerada com o MDE do terreno. Foi determinado cinco classe de declividades, a saber, de 0 - 10%, 10 - 20%, 20 - 30%, 30 - 45% e declividades

superiores a 45%, ou seja, 5 classes de declividades, a Figura 20 apresenta o resultado gerado pelo modelo.

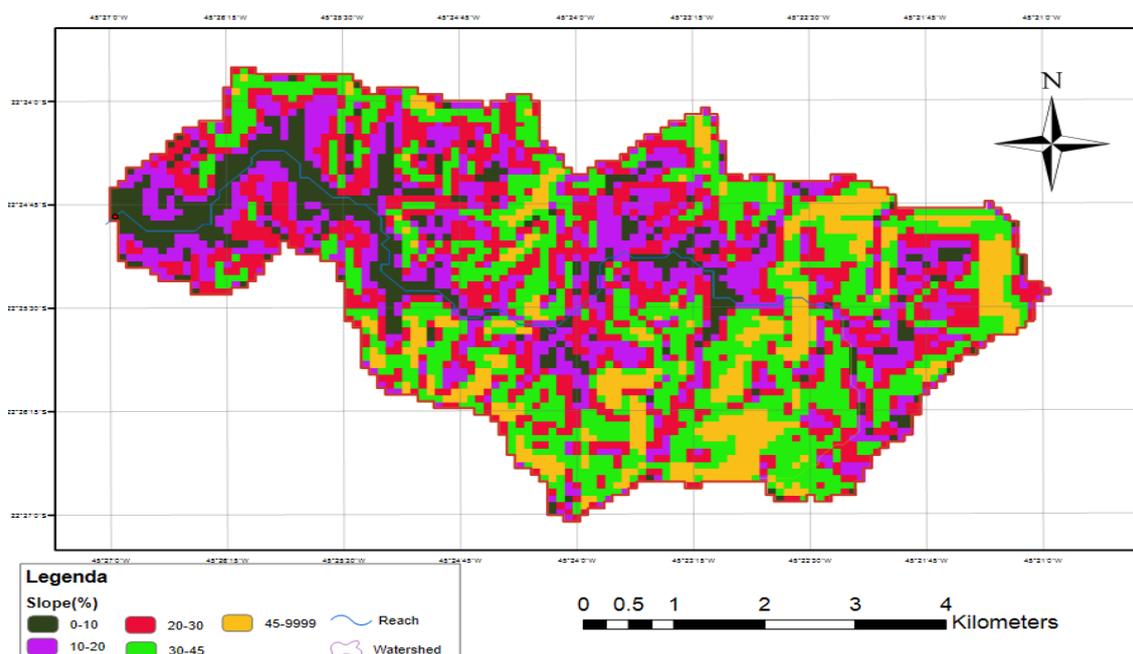


Figura 20 Banco de dados de declividades da bacia do Ribeirão José Pereira

5.3 ADEQUAÇÃO DO BANCO DE DADOS DE SOLO DO SWAT

Como o modelo SWAT não foi desenvolvido para o Brasil foi necessário a adição dos solos encontrados na bacia do ribeirão José Pereira, na biblioteca de solos do modelo. Para isso, e alguns parâmetros dos solos foram pesquisados na literatura para que tais solos pudessem ser inseridos. O Quadro 1 apresenta quais são esses parâmetros de entrada dos solos.

Quadro 2: Características Físicas dos solos. Fonte: Baldissera, 2005.

Atributos	Significado
SNAM	Classificação do solo (Nome dado a cada classe)
NLAYERS	Número de layers de informação (horizontes)
HYDGRP	Grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C, D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima de solo que a raiz alcança (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (fração)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade do solo (g/cm ³)
SOL_AWC	Capacidade de água do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (% peso solo)
CLAY	Porcentagem de argila no solo (% peso solo)
SILT	Porcentagem de silte no solo (% peso solo)
SAND	Porcentagem de areia no solo (% peso solo)

Continua.

Continuação.

ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (% peso solo)
SOL_ALB	Albedo do solo (fração)
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo (0,013 t.m ² .h/m ³ .t.cm)

Na literatura foram encontradas tais informações, de diferentes autores, e por esse motivo, cada classe de solo possui diferente número de Layers, sendo que um destes solos tem apenas 1 Layer de informações e outros 4 ou 5 Layers. Os Layers nada mais são do que camadas de diferentes profundidades com as características citadas no Quadro 2. O motivo da utilização dessas informações com 1, 4 ou 5 camadas é a dificuldade de encontrar tais informações a serem inseridas no banco de dados do modelo.

Foram inseridos na biblioteca os solos identificados por Lima (2012): Argissolo, Cambissolo, Gleissolo, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo. As Tabelas 10 a 14 apresentam os valores dessas características e o banco de dados dos solos encontrados por Lima (2012) da bacia do ribeirão José Pereira, após ser inserido SWAT, conforme apresenta a Figura 21.

Tabela 10: Características Físicas do Solo. Fonte: Uzeika, 2009.

Atributos	Layer 1
SNAM	Argissolo
NLAYERS	1
HYDGRP	A
SOL_ZMX	300
ANION_EXCL	0,560
SOL_Z	300
SOL_BD	1,1
SOL_AWC	0,17
SOL_K	293,01
SOL_CBN	2,86
CLAY	31,37
SILT	43,02
SAND	25,61
ROCK	17,13
SOL_ALB	0,09
USLE_K	0,32

Tabela 11: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.

Atributos	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
SNAM	Gleissolo	Gleissolo	Gleissolo	Gleissolo
NLAYERS	4	4	4	4
HYDGRP	B	B	B	B
SOL_ZMX	1300	1300	1300	1300
ANION_EXCL	0,39	0,39	0,39	0,39
SOL_Z	80	450	750	1300
SOL_BD	1,4	1,50	1,60	1,70
SOL_AWC	1,0	0,1	0,70	0,50

Continua.

Continuação.

SOL_K	12,50	5,0	40	12,50
SOL_CBN	2,80	0,70	0,30	0,30
CLAY	26,40	37,80	25,60	21,50
SILT	71,50	56,30	62,40	57,30
SAND	2,10	5,90	12,00	21,20
ROCK	0	0	0	0
SOL_ALB	0,16	0,16	0,16	0,16
USLE_K	0,31	0,30	0,26	0,21

Tabela 12: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
SNAM	Latossolo Vermelho				
NLAYERS	5	5	5	5	5
HYDGRP	B	B	B	B	B
SOL_ZMX	940	940	940	940	940
ANION_EXCL	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
SOL_Z	110	290	670	940	1500
SOL_BD	1,60	1,5	1,70	1,40	1,50
SOL_AWC	0	0,10	0	0	0,10
SOL_K	90	90	90	12,50	12,50
SOL_CBN	0,80	0,50	0,30	0,30	0,20
CLAY	12,60	14,50	19,80	24,00	23,80
SILT	9,40	5,60	9,40	11,10	9,80
SAND	78,00	79,90	70,80	64,90	66,40
ROCK	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0,15	0,15	0
USLE_K	0,12	0,13	0,13	0,14	0

Tabela 13: Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.

Atributos	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
SNAM	Latossolo Vermelho Amarelo	Latossolo Vermelho Amarelo	Latossolo Vermelho Amarelo	Latossolo Vermelho Amarelo
NLAYERS	4	4	4	4
HYDGRP	B	B	B	B
SOL_ZMX	1500	1500	1500	1500
ANION_EXCL	0,38	0,38	0,38	0,38
SOL_Z	360,0	760	1210	1500
SOL_BD	1,50	1,70	1,70	1,60
SOL_AWC	0,30	0,30	0,40	0,40
SOL_K	12,50	12,50	12,50	12,50
SOL_CBN	1,10	0,20	0,50	0,40
CLAY	30,30	29,80	29,50	35,60
SILT	16,00	14,30	13,80	15,90
SAND	53,70	55,90	56,70	48,50
ROCK	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K	0,13	0,14	0,14	0,14

Tabela 14 Características Físicas do Solo. Fonte: Baldissera, 2005.

Atributos	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
SNAM	Cambissolo	Cambissolo	Cambissolo	Cambissolo	Cambissolo
NLAYERS	5	5	5	5	5
HYDGRP	B	B	B	B	B
SOL_ZMX	1100	1100	1100	1100	1100

Continua.

ANION_EXCL	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
SOL_Z	300	600	800	1100	1170
SOL_BD	1,60	1,40	1,40	1,80	1,40
SOL_AWC	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18
SOL_K	12,50	12,50	12,50	40,00	12,50
SOL_CBN	1,40	0,60	0,40	0,40	0,30
CLAY	36,30	34,00	28,40	26,80	27,00
SILT	18,00	35,70	37,70	43,70	39,30
SAND	93,40	30,30	33,90	29,50	33,70
ROCK	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0	0,15	0
USLE_K	0,05	0,16	0,17	0,18	0

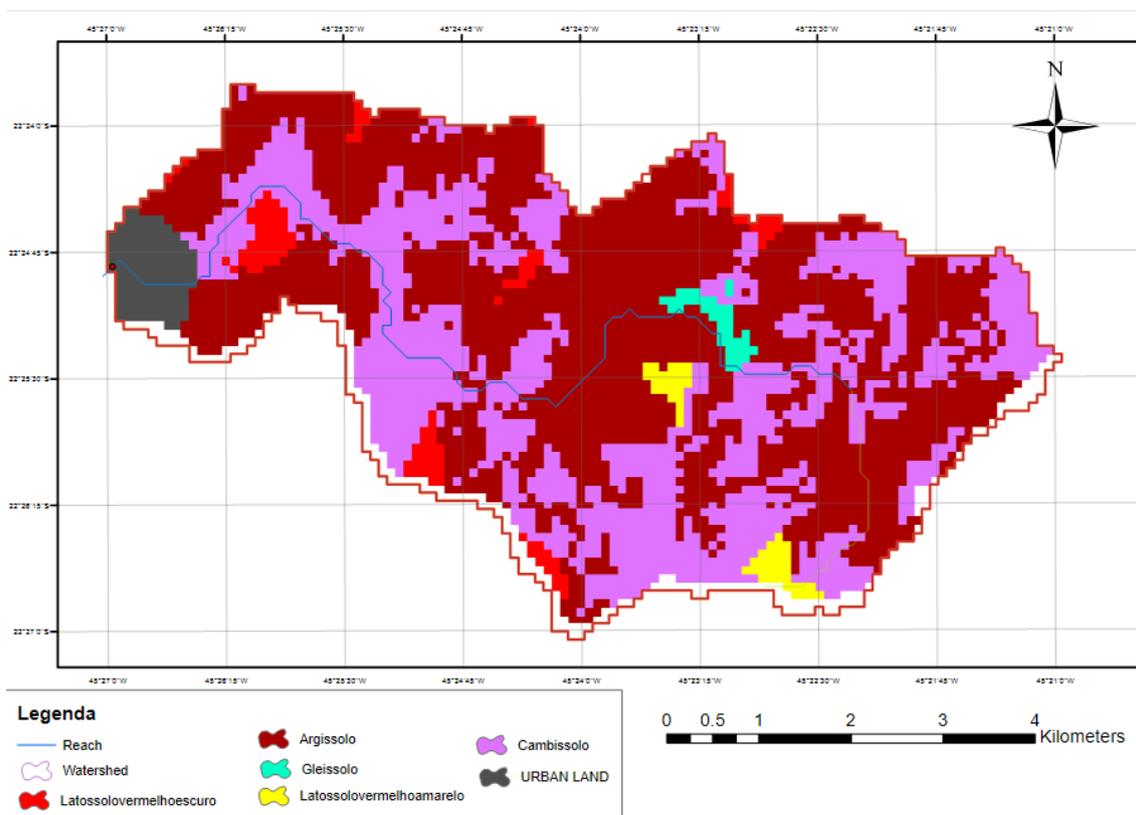


Figura 21 Solos da bacia do ribeirão José Pereira após inserção no SWAT.

Como pode ser observado na Figura 21, ocorreu uma diferença na área da bacia gerada pelo modelo SWAT e a área do shapefile retirado do trabalho de Lima (2012), observada nos locais próximos às extremidades em branco, locais onde as informações seriam perdidas e, com isso, surgiu a necessidade de revisão de mapa.

A revisão foi feita da seguinte maneira: polígonos com os solos inerentes as partes faltantes foram gerados do Google Earth, e unidos ao shapefile original no ArcGis. Após essa revisão o banco de dados dos solos foi inserido no SWAT e o resultado final é apresentado na Figura 22.

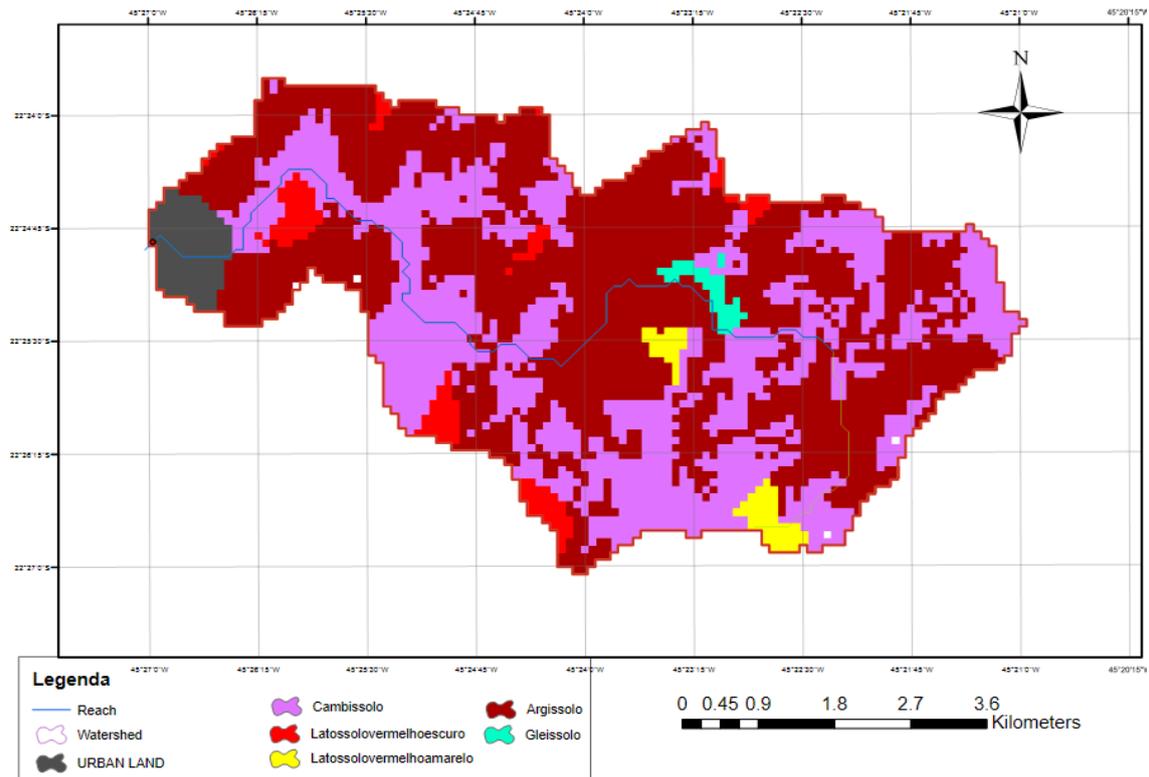


Figura 22 Revisão dos solos encontrados na bacia do ribeirão José Pereira.

5.4 ASSOCIAÇÃO DO USO DO SOLO NO MODELO SWAT

O modelo requer uma reclassificação quanto aos usos encontrados na bacia, principalmente no que diz respeito ao ciclo de cultura, urbanização, desmatamentos, dentre outros. Neste caso, o modelo oferece em seu banco de dados, opções sobre os mais variados usos do solo.

Portanto, não foi necessário a adição na biblioteca e sim uma associação com os usos encontrados na bacia, de acordo com o mapeamento realizado por Flauzino (2012). A Figura 23 apresenta o banco de dados do uso do solo após ser inserido no SWAT, onde os usos encontrados foram: Urbano (URML), Solo exposto (AGRC), Pastagem (PAST), Mata (FRST), Estrada pavimentada (UTRN), Agricultura (AGRL) e Água (WATR).

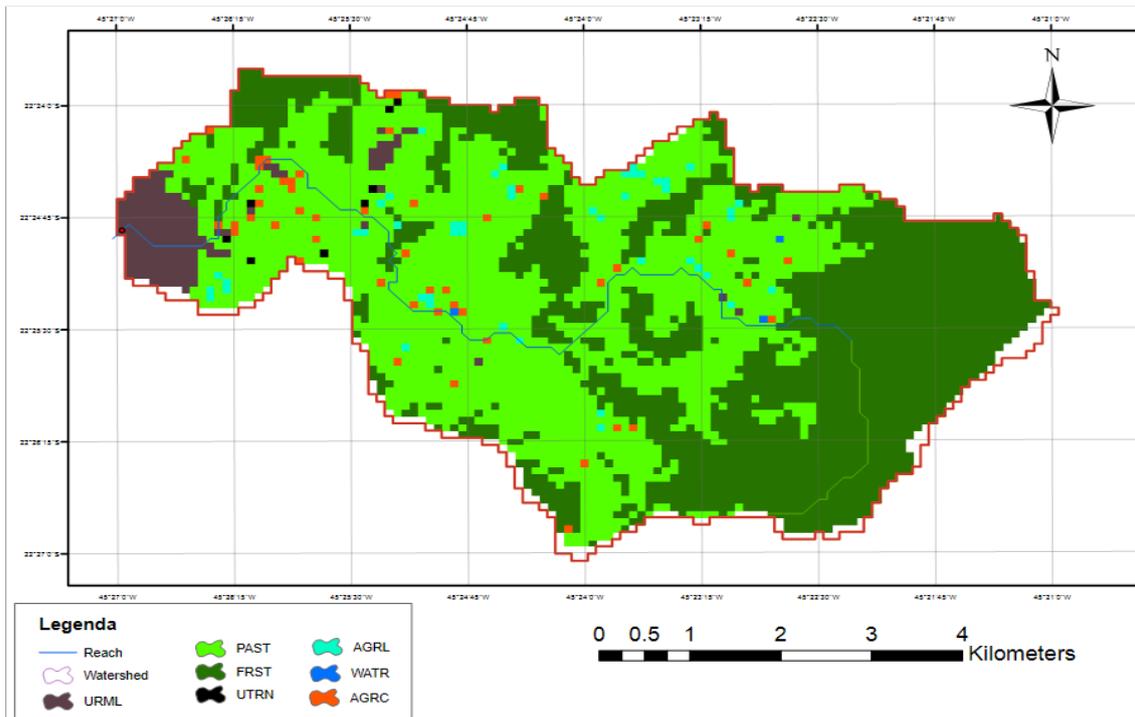


Figura 23 Uso do solo na bacia do ribeirão José Pereira após inserção no SWAT.

Novamente observa-se a necessidade de revisão do mapa de uso do solo, Figura 23, devido a locais em branco próximos aos limites da bacia. O mesmo procedimento de preenchimento com polígonos gerados no Google Earth foi realizado e o resultado final do banco de dados do uso do solo é apresentado na Figura 24.

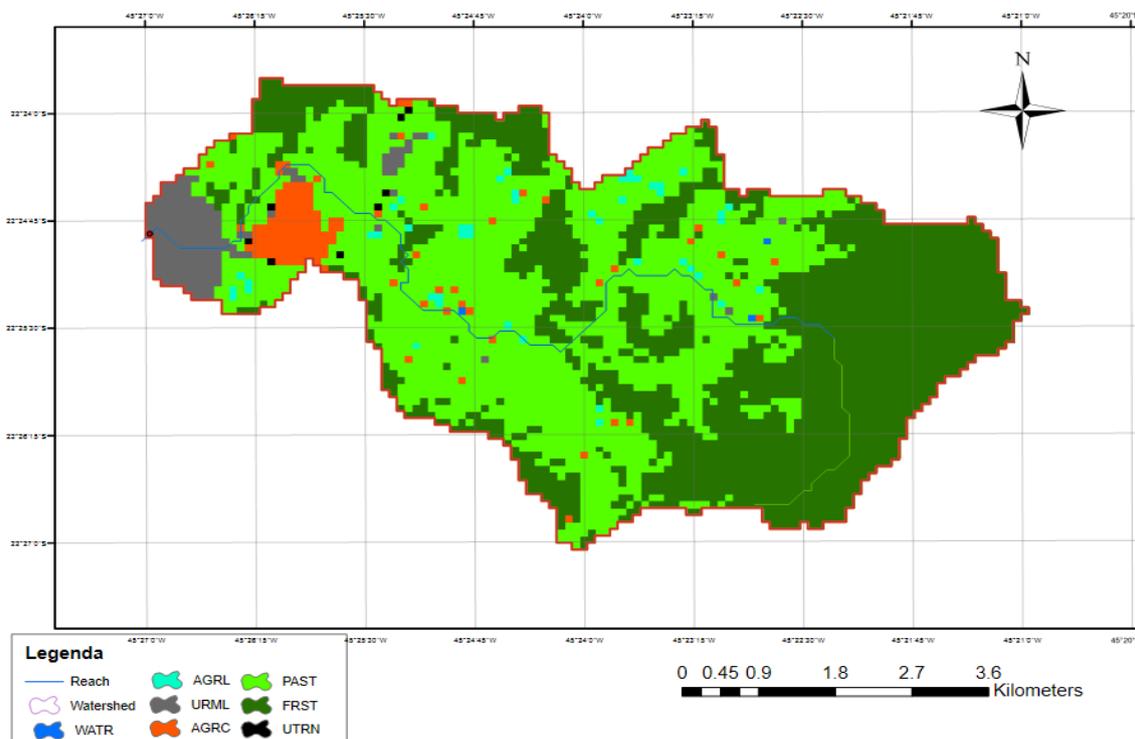


Figura 24 Revisão do uso do solo da bacia do ribeirão José Pereira.

Após a revisão os valores de cada um dos usos identificados na área da bacia do Ribeirão José Pereira passam a ser os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 Usos encontrados na bacia em estudo.

Uso do solo (SWAT)	Adaptação ao trabalho	Área em %
Residential-Med/Low Density - URML	Uso Urbano	6.79
Agricultural Land-Close-Grown - AGRC	Solo Exposto	2.76
Pasture - PAST	Pastagem	47.189
Forest Mixed - FRST	Mata	41.709
Transportation - UTRN	Estrada Pavimentada	0.161
Agricultural Land-Generic - AGRL	Agricultura	1.29
Water - WATR	Água	0.101

5.5 DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICAS (HRUs)

Após a combinação dos planos de informação (uso do solo, tipo de solo e declividade), é necessário que sejam geradas as unidades de respostas hidrológicas (URHs), que nada mais são que subáreas geradas pelo SWAT, com uma única combinação dessas três características para cada subárea, ou seja, o modelo faz uma combinação de características semelhantes encontradas na área em estudo, e são geradas subáreas representadas por números e cores diferentes.

O modelo fornece duas opções de distribuição de HRUs:

Dominant HRU: em cada sub-bacia, a combinação uso do solo e o tipo de solo que apresentarem maior extensão, é considerado para toda a área da sub-bacia, e os demais tipos serão descartados;

Multiple HRUs: múltiplos HRUs serão estabelecidos. Serão criados várias combinações de usos e tipos de solos para cada sub-bacia gerada, de acordo com o nível de sensibilidade escolhida pelo usuário do programa.

Para a elaboração das HRUs, caso a escolha seja a primeira opção, envolve dois passos: primeiro os usos do solo das sub-bacias são identificados. Uma vez determinados, os diferentes tipos de solos são selecionados. Dessa forma, cada HRU estabelecida apresentará uma combinação única entre um tipo de uso do solo com um tipo de solo.

Para as simulações realizadas nesse trabalho, optou-se pelo estabelecimento das múltiplas HRUs para evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo e aos tipos de solos que são encontrados.

Além disso, o modelo necessita de algumas definições dos limites superiores dessas três características supracitadas, ou seja, valores inferiores a estes escolhidos seriam excluídos. Na documentação do SWAT 2012, são sugeridos: 20% para o uso do solo, 10% para a classe do solo e 20% para a classe de declividade, porém os valores utilizados foram, 2%, 10% e 20%, conforme apresenta a Figura 25.

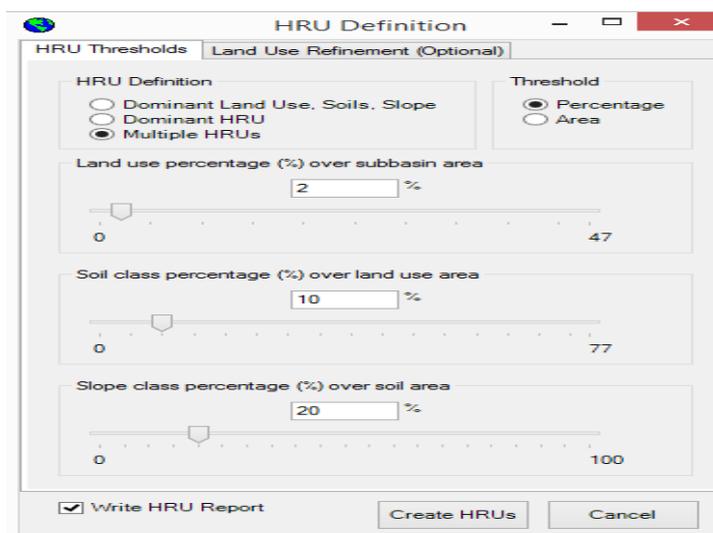


Figura 25 Definições sugeridas pelo SWAT para as HRUs.

Após serem escolhidas as definições, o modelo SWAT gerou 21 HRUs com as seguintes combinações de solo, uso do solo e declividade, conforme pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 Unidades de resposta hidrológica

URH	Uso do solo	Tipo de solo	Classe de declividade
1	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	20 - 30%
2	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	10 - 20%
3	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	0 - 10%
4	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	10 - 20%
5	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	0 - 10%
6	Solo exposto	Argissolo	20 - 30%
7	Solo exposto	Argissolo	10 - 20%

Continua

8	Solo exposto	Cambissolo	0 - 10%
9	Solo exposto	Cambissolo	10 - 20%
10	Solo exposto	Latossolo Vermelho	10 - 20%
11	Solo exposto	Latossolo Vermelho	20 - 30%
12	Pastagem	Argissolo	20 - 30%
13	Pastagem	Argissolo	10 - 20%
14	Pastagem	Argissolo	30 - 45%
15	Pastagem	Cambissolo	30 - 45%
16	Pastagem	Cambissolo	20 - 30%
17	Floresta mista	Argissolo	20 - 30%
18	Floresta mista	Argissolo	30 - 45%
19	Floresta mista	Argissolo	10 - 20%
20	Floresta mista	Cambissolo	30 - 45%
21	Floresta mista	Cambissolo	< 45%

Finalmente pode ser apresentado na Figura 26 a distribuição das unidades de resposta hidrológica na área da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira.

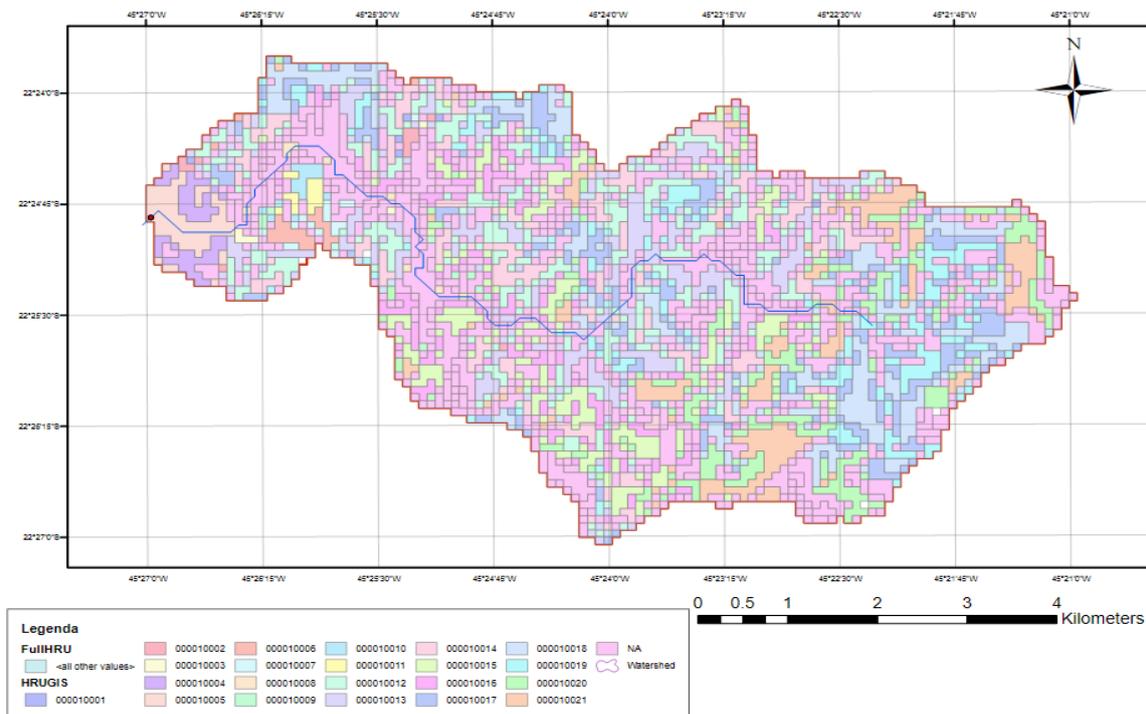


Figura 26 Unidades de resposta hidrológicas (HRUs).

5.6 DADOS CLIMÁTICOS

Para os dados climáticos necessários, citados anteriormente, foi decidido que seriam utilizados os dados diários, sendo feito esse ajuste, já que os dados da estação do CEPReMG, estavam de 10 em 10 minutos, ainda foram escolhidos mais de 6 anos para a simulação inicial, de janeiro de 2010 à julho de 2016, com exceção dos dados de precipitação que foram retirados como citado anteriormente do site do HidroWeb, para a estação de Maria da Fé (código 02245069).

Foi necessário o preenchimento de falhas observadas na série de dados e, para isso, foi adotado o procedimento de preenchimento com a média naquele determinado dia, ou seja, se em 1º de janeiro de um determinado ano estava sem o dado, o valor adotado seria a média dos outros 6 anos e assim por diante. Tal procedimento foi adotado devido ao pequeno número de falhas.

Com isso, pode-se apresentar as Figuras 27 a 31 na forma de gráficos, com esses dados, para melhor observação do comportamento da série de dados.

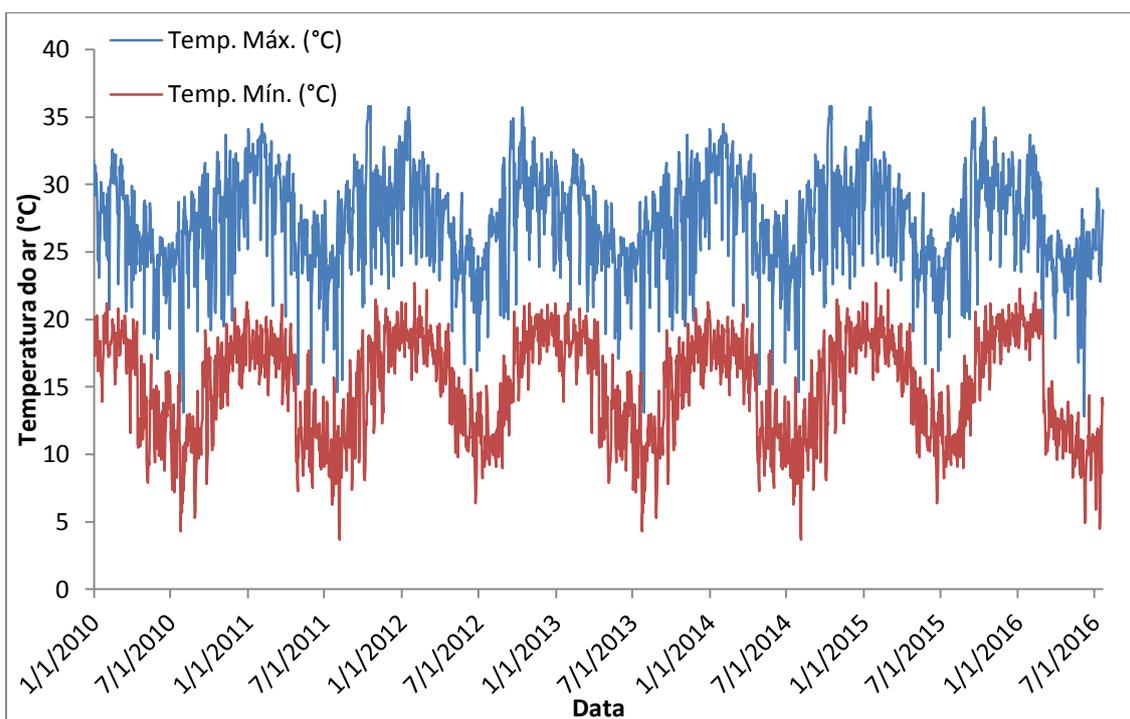


Figura 27 Série de dados de temperaturas máximas e mínimas de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).

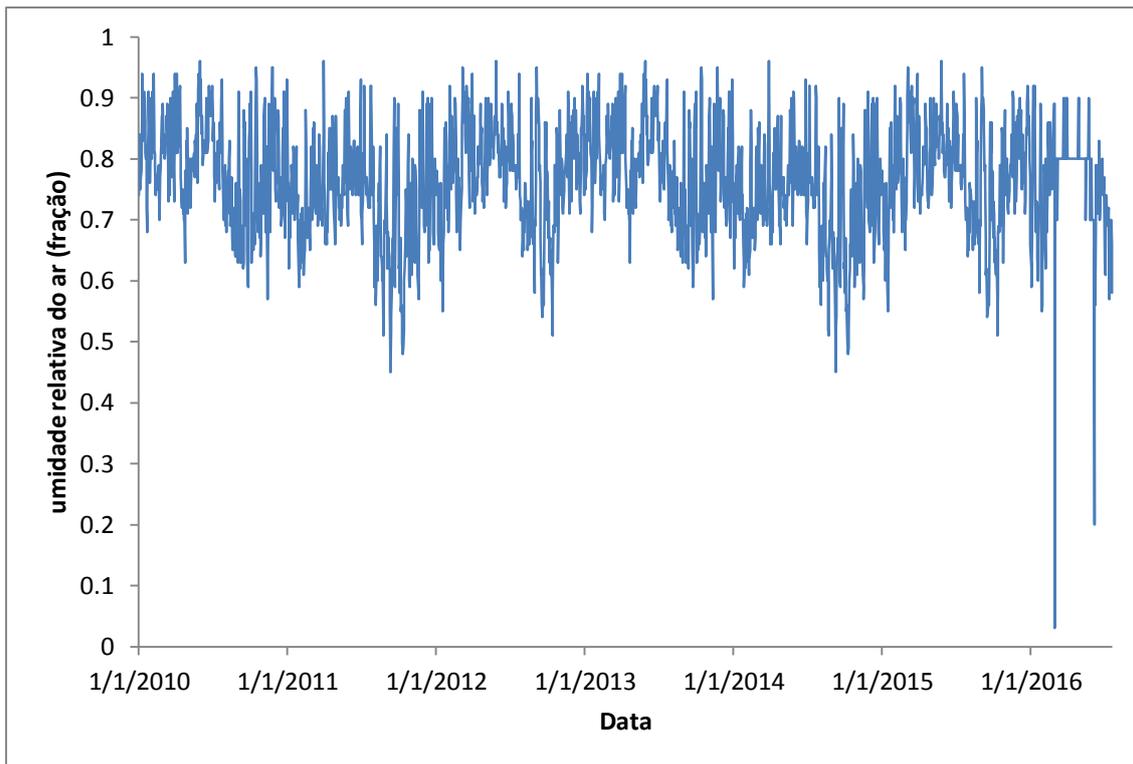


Figura 28 Série de dados diários de umidade relativa do ar de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).

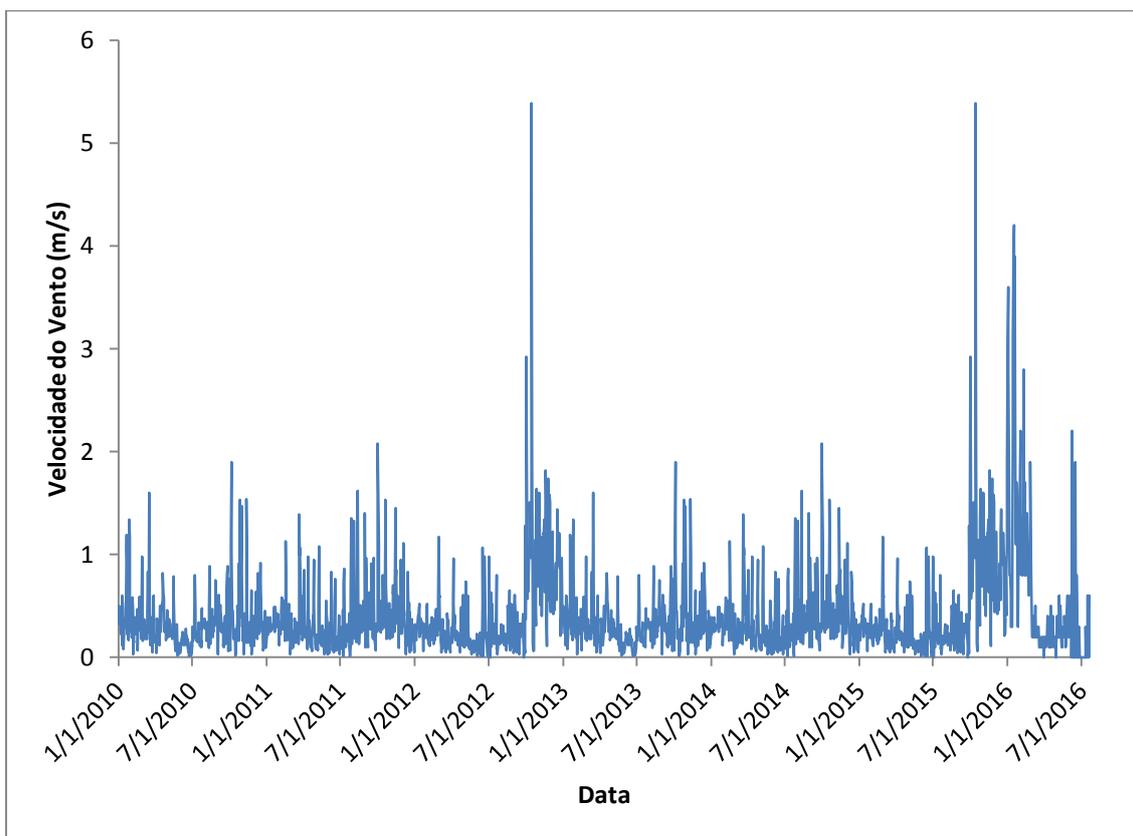


Figura 29 Série de dados diários da velocidade do vento de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).

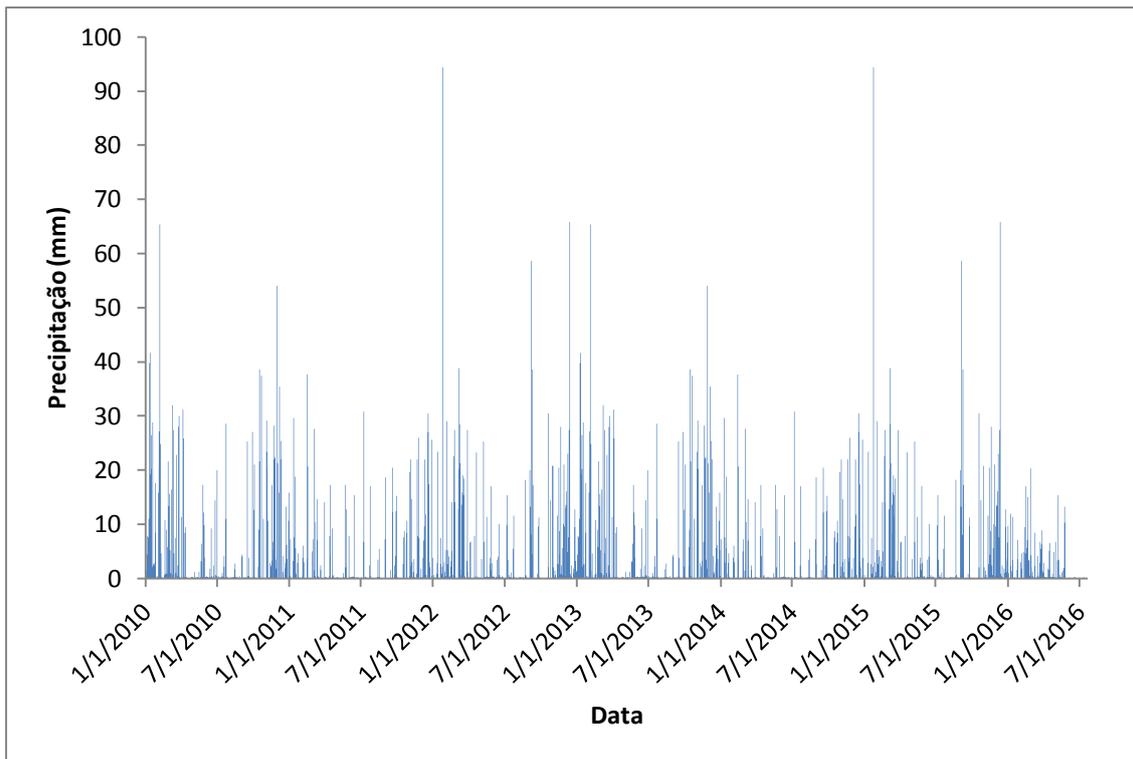


Figura 30 Série de dados diários de precipitação de 2010 à 2016, (HIDROWEB, 2016).

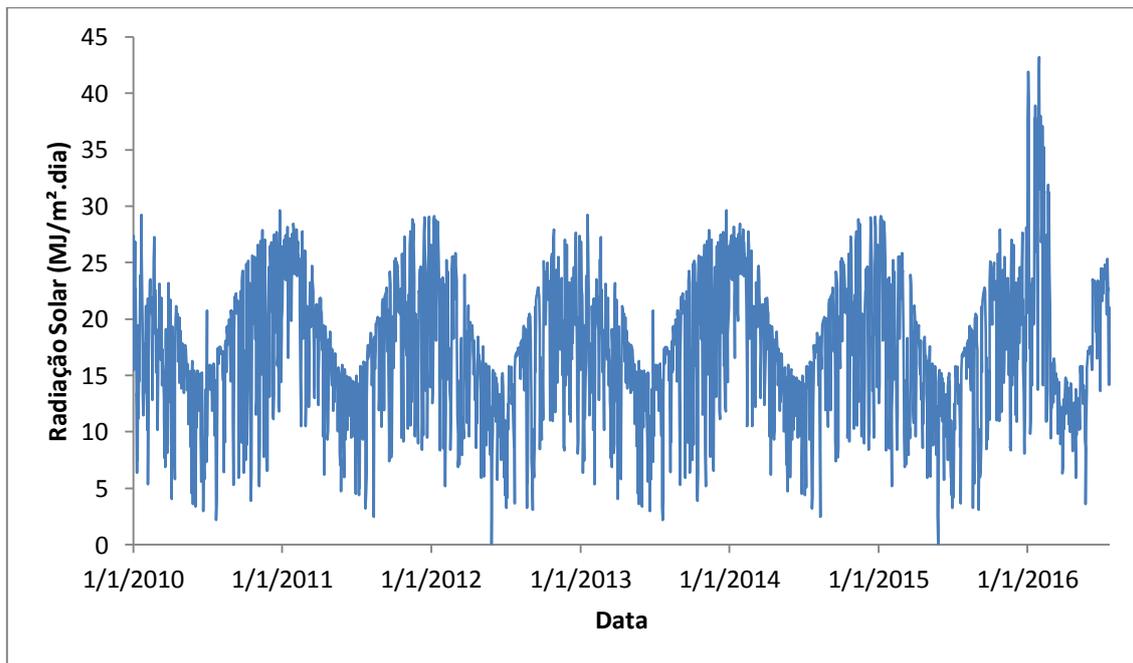


Figura 31 Série de dados diários de radiação solar de 2010 à 2016, (CEPREMG, 2016).

Com esses dados foram gerados arquivos de entrada para o modelo Swat, no bloco de notas, com os seguintes nomes tpt.txt (temperatura), pcp.txt (precipitação), umd.txt (umidade), rso.txt (radiação solar) e vto.txt (velocidade do vento).

Além disso, foi necessário adicionar uma estação climática ao modelo SWAT. Para isso, foram utilizados os parâmetros calculados por Pedrosa (2015). Os parâmetros foram calculados para cada mês e para tal cálculo foi utilizada uma série de dados de 53 anos para a estação da cidade de São Lourenço - MG. Os valores calculados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 Parâmetros calculados para a estação de Itajubá (PEDROSA, 2015).

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
TMPMX [°C]	28.64	29.26	28.84	27.55	25.00	24.19	24.43	26.39	27.26	27.88	28.13	28.29
TMPMN [°C]	17.59	17.38	16.61	13.95	10.18	8.12	7.40	8.66	11.94	14.76	16.01	17.21
TMPSTDMX [°C]	2.90	2.65	2.50	2.25	2.35	2.38	2.60	2.97	3.70	3.50	3.05	2.86
TMPSTDMN [°C]	1.57	1.67	1.87	2.90	3.48	3.30	3.13	3.14	3.05	2.55	2.42	1.94
PCPMM [mm]	312.39	215.82	172.18	76.39	59.20	32.95	25.79	26.24	71.66	128.96	183.22	276.97
PCPSTD [mm]	16.60	13.29	11.38	7.93	6.30	4.52	4.07	3.67	6.86	9.50	11.71	14.48
PCPSKW [mm]	2.87	2.78	3.16	5.31	4.51	5.88	9.04	6.25	4.16	4.40	3.33	2.63
PR_W(1,mon)	0.47	0.42	0.35	0.23	0.16	0.11	0.08	0.09	0.19	0.30	0.41	0.49
PR_W(2,mon)	0.75	0.68	0.63	0.44	0.37	0.27	0.30	0.27	0.41	0.56	0.63	0.72
PCPD	19.98	16.20	14.82	8.63	6.53	4.22	3.67	3.68	7.51	12.61	15.58	19.61
RAINHHMX [mm]	60.59	39.65	36.35	37.27	20.59	16.30	27.25	16.05	24.59	48.47	39.36	39.75
SOLARAV [MJ/m ² .dia]	20.01	20.58	18.97	17.16	12.43	13.07	14.77	17.56	18.74	20.12	21.16	19.73
DEWPT [%]	79.69	78.76	78.98	78.18	79.67	80.24	76.19	69.58	68.51	71.78	74.62	78.74
WNDV [m/s]	0.93	0.87	0.82	0.74	0.66	0.60	0.68	0.80	0.99	1.03	1.11	1.05

5.7 DETERMINAÇÃO DA CURVA CHAVE DO POSTO UNIFEI

Foi definido que a vazão seria a melhor maneira de verificar se o modelo está bem ajustado ou não, devido a falta de série de dados como a qualidade da água, sedimentos, pesticidas, entre outros. Como não havia uma série de vazão medida foi adotado o procedimento de obtenção da curva chave da seção de controle, para a posterior calibração, uma vez que o nível d'água tem sido medido e assim possui uma série de dados.

Para a obtenção da curva foi adotada a equação de Manning para escoamentos em canais e, para isso, foi necessário conhecer as características geométricas e físicas do canal, obtidas através da batimetria realizada na seção de controle. A Figura 32 apresenta o resultado da batimetria da seção de controle.

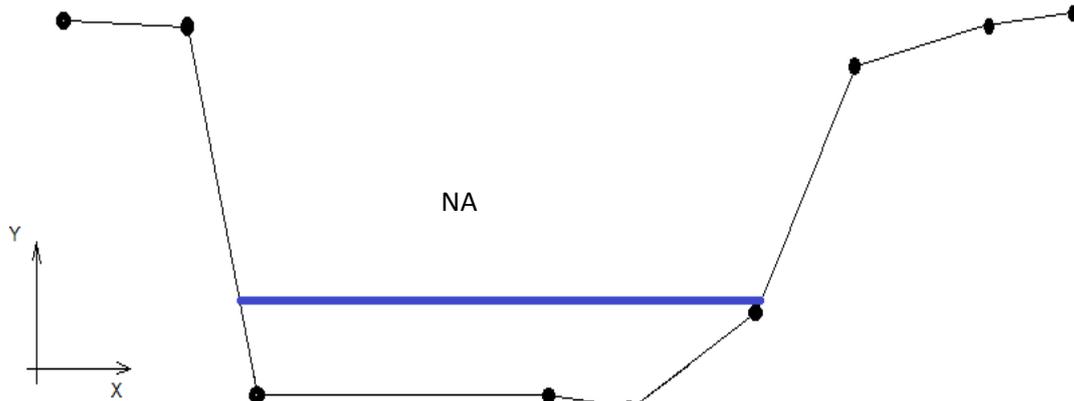


Figura 32 Batimetria realizada na seção de controle.

Por fim, foi gerada a curva chave que será utilizada posteriormente na geração da série de dados de vazão, uma vez que correlaciona o nível d'água com a vazão. Após a simulação será feita uma comparação dos dados de vazão simulados com os dados de vazão obtidos da curva chave para verificar se o modelo está bem ajustado e, no caso de não estar bem ajustado, serão alterados alguns parâmetros até se obter o melhor ajuste do modelo. Na Figura 33 a curva chave da seção de controle, onde a equação que se ajustou melhor é a do tipo potência.

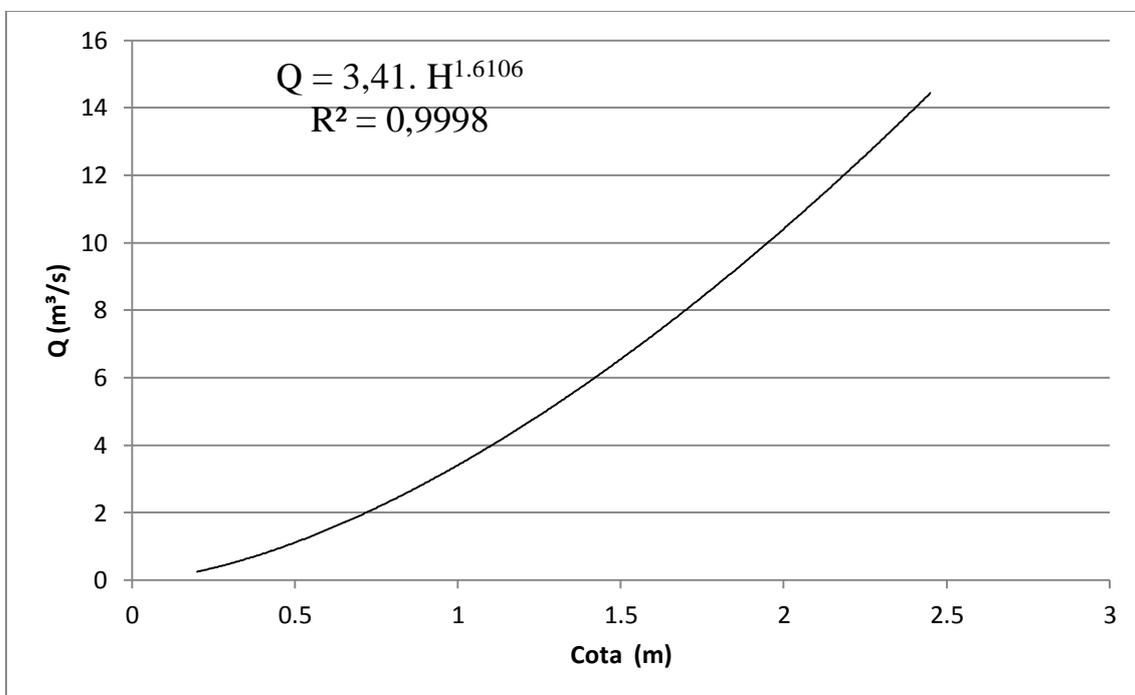


Figura 33: Curva chave da seção de controle.

5.8 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A BACIA DO RIBEIRÃO JOSÉ PEREIRA

No presente trabalho utilizou-se inicialmente o SWAT Cup, que é um software de código aberto fornecido pelos próprios desenvolvedores do SWAT, que realiza calibrações e análises de sensibilidade de projetos gerados no modelo SWAT, mas os resultados não foram satisfatórios. Então, o método da calibração manual adotado e alguns dos parâmetros que foram encontrados na literatura como mais sensíveis à vazão, citados anteriormente, foram alterados até que se atingisse uma calibração aceitável.

Os parâmetros alterados foram os mostrados na Tabela 18, que mostra o nome do parâmetro, o valor inicial e o valor do novo parâmetro, sendo que o GW_DELAY e o SOL_K são considerados neste trabalho como os mais sensíveis e que geraram então a melhora da calibração para o modelo.

Tabela 18 Valores iniciais e alterados de parâmetros calibráveis.

Nome do Parâmetro	Valor Inicial	Novo Parâmetro
CH_N2	0,014	0,040
GW_DELAY	31	360,00
GWQMN	1000	500,00
EPCO	0,95	1,00
SOL_K Argissolo	293,01 (inserido)	50,00
SOL_K Cambissolo	12,5 (inserido)	6,25
SOL_K Latossolo Vermelho	90 (inserido)	22,50
SOL_K Solo Urbano	500,0	250,0

Com a mudança desses parâmetros, a calibração obtida foi a apresentada na Figura 34 que mostra o gráfico com a série de precipitação, a vazão observada e a vazão simulada após a mudança dos parâmetros para os valores da Tabela 18. Observa-se que não ocorreram muitas diferenças nos formatos dos hidrogramas observados e simulados, mas ocorreram algumas discrepâncias, principalmente nas vazões de pico, porém, dentro do aceitável, sendo que as séries de dados de entradas não eram muito longas e ainda por se tratar de um modelo que não foi desenvolvido para características de solos brasileiros e por ser um modelo matemático que, como qualquer, possui simplificações dos fenômenos que tentam descrever.

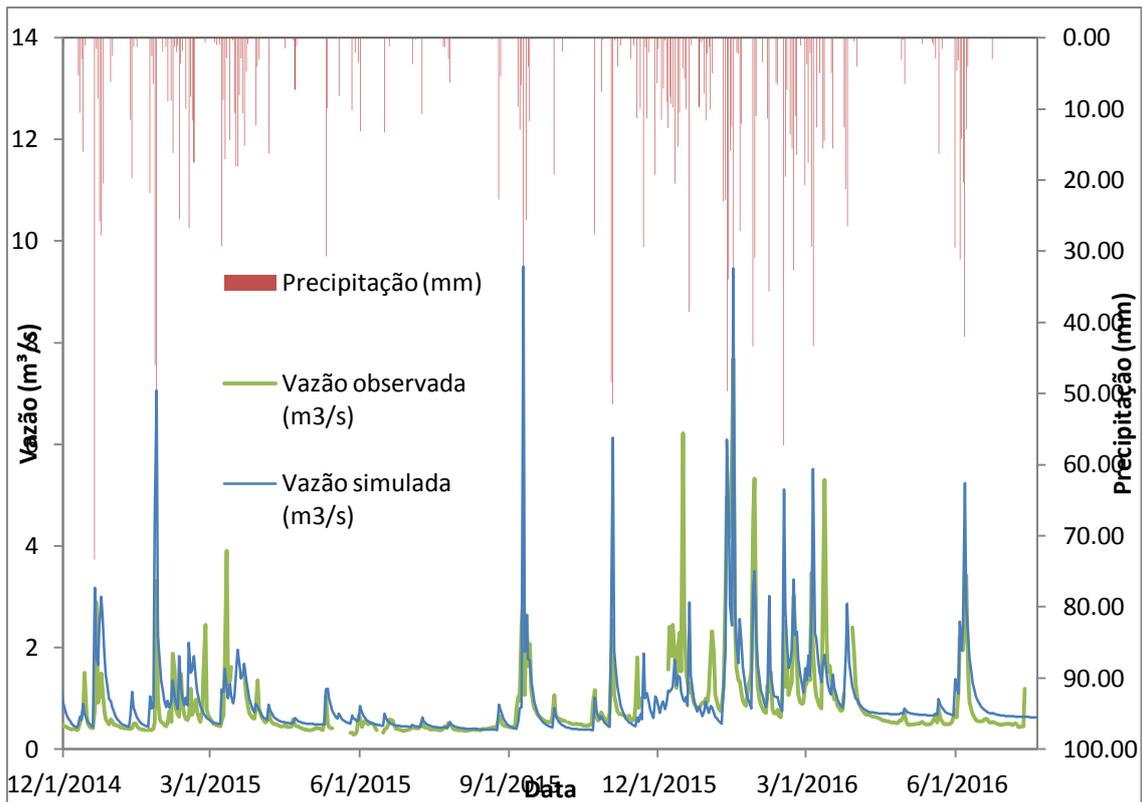


Figura 34 Gráfico da calibração realizada.

Para realizar a calibração, indicadores foram utilizados para determinar se a cada alteração dos parâmetros ocorria melhora ou piora dos resultados. Os indicadores eram o erro médio absoluto, a diferença média absoluta observada na curva de permanência, sendo essa o principal indicador e, ainda, o coeficiente R^2 da correlação da vazão observada e da vazão simulada.

Uma planilha Excel foi montada para que, a cada nova alteração pudessem ser observados esses indicadores, apresentando o valor anterior, o valor atual e o resultado que aponta se após a mudança do parâmetro, a calibração melhorou, piorou ou se ficou igual, conforme mostra a Tabela 19, com os valores finais desses indicadores de calibração para o resultado final de calibração são apresentados a seguir.

Tabela 19 Valores dos indicadores na calibração final.

Indicador	Valor Atual
Erro médio absoluto	36,63
Diferença média absoluta observada na curva de permanência	12,76
Coeficiente R^2	0,4312

A curva de permanência para as vazões observadas e simuladas pode, então, ser apresentada na Figura 35, onde pode ser observada uma boa correlação com exceção

das vazões de baixa ocorrência, ou seja, vazões mais altas, fato já citado e observado anteriormente na Figura 34.

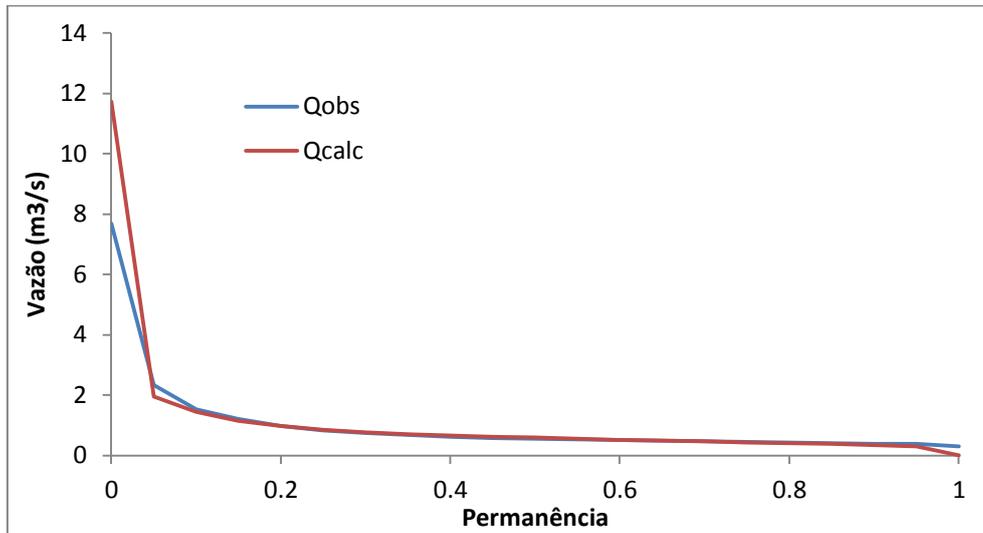


Figura 35 Curva de permanência de vazões observadas e simuladas.

A correlação entre as vazões observadas e simuladas é apresentada na Figura 36, onde observa-se que não houve um ajuste tão adequado, conforme indica o coeficiente de correlação R^2 .

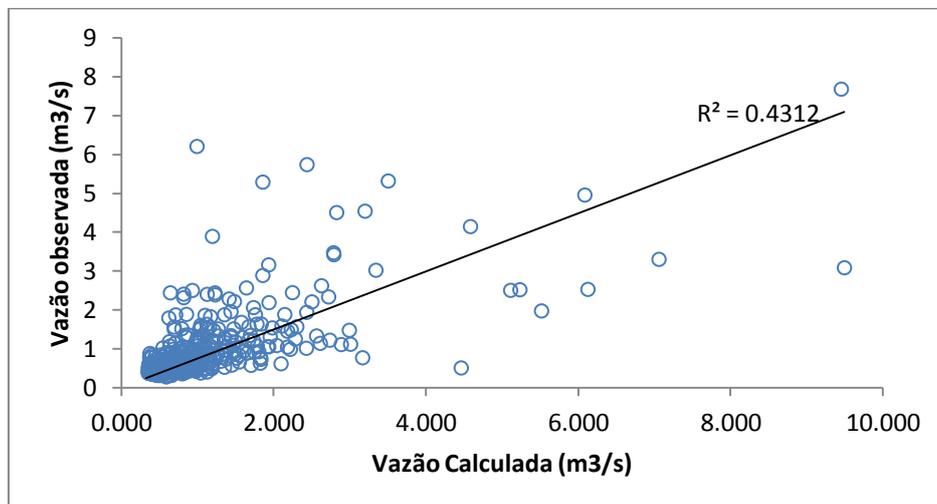


Figura 36 Correlação entre as vazões simuladas e calculadas.

Embora tenha sido realizada a calibração do modelo e os indicadores utilizados não tenham apresentado resultados muito elevados, indicando uma correlação não tão grande, pode-se considerar aceitável e que não terá grande influência sobre os resultados, sendo o objetivo desse estudo avaliar mudanças de uso e ocupação do solo em relação ao cenário de referência e seus efeitos nos fluxos hidrológicos.

Niraulam, Meixner e Norman (2015) realizaram um estudo utilizando o modelo SWAT, onde criaram cenários de mudanças do uso do solo e climáticas, e utilizaram para comparar as mudanças relativas e absolutas no escoamento, o modelo sem calibração (UC), com calibração de saída única (OC) e o modelo espacialmente calibrado (SC). Os resultados indicaram claramente que as alterações relativas devido às mudanças climáticas previstas com a UC e OC não foram significativamente diferentes daquela prevista com o modelo SC e que a calibração foi considerada menos importante, se o objetivo é apenas comparar entre vários cenários de uso e ocupação do solo. Os autores ainda citam que o modelo tem sido utilizado em um modo não calibrado, para eliminar o viés potencial causado pela otimização de parâmetros para modelagem do escoamento.

O cenário atual foi simulado tendo como base as entradas iniciais para a calibração realizada, com os mapas de entrada de solo e de uso do solo, conforme mostrados nas Figura 22 e 24, com apenas a mudança do parâmetro CN2 que inicialmente se apresentam com os valores do próprio banco de dados do modelo, para os seguintes valores mostrados na Tabela 20, correspondentes à pastagens em más condições, situação observada na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, conforme apresenta a Figura 37:

Tabela 20: Valores de CN2 substituídos no calibrador manual para o cenário 1.

Solo	Grupo hidrológico	Valor do CN2 (Fonte: TUCCI, 2003)
Latossolo vermelho	A	47
Cambissolo	C	81
Argissolo	B	67



Figura 37: Pastagem degradada. Fonte: Flauzino, 2012.

A Figura 38 apresenta uma comparação da vazão observada e da vazão simulada (Q Atual), após a calibração do modelo. A simulação foi realizada para o período de 20/07/2014 até 20/07/2016.

Os resultados mostram que a pastagem degradada, encontrada na bacia hidrográfica, altera de maneira significativa os fluxos hidrológicos. As vazões máximas são de até aproximadamente, 15 m³/s, sendo que a vazão observada máxima é de aproximadamente 8 m³/s, no geral, as vazões de pico simuladas são maiores do que as observadas.

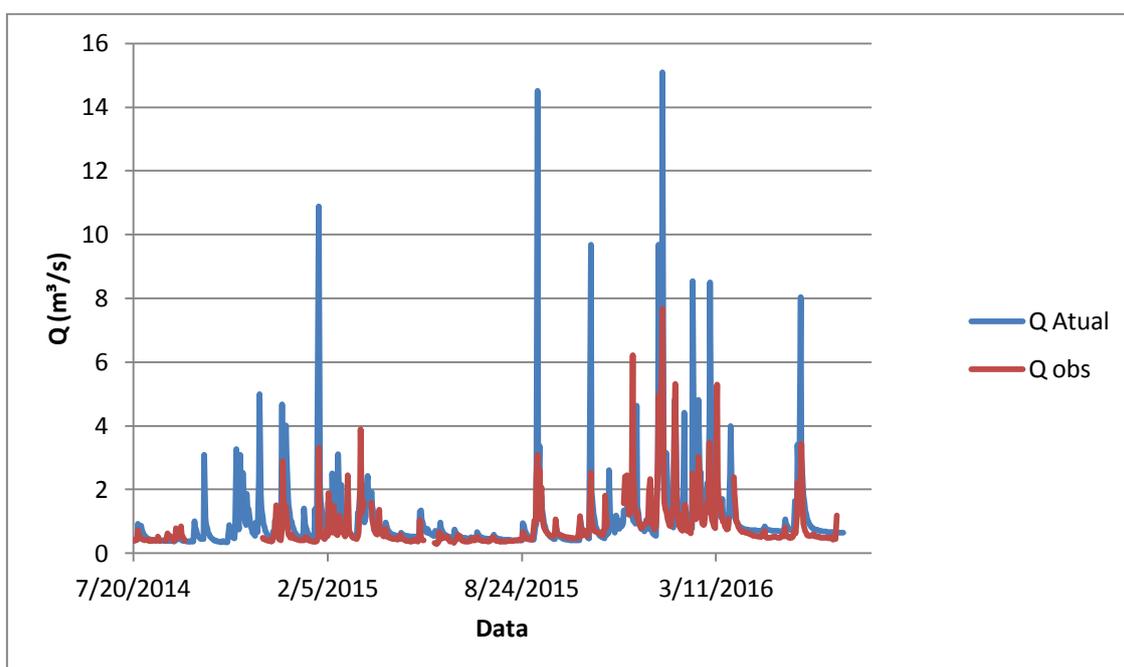


Figura 38 Vazões observadas e simuladas no cenário atual.

Para o cenário de pastagens em más condições, o modelo gera um resumo com os valores de cada um dos componentes do fluxo hidrológico, conforme pode ser observado na Figura 39. Dessa figura, pode-se concluir que, conforme era esperado, a degradação da pastagem gera efeitos negativos dentro da bacia, principalmente no que diz respeito ao aumento do escoamento superficial, devido à impermeabilização do solo (compactação do solo exposto por gados, por exemplo) e menor evapotranspiração (falta de vegetação).

Segundo Blainski *et al.* (2011) o aumento médio de vazão pode ser atribuído à redução da infiltração de água no solo, oriunda do selamento superficial ocasionado pelo impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo. Em seus resultados, Koumrouyan (2007) concluiu que cenários de cobertura mais degradados tiveram um

aumento de vazão um pouco mais rápida, em decorrência de precipitação, do que os cenários mais preservados.

Observa-se que o valor de escoamento superficial simulado é de 120,3 mm, a evapotranspiração com uma parcela de 556,6 mm, o fluxo lateral de 287,37 mm, a percolação para o aquífero de 380,7 mm, a recarga do aquífero profundo de 19,04 mm e, finalmente, a vazão de retorno de 358,19 mm. Com esses valores como base da situação atual da bacia, a comparação será realizada com os cenários, sejam eles pessimistas ou otimistas.

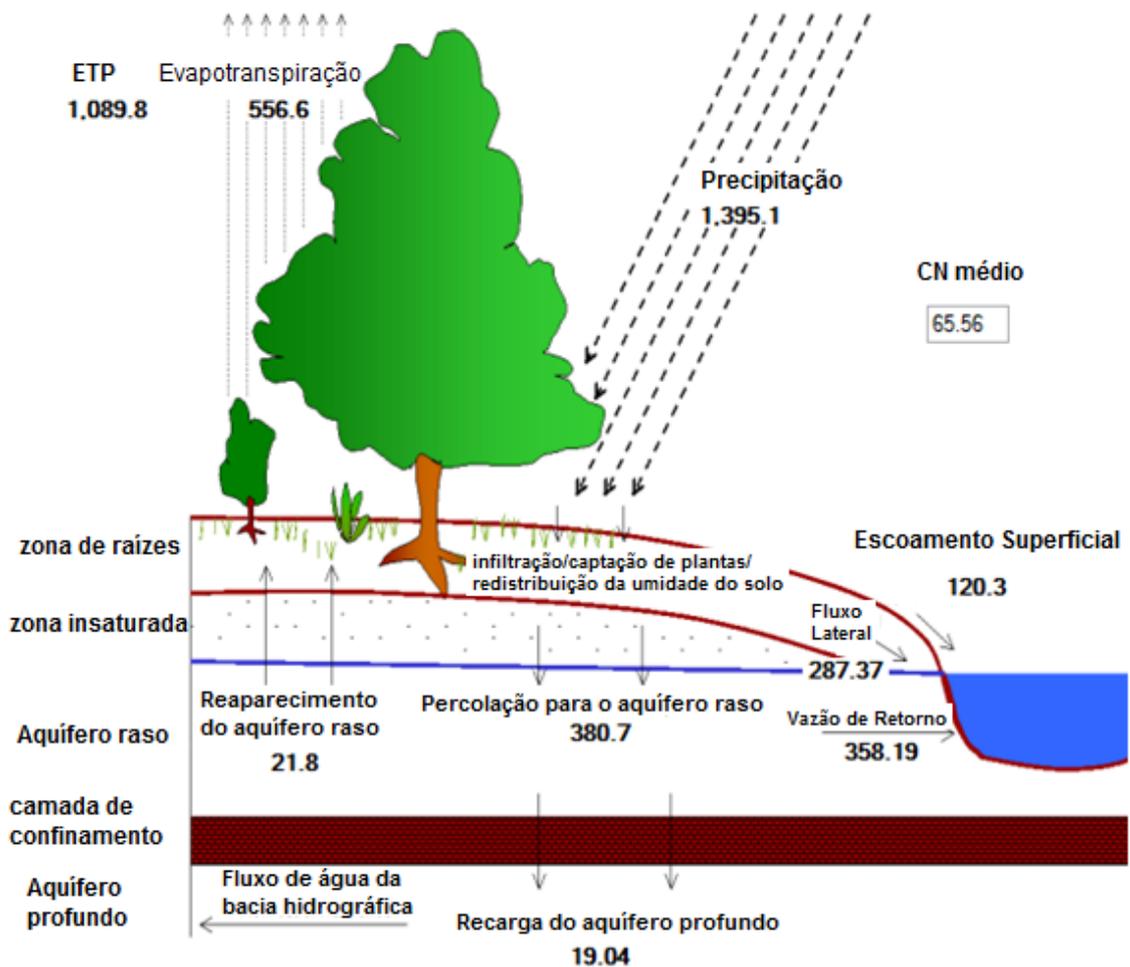


Figura 39 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 1, valores em mm.

O transporte de sedimentos pode ser observado conforme apresenta a Figura 40. Os valores estão acima do esperado, sendo a produção média de sedimentos superior a 10 toneladas métricas/hectare. A produção máxima de sedimentos é superior a 50 toneladas métricas/hectare em pelo menos uma HRU, onde o valor mais alto é o da

HRU 15 que combina pastagem, cambissolo e faixa de declividade de 30 - 45%, atingindo um pico de 59,47 Mg/ha.

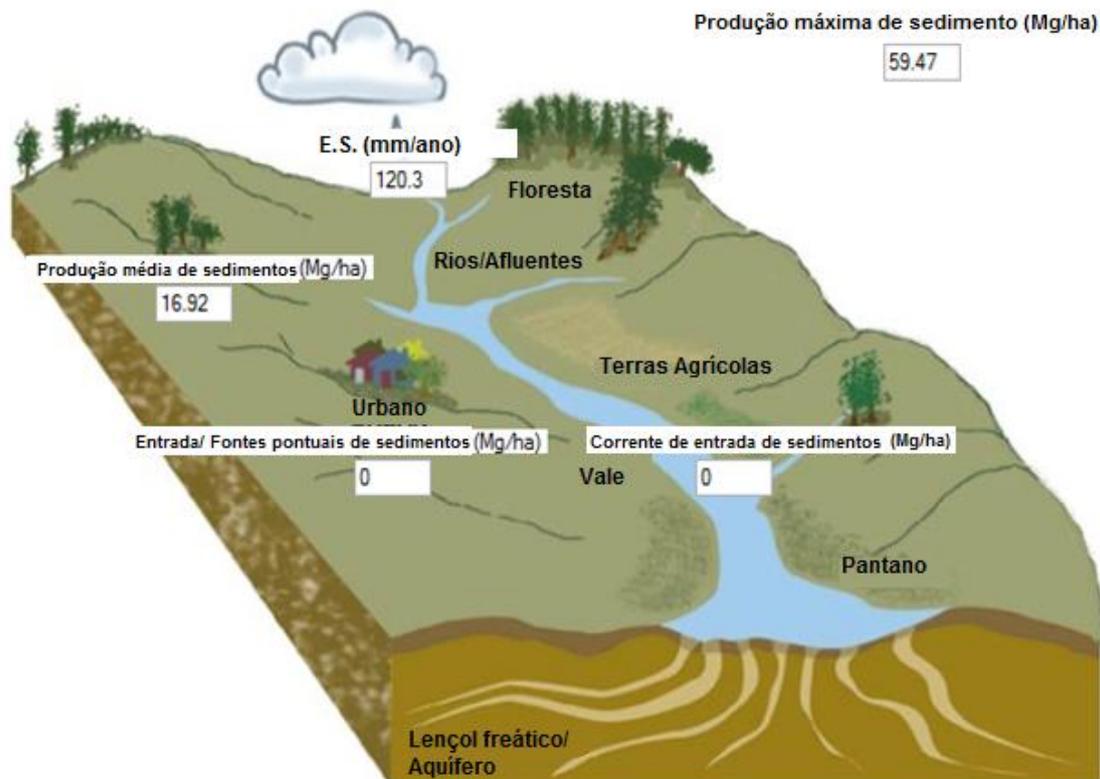


Figura 40 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário Atual.

5.9 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

5.9.1 Cenário 2: manejo da pastagem

O cenário do manejo da pastagem foi considerado necessário, uma vez que, conforme citado anteriormente, a pastagem encontrada na bacia se apresenta em más condições. Sendo assim, o intuito da criação desse cenário foi o de verificar qual a influência nas vazões, na recuperação da pastagem degradada, através de práticas de manejo adequadas do solo e, ainda, verificar se tal mudança pudesse gerar mais benefícios que os outros cenários a serem simulados.

Então tendo como base as entradas iniciais para a calibração realizada, mesmos mapas de uso do solo, de solo e de declividades, tendo como período de simulação e de aquecimento os mesmo do cenário anterior, novas mudanças do parâmetro CN2 foram realizadas para os seguintes valores mostrados na Tabela 21, correspondentes à pastagens em boas condições, ou seja, é considerado que após o manejo adequado da pastagem, ela se recupere por completo.

Tabela 21: Valores de CN2 substituídos no calibrador manual para o cenário 2.

Solo	Grupo hidrológico	Valor do CN2 (Fonte: TUCCI, 2003)
Latossolo vermelho	A	6
Cambissolo	C	70
Argissolo	B	35

Após o resultado simulado ser considerado aceitável, comparações entre as vazões do cenário chamado Atual e as vazões simuladas para esse novo cenário, onde ocorreu o manejo da pastagem, foram realizadas e os resultados apontam para uma diminuição significativa nas vazões de pico do hidrograma, conforme apresentado na Figura 41.

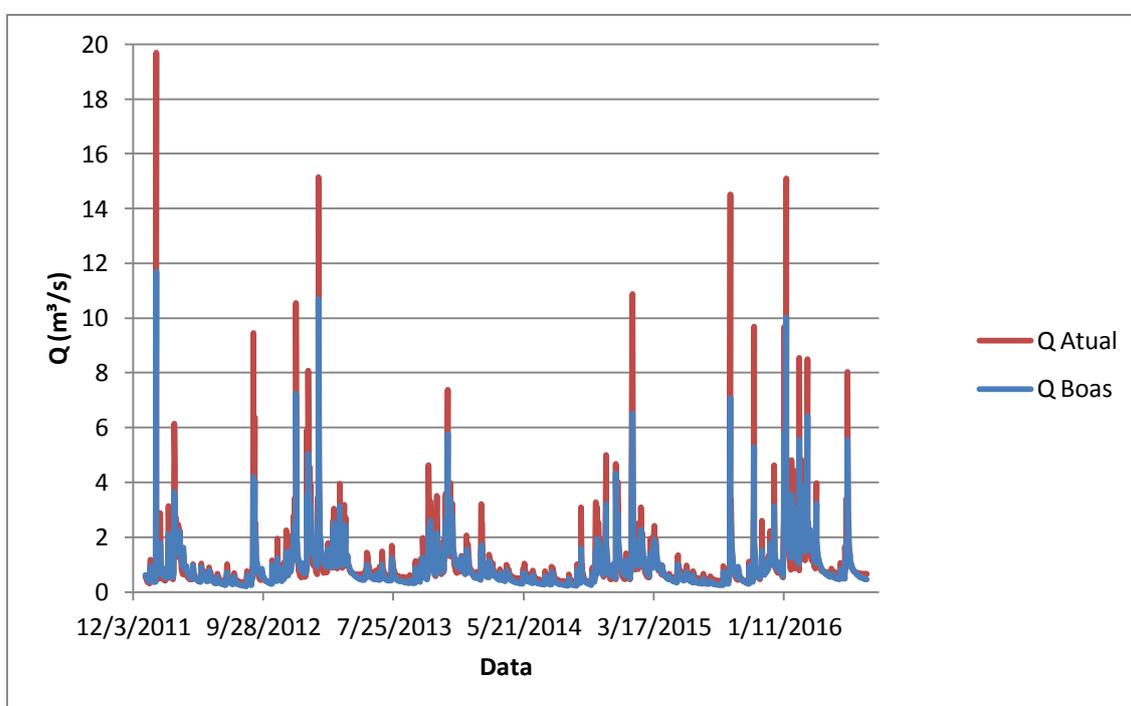


Figura 41 Vazões simuladas para o cenário Atual e Cenário de manejo agrícola.

A Figura 42 apresenta o resumo dos fluxos hidrológicos com o valor de cada componente do fluxo hidrológico na bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira. O escoamento superficial na média diminuiu drasticamente em comparação com o cenário Atual, ou seja, foi de 120,3 mm para 58,87 mm, uma redução de 51,06 %.

Observa-se, também, que o fato de mudar o estado das pastagens para boas condições, influenciou na evapotranspiração que passou de 556,6 mm para 671,8 mm, um aumento de 20,7%, uma vez que, com a recuperação da pastagem há o aumento da interceptação. Embora seja uma vegetação rasteira, isso implica em mais água estar

disponível tanto no solo para ser captado pelas raízes, quanto na superfície das plantas para ser evaporada.

Segundo Vanzela *et al.* (2010), áreas ocupadas por matas e pastagens favoreceram a disponibilidade e a qualidade da água, enquanto áreas habitadas, agricultadas e as matas degradadas, reduziram a disponibilidade e a qualidade hídrica.

Como mais água está preenchendo os vazios do solo (maior infiltração), o fluxo lateral que ocorre na zona de raízes, também sofre influência significativa e passa a ser de 405,05 mm, ou seja, um aumento de 40,95 %.

A percolação da água para o aquífero tem uma diminuição para 221,66 mm e, como consequência, a recarga do aquífero mais profundo diminui para 11,08 mm e a vazão de retorno passa a ser de 208,15, ou seja, 41,89 % menor do que na situação atual.

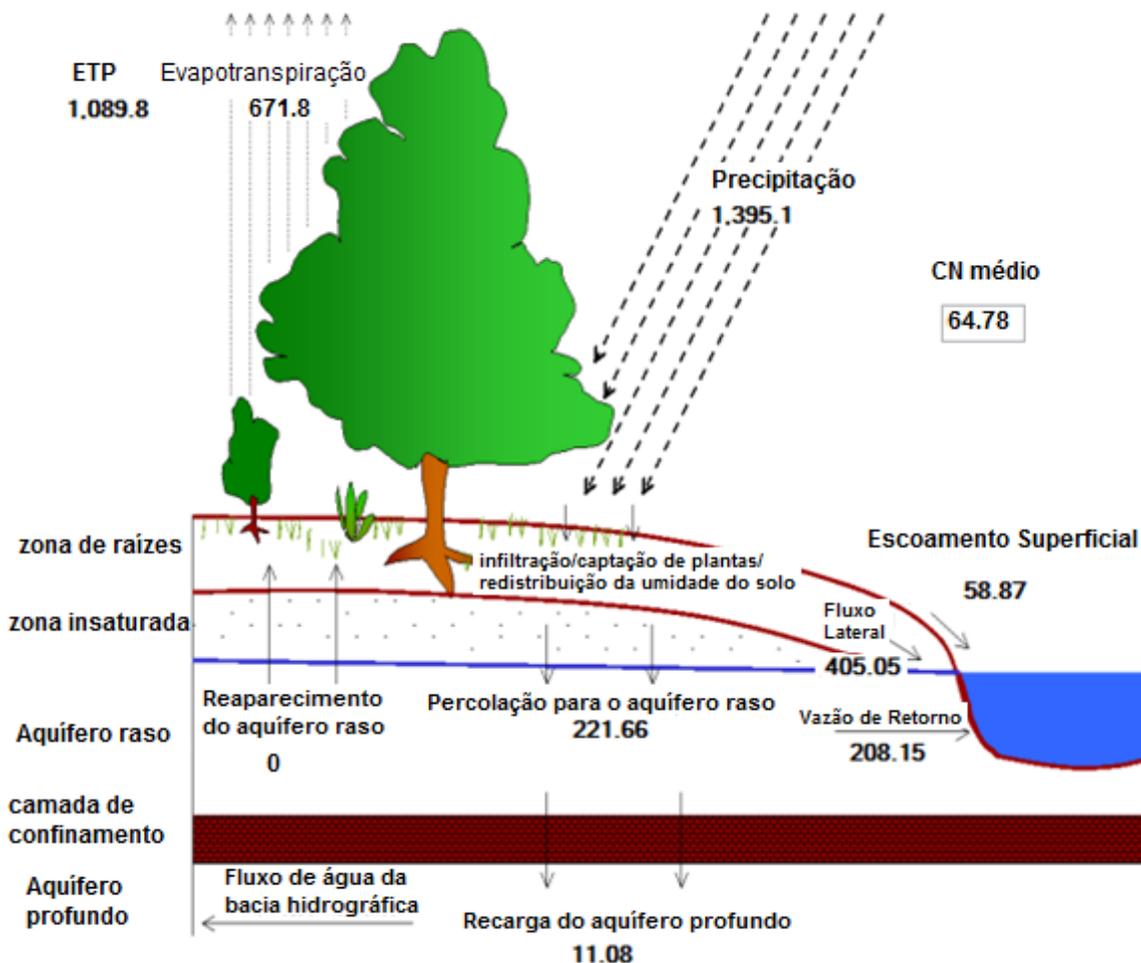


Figura 42 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 2, valores em mm.

Para esse cenário, os valores do transporte de sedimentos estão acima do esperado, sendo a produção máxima de sedimentos superior a 50 toneladas

métricas/hectare em pelo menos uma HRU, onde o valor mais alto é o da HRU 6 que combina solo exposto, argissolo e faixa de declividade de 20 - 30%, atingindo 61,42 Mg/ha, conforme apresenta a Figura 43.

Porém, na média anual houve uma redução significativa em comparação com o cenário atual. Resultado semelhante ao encontrado por Aparecida Lelis e Calijuri (2010), onde as perdas de solo, as quais são influenciadas por fatores como umidade do solo, intensidade de precipitação, uso e tipo de solo (que na região predominam os latossolos, argissolos, cambissolos e gleissolos), foram reduzidas significativamente pela substituição de culturas com melhor manejo.

Para trabalhos futuros, uma série de dados de valores de sedimentos pode ser obtida e, então, uma comparação dos valores simulados de sedimentos para esse cenário com os valores observados pode ser realizada.

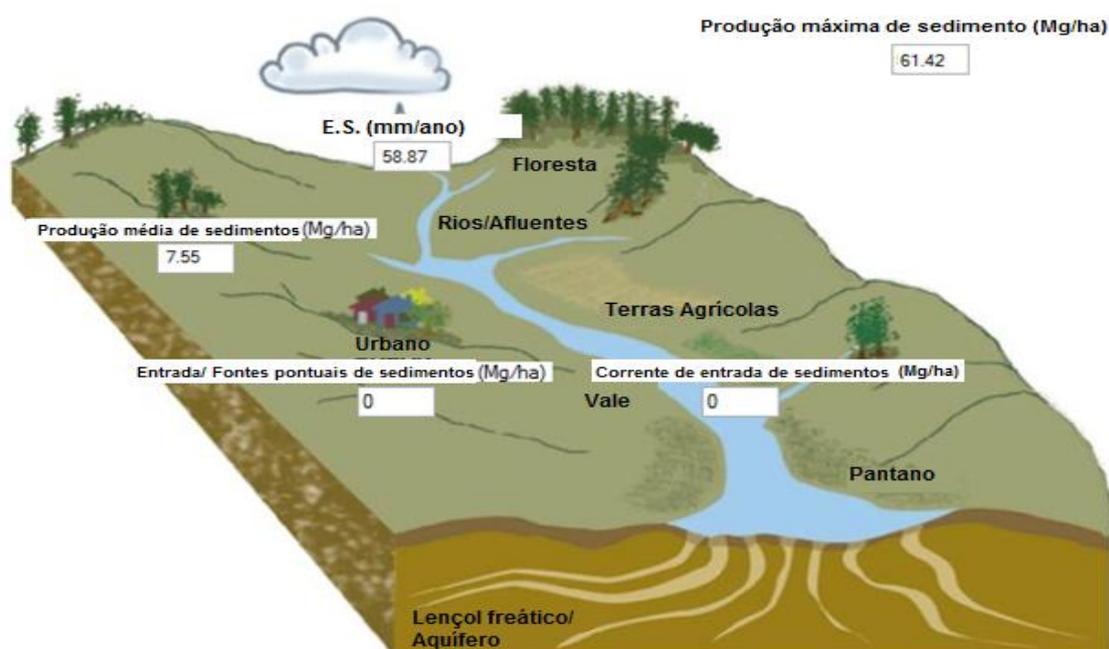


Figura 43 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 2.

5.9.2 Cenário 3: área ocupada por floresta

O cenário de área da bacia hidrográfica ocupada por floresta, é simulado fazendo uma mudança no banco de dados de uso e ocupação dos solo. Onde área da bacia que inicialmente se apresenta com 7 diferentes usos e ocupação do solo, passam a ter apenas o uso florestas mista. Obviamente essa é uma situação impossível de ocorrer, uma vez que, a bacia já se encontra com parte urbanizada e com outros usos. Porém, julgou-se

interessante gerar esse cenário para se observar os resultados da bacia em seu estado original e para efeito de comparação dos diferentes cenários simulados para a bacia.

As simulações foram realizadas usando a mesma calibração do modelo, ou seja, os parâmetros alterados para os outros dois cenários foram os mesmos alterados para esse cenário, com os mesmos períodos de simulação e de aquecimento do modelo. A entrada de solo é a mesma nos cenários 1 e 2, mas como foi anunciado o banco de dados do uso e ocupação do solo foi alterado, e é apresentado na Figura 44.

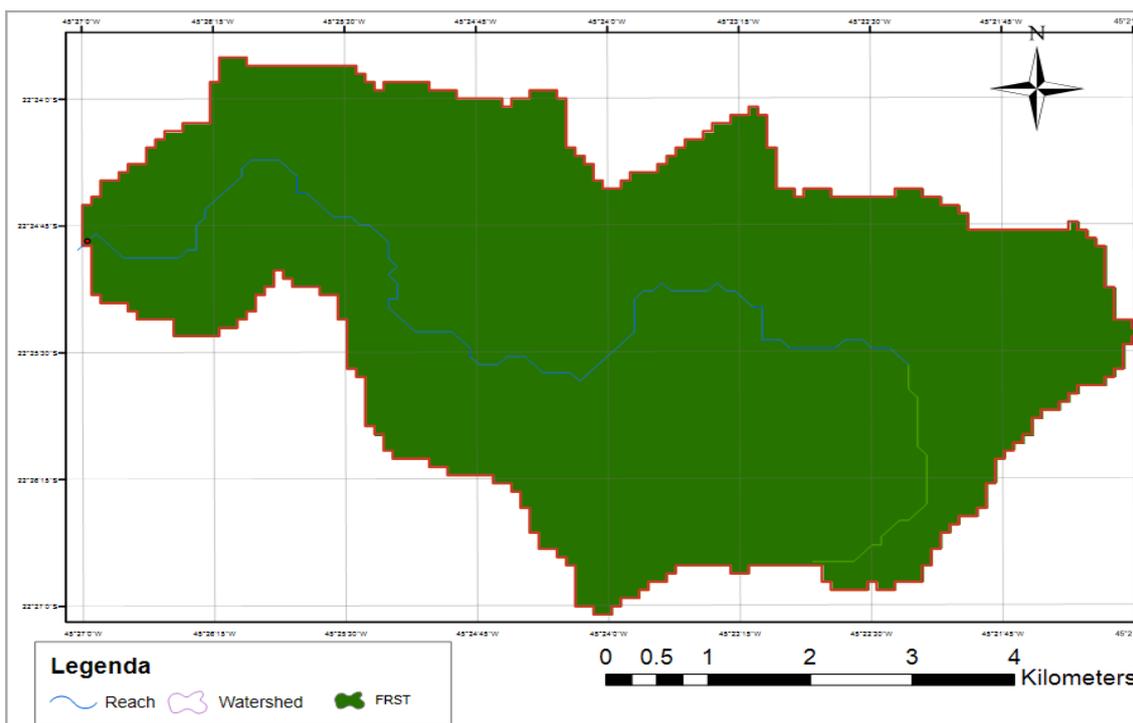


Figura 44 Nova entrada do mapa de uso do solo, 100% Floresta.

Com essas mudanças ocorreram também, mudanças nas HRUs que passaram de 21 para apenas 5. A Tabela 22 apresenta a nova combinação das HRUs.

Tabela 22 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 3

URH	Uso do solo	Tipo de solo	Classe de declividade
1	Floresta	Argissolo	30 - 45%
2	Floresta	Argissolo	10 - 20%
3	Floresta	Argissolo	20 - 30%
4	Floresta	Cambissolo	30 - 45%
5	Floresta	Cambissolo	20 - 30%

Os resultados mostrados apresentaram mudanças nas vazões, como era de se esperar, os picos diminuíram, conforme apresentado na Figura 45.

Na literatura, vários autores que simularam cenários de crescimento ou expansão de florestas, encontraram o mesmo comportamento das vazões. Segundo Viola *et al.* (2014), a capacidade de infiltração no solo junto com a profundidade do sistema radicular afeta o fluxo de base. Como a cobertura florestal tem um sistema radicular mais profundo do que os demais usos do solo encontrados na bacia hidrográfica, isso permite que a água seja retirada de maiores profundidades, afetando a disponibilidade de água para manter as vazões de base. E, ainda, o aumento da interceptação e consequente aumento da evapotranspiração corroboram para diminuição das vazões e, portanto, para a validação desses resultados.

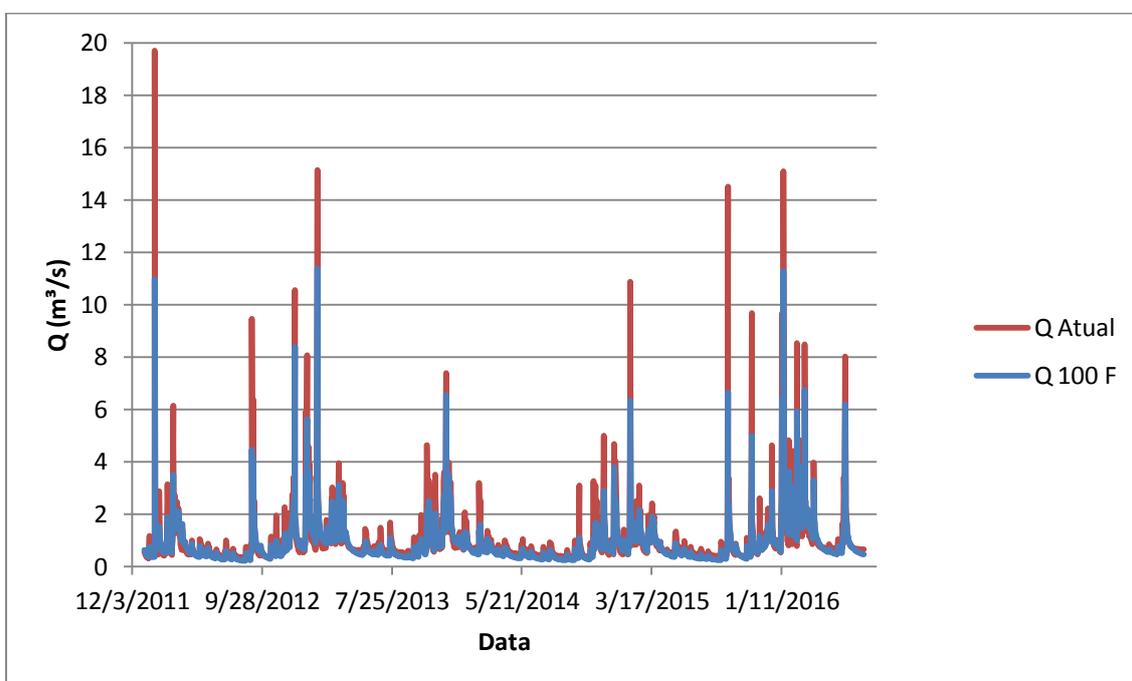


Figura 45 Vazões simuladas para o cenário Atual observadas e cenário de reflorestamento.

A Figura 46 apresenta o resumo dos fluxos hidrológicos com o valor de cada componente. O escoamento superficial, na média, diminuiu drasticamente em comparação com o cenário Atual, ou seja, foi de 120,3 mm para 51,28 mm, uma redução de 57,37 % de escoamento superficial.

Algo semelhante encontrado por Macedo *et al.* (2012) na simulação utilizando o modelo hidrológico ABC, para o cenário de aumento da área vegetada, onde ocorre uma elevação da infiltração da água no solo, fazendo com que o escoamento superficial direto fosse menor. Em acordo a esses resultados, Koumrouyan (2007) observou uma

relação inversamente proporcional entre a mudança da área florestada e a vazão no exutório da bacia, onde um aumento da área de floresta de 79,94% gerou uma diminuição da vazão em média de 71,72%.

O fato de mudar completamente a cobertura da bacia hidrográfica para florestas mistas, influenciou na evapotranspiração que passou de 556,6 mm para 671,2 mm, um aumento de 20,6 %, fazendo sentido, uma vez que, com essa mudança, ocorre o aumento da interceptação, com maiores superfícies, como as copas das árvores e, conseqüente, evaporação de parcela da água interceptada e, ainda, com mais água disponível no solo quando escoam pelos troncos e infiltram e podem, então, ser captadas pelas raízes.

O fluxo lateral também aumenta em comparação com o cenário Atual e passa a ser de 404,32 mm. Como mais água sofreu evapotranspiração e mais água passa a fazer parte da parcela do fluxo lateral, a percolação para o aquífero diminuiu para 228,74 mm, e, conseqüentemente, a recarga do aquífero profundo para 11,44 mm e a vazão de retorno 214,76 mm.

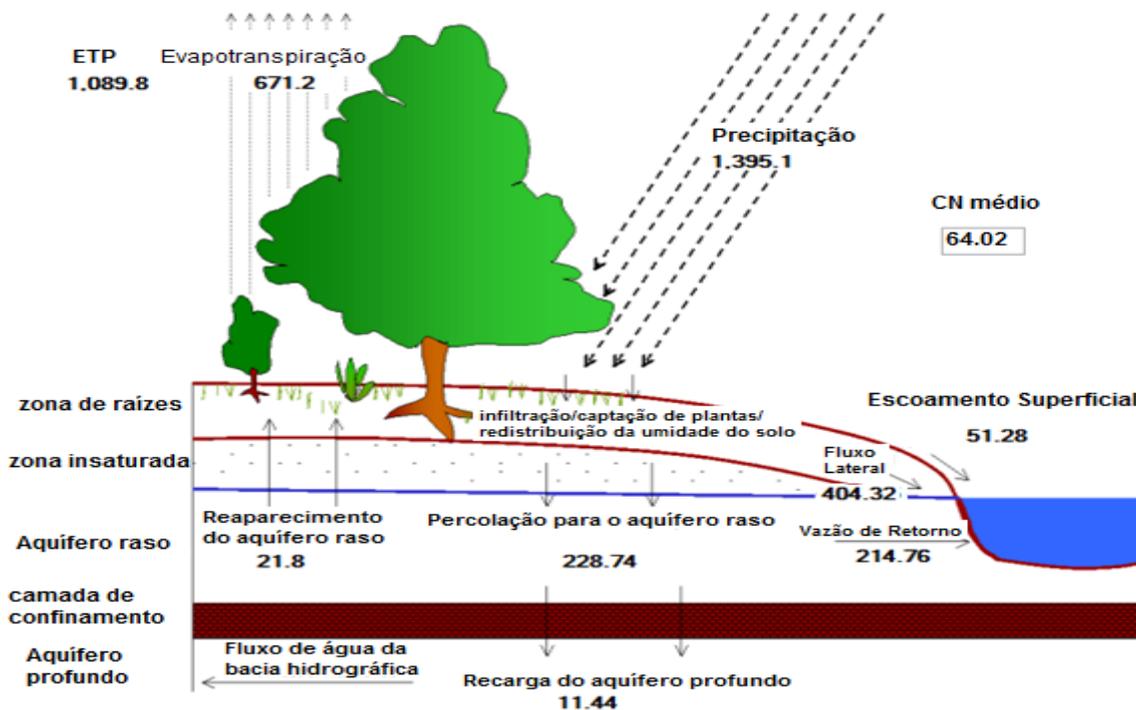


Figura 46 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 3, valores em mm.

Esse cenário, por alterar de maneira excessiva o uso e, conseqüentemente, a disposição e número de HRUs, afetou o resultado dos valores do transporte de

sedimentos, simulando um valor máximo de 0,37 Mg/ha e um valor médio de 0,19 Mg/ha, como apresentado na Figura 47.

Este resultado está abaixo dos simulados nos cenários anteriores, porém era esperado, levando-se em consideração a proteção feita pela vegetação ao solo, ou seja, menos solo está exposto e, portanto, disponível a ser retirado. Além disso, a chegada da água com menor energia ao solo, por causa da interceptação realizada pelas árvores, diminuindo a retirada do solo e, ainda, como discutido anteriormente, a grande redução do escoamento superficial que é o componente mais importante no transporte de sedimentos em bacias hidrográficas.

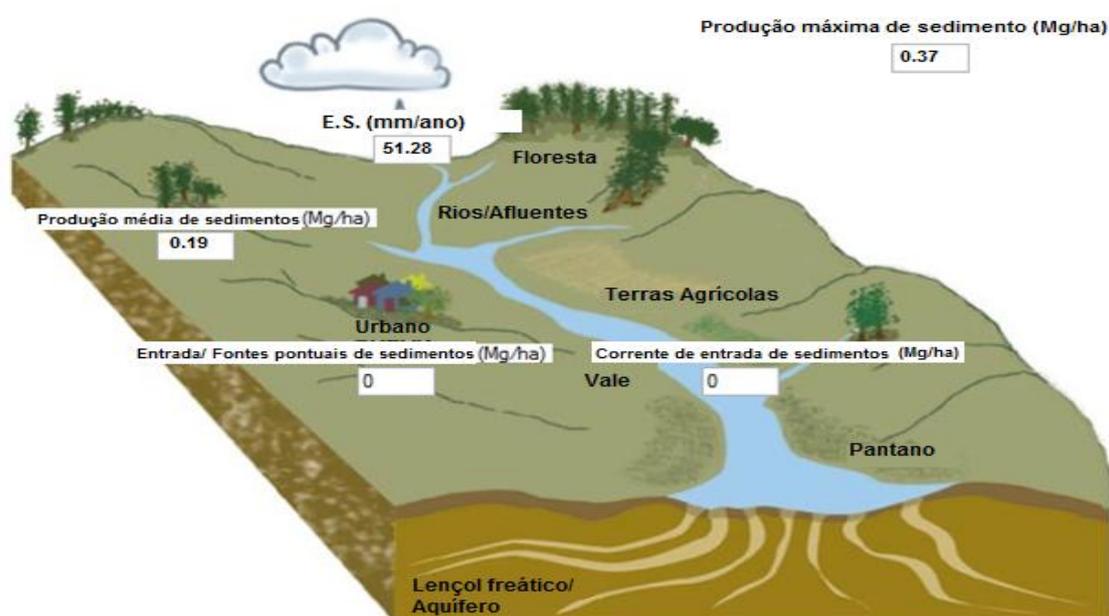


Figura 47 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 3.

5.9.3 Cenário 4: área de preservação permanente

Esse cenário é simulado, levando-se em consideração as APPs de margens de rios, tendo como base o Novo Código Florestal que indica que, para rios com largura inferior a 10 metros, deve ser respeitada a mata ciliar com largura mínima de 30 metros de cada lado. O *buffer* gerado respeita, então, tal medida, sendo o uso associado a ele no modelo SWAT, o de florestas mistas.

Novamente, as simulações foram realizadas usando a mesma calibração do modelo, com os mesmos períodos de simulação e de aquecimento do modelo. A entrada de solo é a mesma nos cenários 1, 2 e 3, porém, o mapa de uso do solo foi alterado, ou seja, foi inserido o *buffer* das APPs de margens de rio como mostrado na Figura 48.

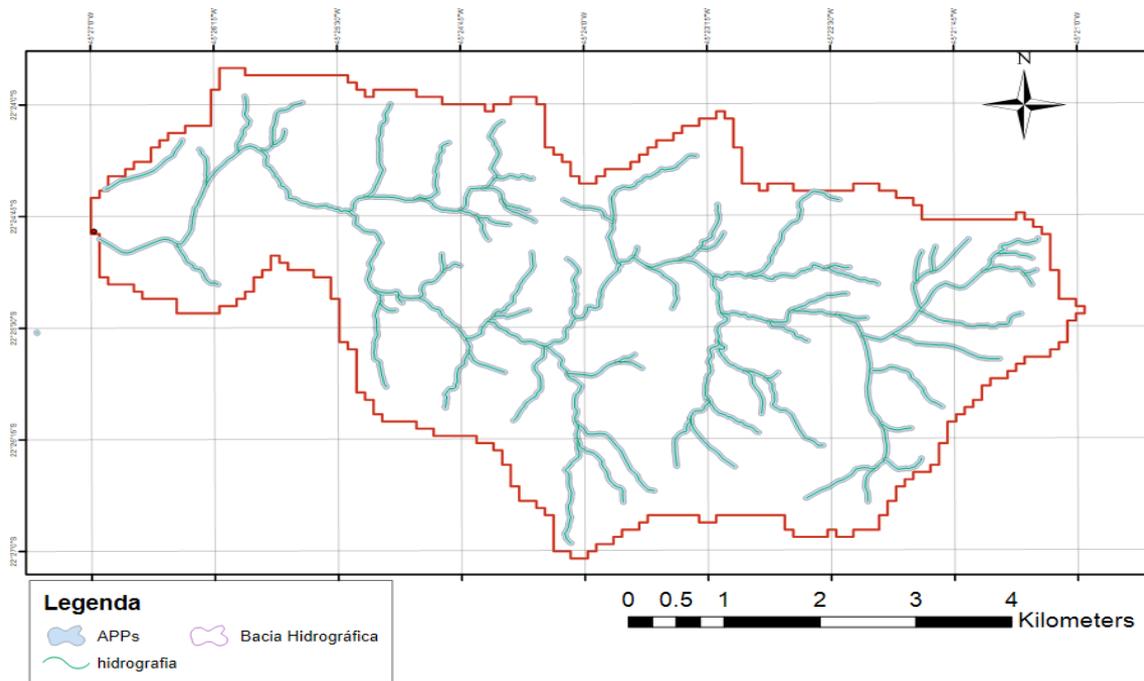


Figura 48 Buffer gerado das APPs de margens de rios.

Finalmente, o novo banco de dados do uso do solo gerado pelo modelo SWAT é apresentado na Figura 49.

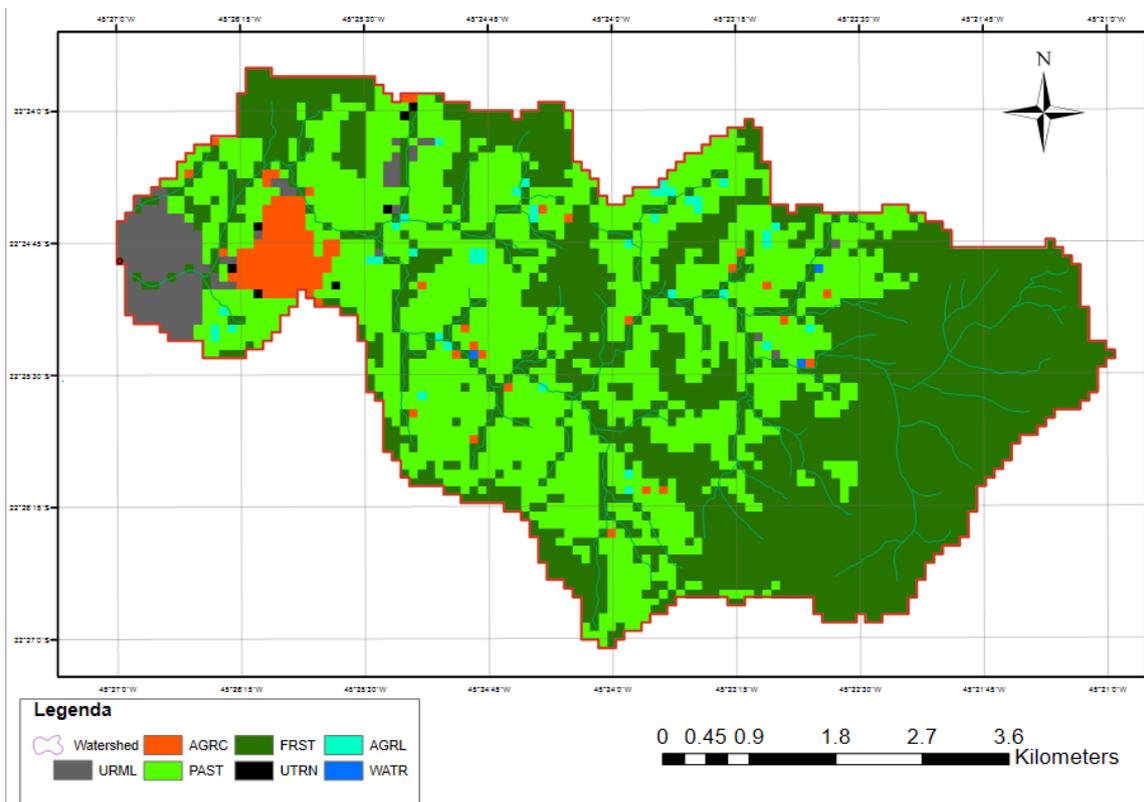


Figura 49 Nova entrada do mapa de uso do solo com as APPs.

Para essa nova configuração de uso do solo e mantendo as demais entradas, novas HRUs foram geradas, ou seja, novas combinações de uso do solo, solo e declividades que são apresentadas na Tabela 23, a seguir.

Tabela 23 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 4.

URH	Uso do solo	Tipo de solo	Classe de declividade
1	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	20 - 30%
2	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	10 - 20%
3	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	0 - 10%
4	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	10 - 20%
5	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	0 - 10%
6	Solo Exposto	Argissolo	10 - 20%
7	Solo Exposto	Argissolo	20 - 30%
8	Solo Exposto	Cambissolo	0 - 10%
9	Solo Exposto	Cambissolo	20 - 30%
10	Solo Exposto	Cambissolo	10 - 20%
11	Solo Exposto	Latossolo vermelho	10 - 20%
12	Solo Exposto	Latossolo vermelho	20 - 30%
13	Pastagem	Argissolo	20 - 30%
14	Pastagem	Argissolo	10 - 20%
15	Pastagem	Argissolo	30 - 45%
16	Pastagem	Cambissolo	30 - 45%
17	Pastagem	Cambissolo	20 - 30%
18	Floresta mista	Argissolo	20 - 30%
19	Floresta mista	Argissolo	30 - 45%
20	Floresta mista	Argissolo	10 - 20%
21	Floresta mista	Cambissolo	30 - 45%
22	Floresta mista	Cambissolo	> 45%

A comparação entre as vazões do cenário Atual e as vazões simuladas para o cenário das APPs foi realizada e os resultados apontam para uma diminuição nas vazões

de pico do hidrograma. Porém, tal alteração não afetou tão drasticamente os resultados, embora tenha diminuído, mostrando, então, a influência nas vazões da bacia, do desmatamento devido à urbanização, como pode ser observado na Figura 50. Contudo, os cenários de recuperação da pastagem e o cenário de reflorestamento se mostram mais efetivos na redução das vazões de pico do que o cenário das APPs.

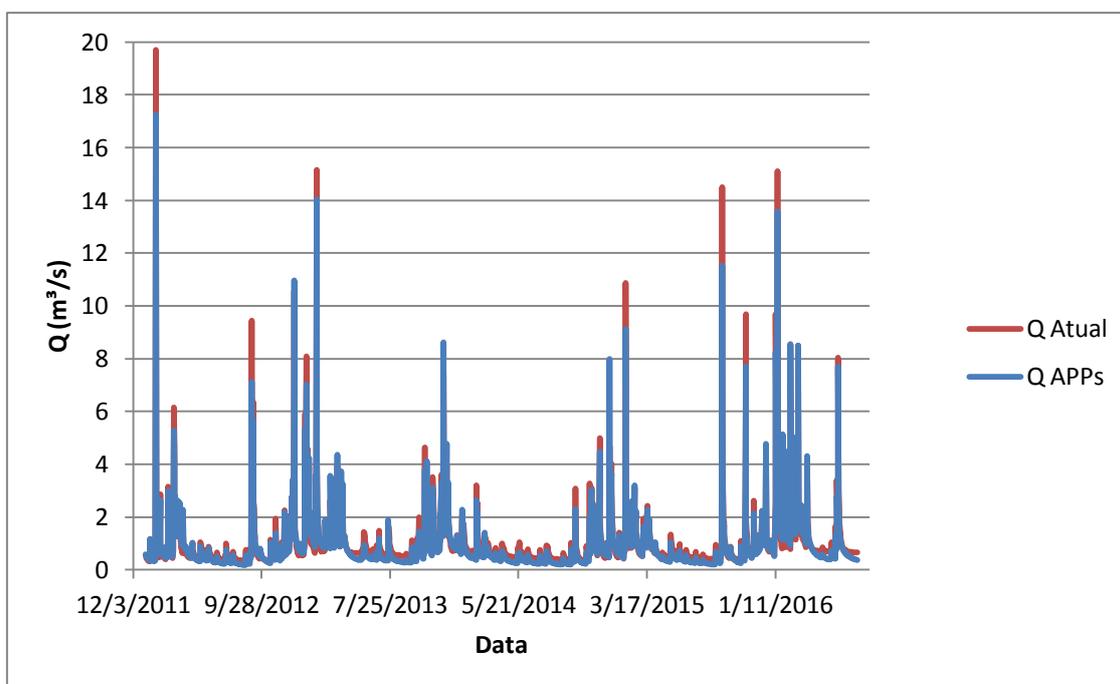


Figura 50 Vazões simulados no cenário Atual e cenário das APPs.

A Figura 51 apresenta o resumo dos fluxos hidrológicos com o valor de cada componente. Nesse resumo, observa-se que o escoamento superficial médio aumentou em comparação com o cenário Atual, ou seja, foi de 120,3 mm para 131,84 mm, um aumento de 9,59 %, algo que não era esperado, mas que pode estar associado à nova configuração das HRUs, porém não há como determinar que isso seja o real motivo desse aumento.

Contudo, os valores das vazões simuladas na média foram reduzidas, conforme pode ser observado na Figura 51. Algo também encontrado por Vieira (2011) para o cenário das APPs que apresentou os menores volumes escoados e os maiores volumes interceptados e infiltrados.

Observa-se, também, que a mata ciliar inserida nesse novo cenário influenciou na evapotranspiração que passou de 556,6 mm para 666,2 mm, um aumento de 19,7 %, ocorrendo algo semelhante ao cenário anterior, com o aumento da interceptação e consequente evaporação de parcela da água interceptada e, ainda, a disponibilidade

hídrica na zona não saturada do solo, quando escoam pelos troncos e infiltram e podem então ser captadas pelas raízes.

O fluxo lateral passou a ser de 383,78 mm, algo que tem sido recorrente nos resultados das simulações, o aumento da vegetação e consequente aumento da interceptação da água precipitada, acarreta em maior parcela do fluxo lateral, e consequentemente, as parcelas de percolação para a zona saturada, a recarga do aquífero profundo e a vazão de retorno diminuíram e passaram a ser de 183,65 mm, 9,18 mm e 172,48 mm, respectivamente.

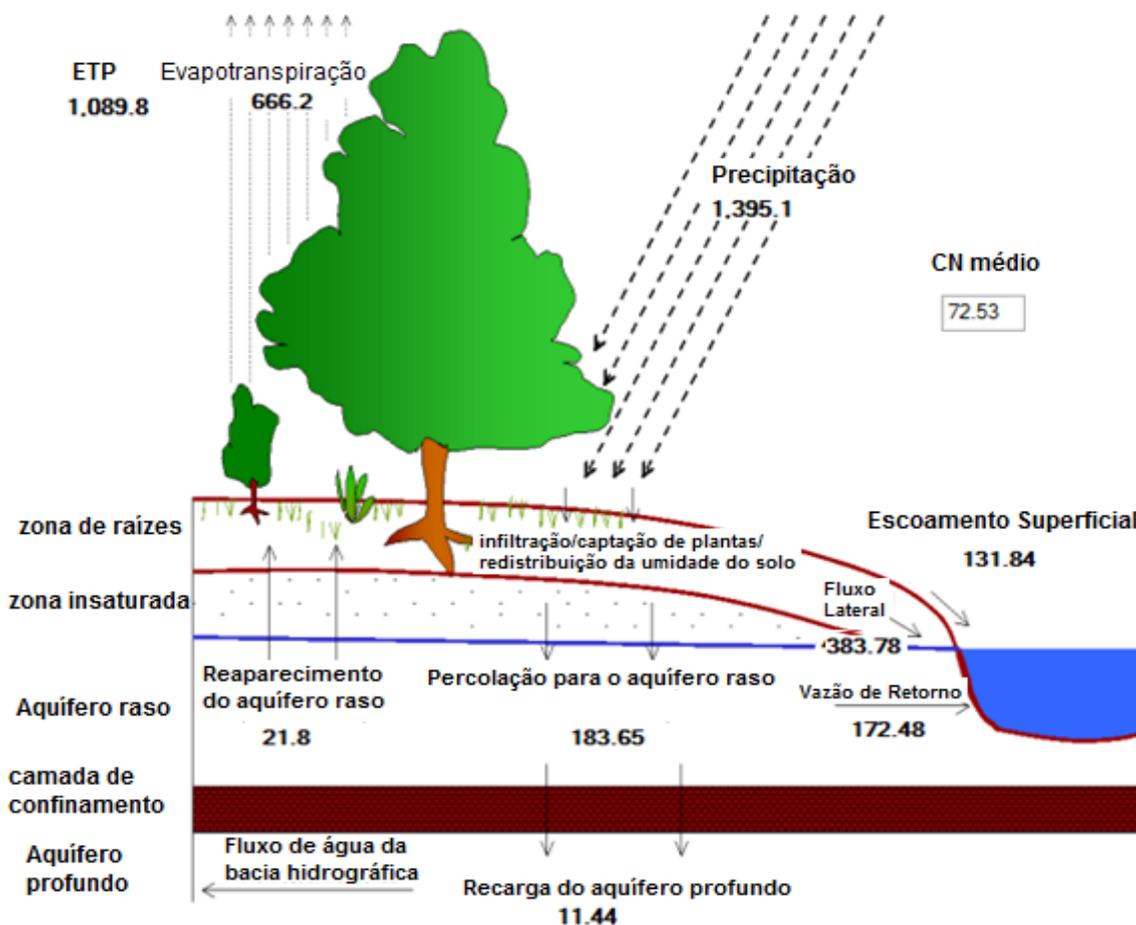


Figura 51 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 4, valores em mm.

Esse cenário passa a ter uma nova disposição para as HRUs, portanto, novamente, observa-se problemas na simulação do transporte de sedimentos, simulando um valor considerado muito grande para a bacia em estudo pelo modelo SWAT, como pode ser visto na Figura 52.

O aumento do escoamento superficial que é o componente mais importante no transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, justifica tal ocorrência, porém,

voltando-se novamente a discussão do porquê do aumento do escoamento superficial para esse cenário onde se esperava a diminuição.

A produção máxima de sedimentos é superior a 50 toneladas métricas/hectare em pelo menos uma HRU, onde o valor mais alto é o da HRU 15 que combina pastagem, argissolo e faixa de declividade de 30 - 45%, atingindo um pico de 150,71 Mg/ha.

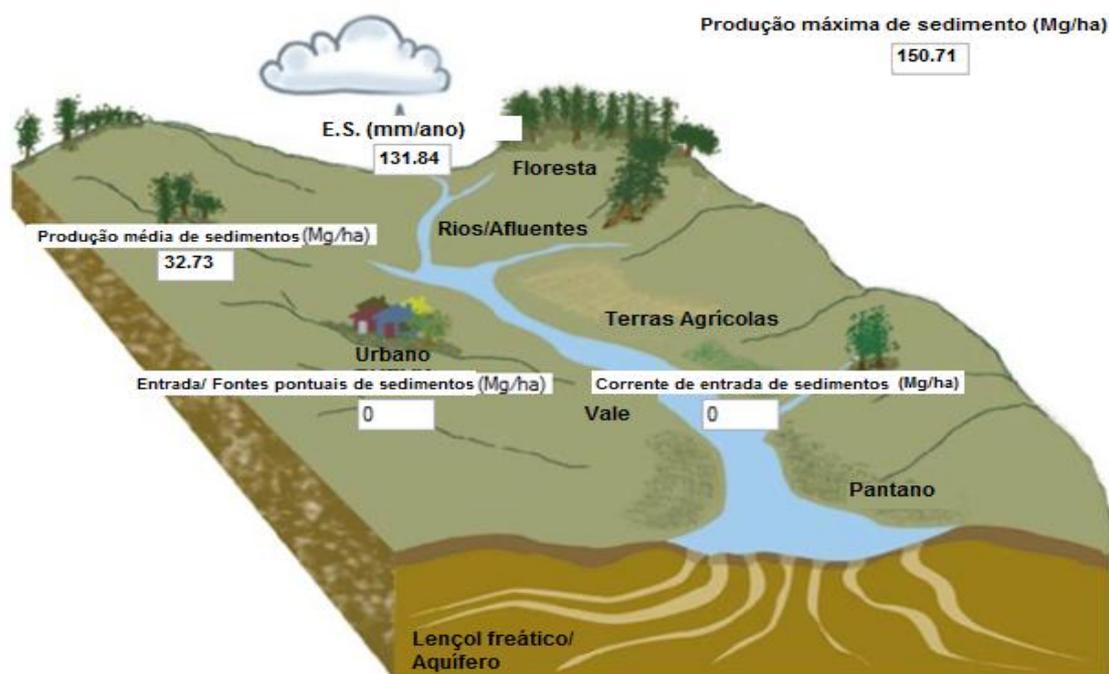


Figura 52 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 4.

5.9.4 Cenário 5: crescimento urbano

Nesse último cenário de crescimento urbano, será simulado um aumento na mancha urbana na bacia do ribeirão José Pereira, onde áreas inicialmente com pastagem, solo exposto, agricultura, floresta e água são substituídos pelo uso urbano.

As simulações foram realizadas usando a mesma calibração do modelo, com os mesmos períodos de simulação e de aquecimento do modelo. A entrada de solo é a mesma nos cenários 1, 2, 3 e 4, porém, o mapa de uso do solo foi alterado, de maneira a evidenciar um crescimento urbano, sendo este limitado pela rodovia Itajubá-Maria da Fé (BR383), como mostrado na Figura 53.

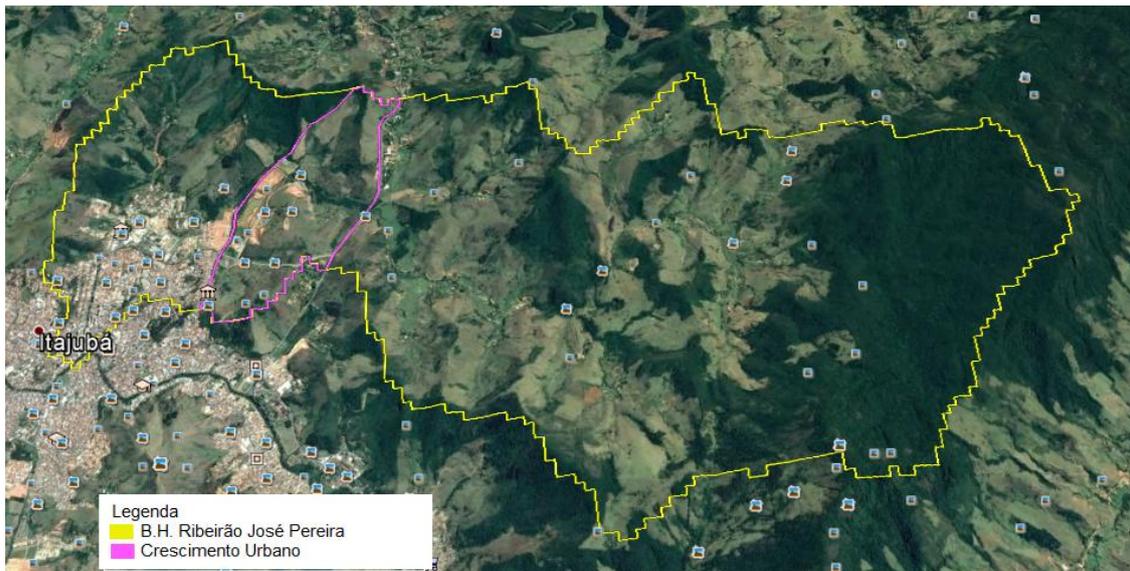


Figura 53 Crescimento da urbanização idealizado para o cenário 5.

Enfim, com esse polígono gerado, um novo mapa de uso do solo pode ser inserido no modelo SWAT, contendo essa área de crescimento urbano que foi associada ao mesmo uso urbano de baixa a média densidade de população, uma vez que, não há uma tendência de crescimento na região tão pronunciado, sendo observada com o passar dos anos. Enfim, a Figura 54 apresenta o novo banco de dados gerado pelo modelo para o uso do solo.

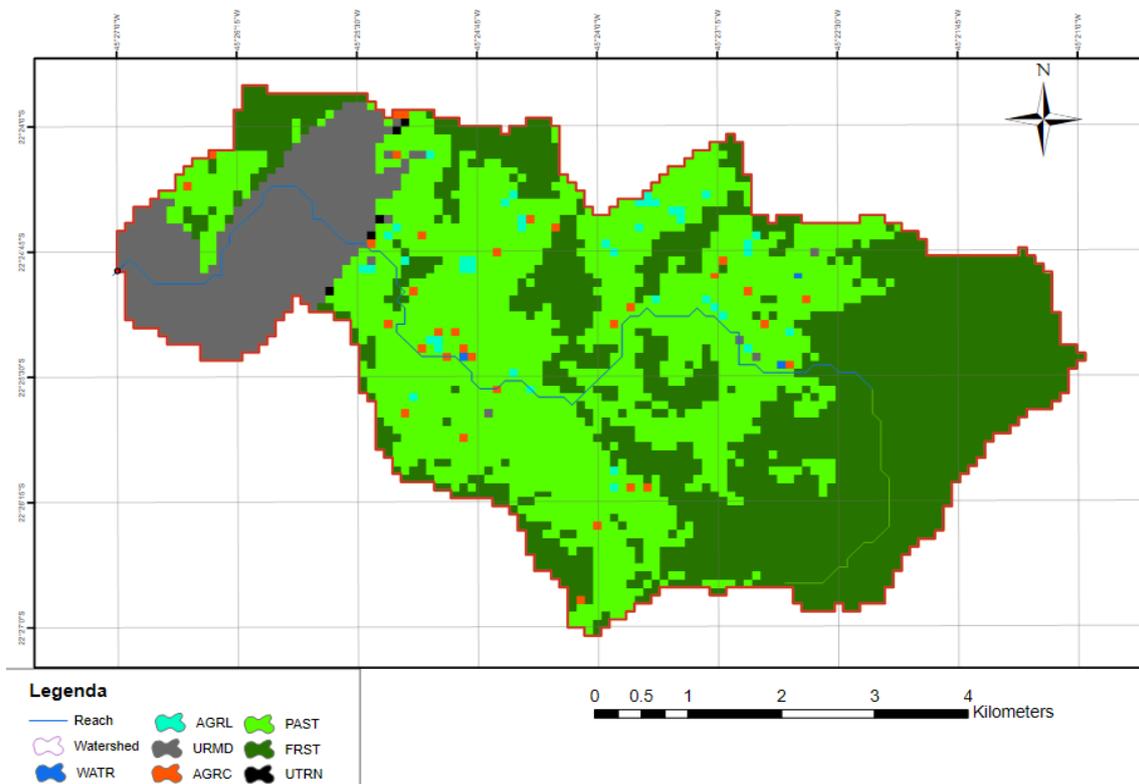


Figura 54 novo mapa de uso do solo para crescimento urbano, cenário 5.

Para essa nova configuração de uso do solo e mantendo as demais entradas, novas HRUs foram geradas, ou seja, novas combinações de uso do solo, solo e declividades e são apresentadas na Tabela 24 a seguir.

Tabela 24 Unidades de resposta hidrológica para o cenário 4.

URH	Uso do solo	Tipo de solo	Classe de declividade
1	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	10 - 20%
2	Residencial baixa/média densidade	Argissolo	20 - 30%
3	Residencial baixa/média densidade	Cambissolo	10 - 20%
4	Residencial baixa/média densidade	Cambissolo	0 - 10%
5	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	0 - 10%
6	Residencial baixa/média densidade	Solo Urbano	10 - 20%
7	Pastagem	Argissolo	20 - 30%
8	Pastagem	Argissolo	10 - 20%
9	Pastagem	Argissolo	30 - 45%
10	Pastagem	Cambissolo	30 - 45%
11	Pastagem	Cambissolo	20 - 30%
12	Floresta Mista	Argissolo	20 - 30%
13	Floresta Mista	Argissolo	30 - 45%
14	Floresta Mista	Cambissolo	30 - 45%
15	Floresta Mista	Cambissolo	< 45%

A comparação entre as vazões do cenário Atual e as vazões simuladas para o cenário de crescimento urbano foi realizada e os resultados mostram que a vazão de pico por vezes, superam as vazões do cenário Atual, conforme pode ser visto na Figura 55. Fato este esperado, uma vez que, com a urbanização, novas áreas passam a ser impermeáveis, com a presença de telhados, ruas, passeios, garagens, e outras estruturas de concreto, favorecendo o escoamento superficial e dificultando a infiltração.

Durães (2010) afirma que o crescimento urbano contribuiu para uma diminuição da percolação, aumentando o escoamento superficial, o que contribuiu em um decréscimo na disponibilidade hídrica das vazões médias. Em contrapartida, observa-se comportamento oposto em locais sem presença de núcleos urbanos.

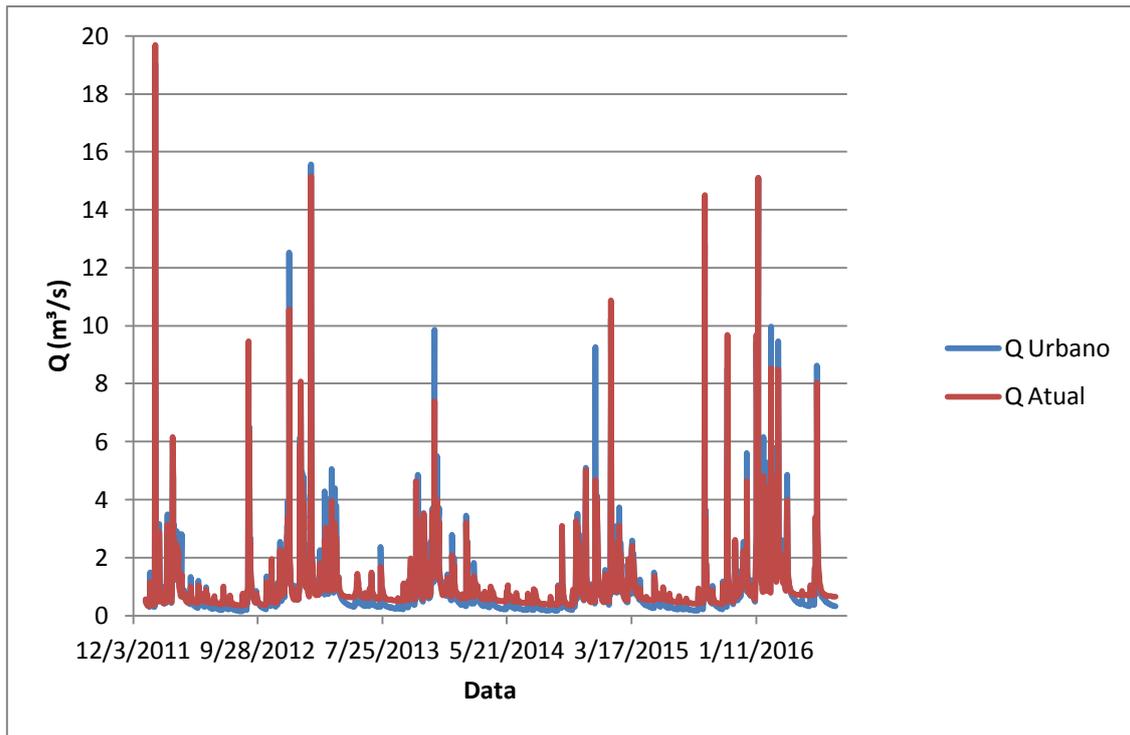


Figura 55 Vazões do cenário Atual e simuladas no cenário de crescimento urbano.

A Figura 56 apresenta os fluxos hidrológicos com o valor de cada componente. Observa-se que o escoamento superficial médio aumentou em comparação com o cenário Atual, ou seja, foi de 120,3 mm para 179,86 mm, um aumento de 49,51 %, fato associado a diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial, causados pela impermeabilização do solo da bacia do ribeirão José Pereira.

A evapotranspiração passou do cenário Atual de 556,6 mm para 671,8 mm, um aumento de 20,7 %, esse aumento pode estar associado ao aumento de coberturas que possam favorecer a evaporação e como não está discriminado no modelo a evaporação da transpiração, é computado como um valor de evapotranspiração. O fluxo lateral tem um aumento para 369,2 mm, já a percolação para o aquífero, a recarga do aquífero profundo e a vazão de retorno diminuem e passam a ser, respectivamente, 148,61 mm, 7,43 mm e 139,46 mm.

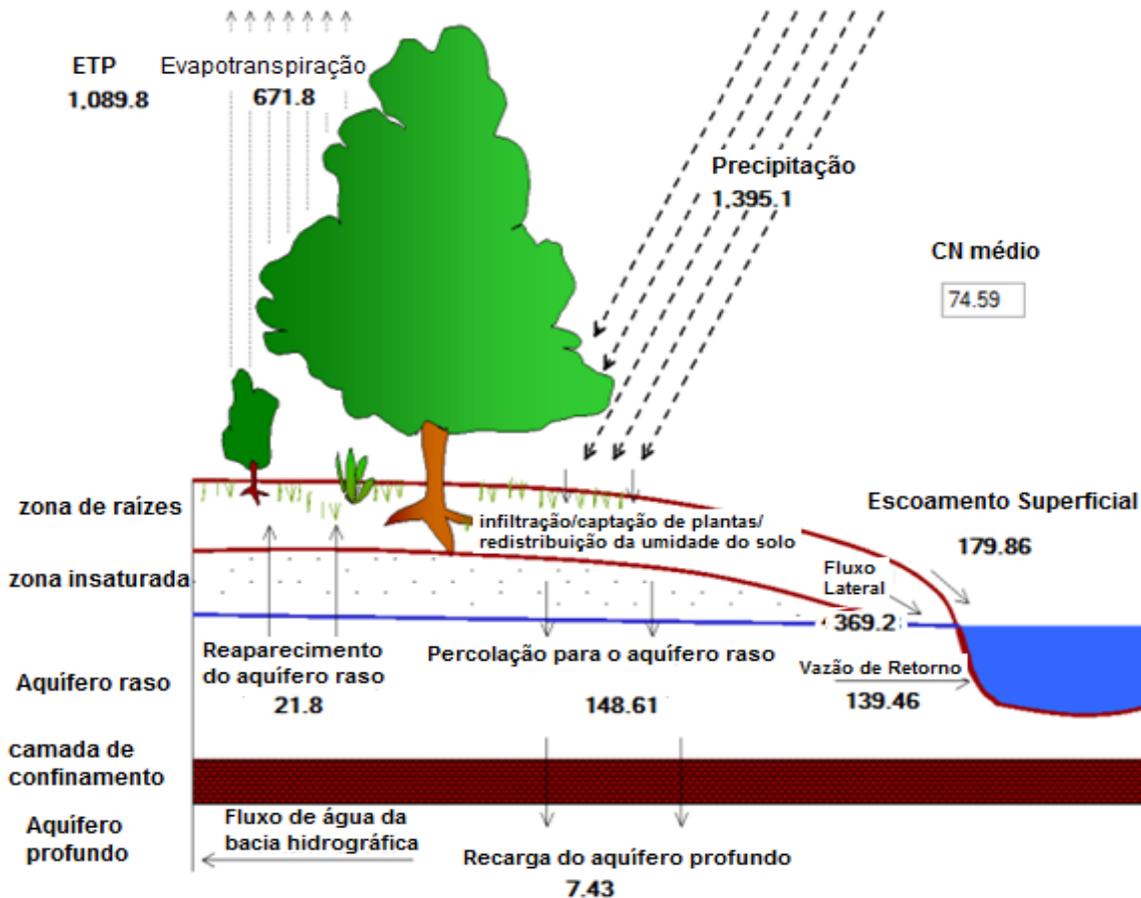


Figura 56 Balanço hídrico simulado para os anos de 2012 a 2016 para o cenário 5, valores em mm.

Esse cenário passa a ter uma nova disposição para as HRUs. O aumento do escoamento superficial que é o componente mais importante no transporte de sedimentos em bacias hidrográficas novamente justifica os valores do sedimento transportado na bacia hidrográfica, como pode ser visto na Figura 57.

A produção máxima de sedimentos é superior a 50 toneladas métricas/hectare em pelo menos uma HRU, onde o valor mais alto é o da HRU 9 que combina pastagem, argissolo e faixa de declividade de 30 - 45%, atingindo um pico de 150,07 Mg/ha.

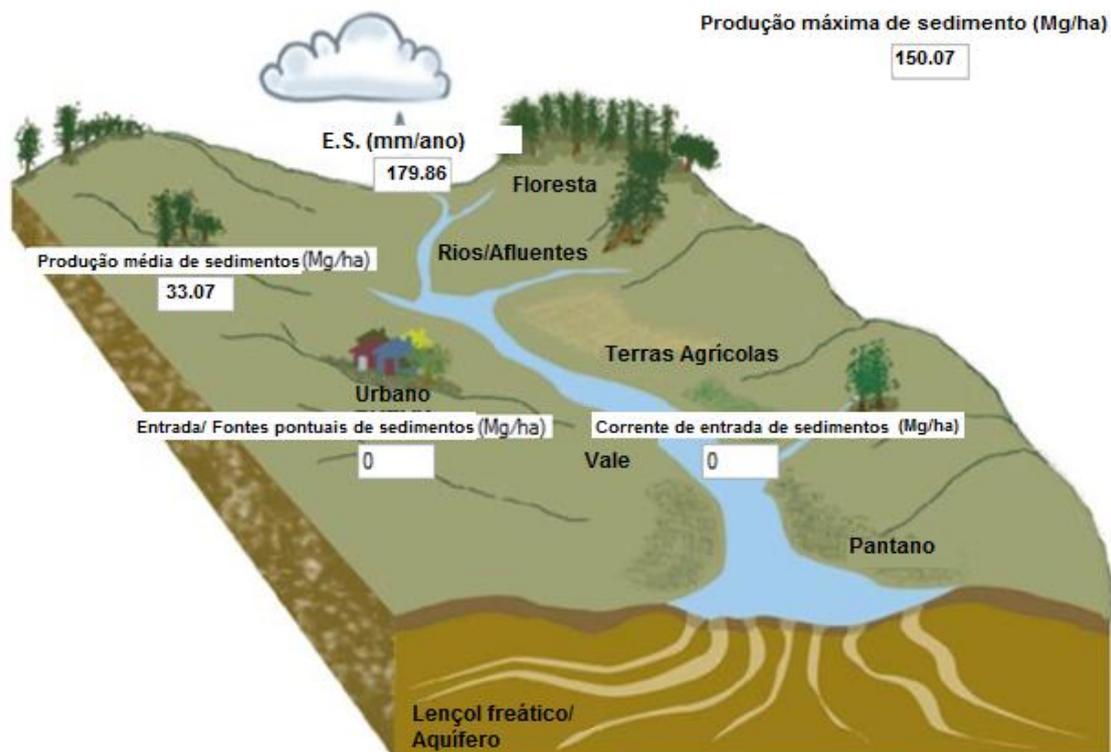


Figura 57 Fluxo de sedimento na bacia hidrográfica para o Cenário 5.

5.9.6 Comparação dos 5 cenários

Após a simulação dos cinco cenários e apresentação dos resultados, uma comparação entre eles pode ser realizada, levando-se em consideração valores das vazões máximas diárias, das vazões mínimas diárias e a variação dessas, conforme pode ser mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 Comparação das vazões extremas e desvios para os 5 cenários.

Cenário	Q máxima [m ³ /s]	Q mínima [m ³ /s]	Desvio Qmáx [%]	Desvio Qmín [%]
1	19.69	0.33	-----	-----
2	11.71	0.21	40.56	35.17
3	11.38	0.22	42.19	33.76
4	17.26	0.18	12.35	44.77
5	19.05	0.15	3.26	55.23

Comparando a vazão máxima, observa-se que para os cenários de manejo da pastagem e de reflorestamento, o que era esperado ocorreu, ou seja, há uma diminuição das vazões de pico, uma vez que o manejo agrícola e a troca dos demais usos do solo por floresta mistas, visava melhorar as condições da pastagem e substituir, principalmente, estruturas criadas pelo homem que impermeabilizam o solo. Portanto,

algo que acarreta em maior interceptação e, com isso, mais água sendo evapotranspirada pelas plantas e, ainda, mais água sendo retida no solo na zona das raízes.

Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013) dizem que as diferenças no escoamento entre os cenários floresta e pastagem, podem ser atribuídas às diferentes taxas de evapotranspiração das culturas estudadas e às alterações no escoamento superficial e infiltração de água no solo, em função do tipo de sistema radicular, manejo e taxa de cobertura do solo.

Segundo Gomes (2008), para as simulações utilizando o LISEM, as vazões máximas foram atenuadas em 37,62%, após 36 meses de reflorestamento. Em acordo a esses resultados, Blainski *et al.* (2011) encontraram que a implantação de florestas em áreas agrícolas proporcionam redução dos picos de vazão em eventos de precipitação.

Todavia, o cenário das APPs não se mostrou tão efetivo no que diz respeito a diminuição das vazões de pico quanto os outros dois anteriores, a substituição por floresta nas margens da hidrografia da bacia não foi suficiente para gerar efeitos benéficos aos fluxos hidrológicos, principalmente no que diz respeito ao escoamento superficial, portanto, chuvas mais intensas teriam maior possibilidade de ocorrência de inundação nesse cenário do que no de manejo agrícola e o de reflorestamento.

O cenário de crescimento urbano também não se mostrou tão ruim quanto era esperado, sendo que a vazão máxima deste é menor do que a vazão máxima da situação atual encontrada na bacia, contudo, o escoamento superficial médio anual é cerca de 49% maior que o do cenário atual.

Uma comparação dos fluxos hidrológicos para cada um dos cenários pode ser apresentada na forma de tabela, conforme apresenta a Tabela 26.

Tabela 26 Parcelas do fluxos hidrológicos pra cada cenário.

Cenário	Escoamento Superficial mm	Evapotranspiração mm	Fluxo lateral mm	Percolação mm	Recarga Aquífero mm	Vazão de retorno mm
1	120.30	556.6	287.37	380.7	19.04	358.19
2	58.87	671.8	405.05	221.66	11.08	208.15
3	51.28	671.2	404.32	228.74	11.44	214.76
4	131.84	666.2	383.78	183.65	9.18	172.48
5	179.86	671.8	369.2	148.61	7.43	139.46

Dessas parcelas do fluxo hidrológico pode-se observar que há uma clara influência da vegetação nas componentes, os escoamentos superficiais diminuem nos cenários 2 e 3 porém, algo que deveria ocorrer também no cenário 4, das APPs, não

ocorre, novamente parece que o modelo não respondeu às APPs de margens de rios como deveria.

A evapotranspiração em todos os cenários tem um aumento de aproximadamente 20%, fato esse associado ao que já foi mencionado anteriormente, que é associado ao aumento da interceptação da água feita pela presença de vegetação, seja ela rasteira, no caso da pastagem, ou vegetação de grande porte, no caso da floresta mista. Algo interessante ocorre no cenário 5, onde a evapotranspiração também possui um valor elevado que pode estar associado a um aumento, principalmente, da evaporação, ocorrida nas estruturas feitas pelo homem, como telhados, passeios, ruas, entre outros, que impedem que a água infiltre e a deixam mais suscetível à evaporação. Uma vez que as parcelas não são discriminadas separadamente pelo modelo, ou seja, um valor único de evaporação somado ao valor de transpiração é dado e isso pode ser a causa desse aumento.

O fluxo lateral também parece estar bastante associado a vegetação, o que percebe-se dessas simulações é que o modelo gera um aumento dessa parcela, algo em torno de 30% a 40%, nos cenários que proporcionam um aumento da área com vegetação e/ou então, a melhora da qualidade da vegetação, no caso do cenário de manejo agrícola. Fica subentendido que com a presença da vegetação mais água passa a estar preenchendo os vazios do solo na zona de raízes, tal presença gera um fluxo lateral subsuperficial em direção ao corpo d'água, portanto essa parcela não chega à zona saturada que alimenta o lençol freático e, por consequência, não chega aos aquíferos profundos. O aumento também no cenário crescimento urbano pode estar associado ao tipo de urbanização escolhido no modelo, ou seja, áreas urbanas de pouca a média densidade de população, não afetando tanto no que diz respeito à impermeabilização, tal escolha foi feita tendo como base a observação do que tem ocorrido na bacia, com o passar dos anos não tem sido observado um crescimento populacional tão elevado nem na cidade de Itajubá, muito menos na área da bacia.

A percolação ajuda a explicar um pouco do que ocorreu na componente anterior, ou seja, essa parcela diminui de 40% a 60% nos cenários, ou seja, a parcela que foi atribuída pelo modelo ao fluxo lateral, é retirada da percolação. Parece que com a presença da vegetação, menor parcela de água é capaz de vencer a zona não saturada e chegar à zona saturada. Consequentemente, ocorre a diminuição da recarga de aquíferos profundos, como menos água chega a zona saturada, a próxima camada recebe menor parcela de água, redução de 40% a 60%, ou seja, proporcional a redução da percolação.

Finalmente, a vazão de retorno que é a água que retorna ao manancial da camada saturada, diminui, resultado proporcional a redução da percolação de 40% a 61%. Como uma menor parcela de água chega a zona saturada, menos água retorna aos mananciais, portanto, o modelo parece simular algo consistente.

Para efeito de comparação pode-se observar os hidrogramas das vazões médias mensais, conforme apresentado na Figura 58. Os resultados parecem concordar com as simulações anteriores, onde as vazões simuladas, principalmente, nos picos são mais altas nos cenários da situação atual (Atual), de crescimento urbano (Urbano) e das áreas de preservação permanente (APPs), e vazões pouco menores nos cenários de pastagem em boas condições (Boas) e de reflorestamento total (100 F).

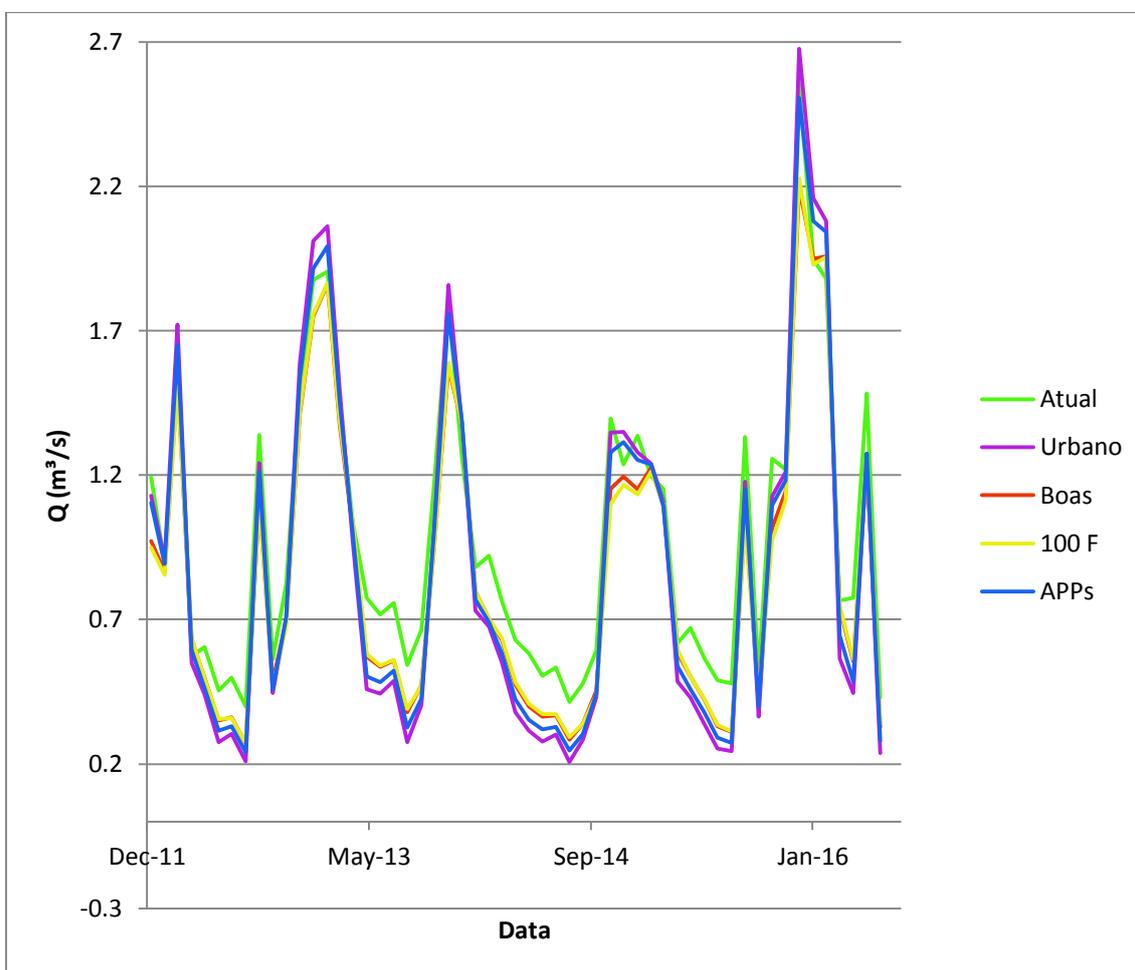


Figura 58 Comparação dos hidrogramas mensais para os cinco cenários.

Pode-se comparar a curva de permanência para cada cenário para se verificar o que ocorre, principalmente, com as vazões máximas diárias e mínimas diárias, ou seja, o comportamento das vazões com as mudanças das entradas de uso do solo, os valores de

vazão diárias e a probabilidade de ocorrência para cada cenário é apresentado na Tabela 27 e o resultado da curva de permanência, pode ser observado na Figura 60.

Tabela 27 Valores da Curva de Permanência para cada cenário.

Frequência	Atual	Boas	100% Floresta	APPs	Urbano
0	19.69369	11.70604	11.3847	17.26067	19.05101
5	2.477549	2.151616	2.083216	2.442201	2.795678
10	1.638846	1.637928	1.602121	1.596612	1.596612
15	1.317503	1.340456	1.308322	1.283992	1.247267
20	1.118271	1.159587	1.141224	1.087973	1.051248
25	0.996161	1.007638	1.003047	0.943369	0.895168
30	0.890577	0.91353	0.904349	0.849262	0.798765
35	0.812537	0.803356	0.798765	0.743678	0.70374
40	0.748268	0.720725	0.721643	0.670228	0.616059
45	0.707412	0.651866	0.652325	0.596779	0.550872
50	0.674819	0.601369	0.60596	0.546282	0.491195
55	0.642685	0.555463	0.564644	0.500376	0.444692
60	0.60596	0.514148	0.523329	0.45906	0.408013
65	0.569235	0.482013	0.491195	0.426788	0.372298
70	0.537101	0.448777	0.458326	0.395986	0.341816
75	0.514148	0.409252	0.416138	0.364723	0.316293
80	0.482013	0.374318	0.381296	0.332084	0.285444
85	0.454929	0.341495	0.349483	0.297609	0.253401
90	0.423345	0.309958	0.318221	0.270019	0.226317
95	0.390706	0.274518	0.281129	0.236049	0.197442
100	0.325015	0.210709	0.215299	0.179493	0.145522

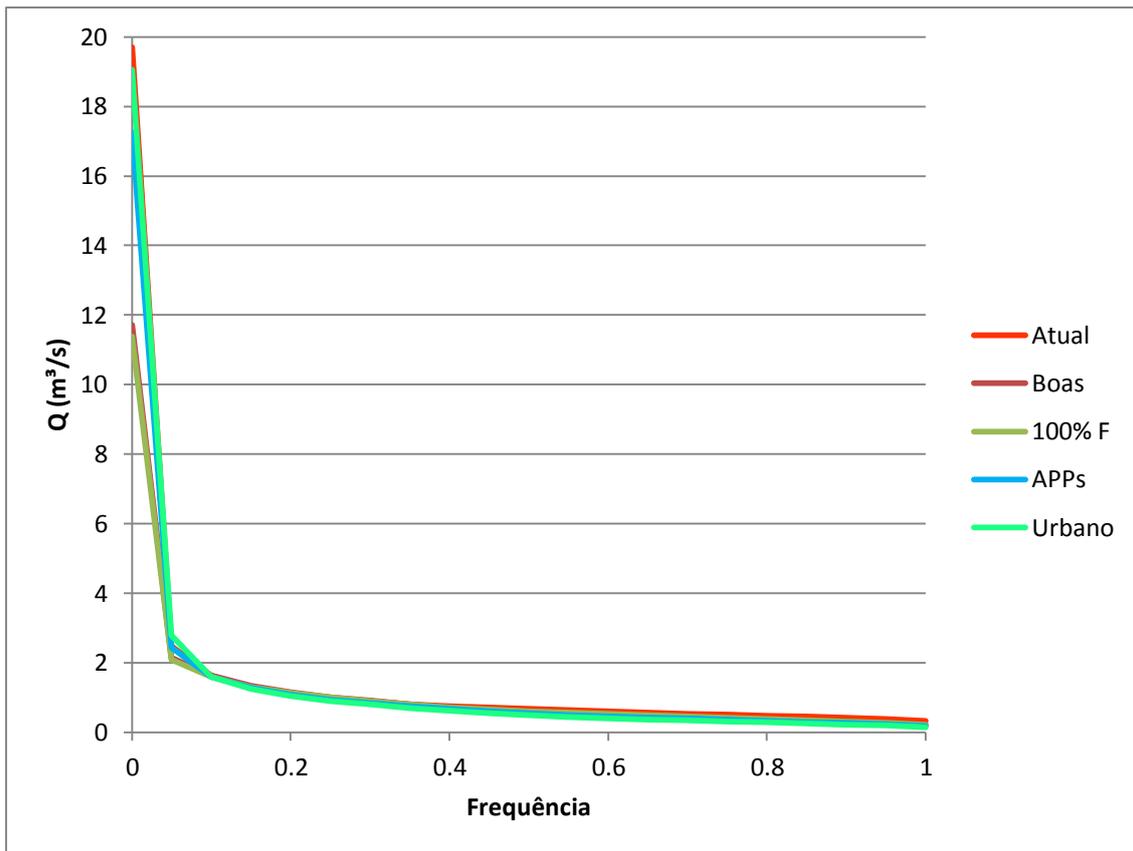


Figura 59 Curvas de Permanência para cada cenário.

Da Tabela 27 e Figura 59 observa-se que as vazões mínimas diárias, ou seja, de alta probabilidade de ocorrência, para todos os cenários, possuem um comportamento semelhante, ocorrência de 5% aproximadamente até 100% de frequência, as linhas dos cinco cenários, praticamente coincidem, portanto as mudanças do uso do solo parecem não ter efeito significativo nestas.

Para as vazões máximas diárias, ou seja, de baixa probabilidade de ocorrência (de 0% à 5%), observa-se forte influência da mudança ocorrida em cada cenário, e que está de acordo com o efeito ocorrido quando foram feitas as comparações anteriores, ou seja, para o cenários Atual, pastagem em más condições, a curva atinge a vazão mais alta, os cenários de pastagem em boas condições e de 100% floresta mista tem suas vazões máximas reduzidas e novamente o cenário das APPs de margens de rios parece não surtir o efeito desejado de redução das vazões, principalmente se comparado aos de manejo agrícola e o de reflorestamento. O cenário de crescimento urbano se aproxima do comportamento ocorrido com o cenário Atual, tendo sua vazão máxima diária praticamente a mesma.

Já os cenários de manejo agrícola e de reflorestamento, por possuírem vazões máximas menores, teriam seus efeitos atenuados e o de APPs não alcançaria o efeito desejado, uma vez que, a vazão máxima está muito próxima as máximas dos cenários Atual e Urbano.

6 CONCLUSÕES

Inicialmente pode-se concluir que o modelo SWAT, embora seja um modelo desenvolvido para características de bacias dos Estados Unidos, especificamente o estado do Texas, que possui bacias hidrográficas com características específicas como, áreas planas e desérticas, ainda pequenos volumes de precipitação, entre outras, pode ser aplicado ao Brasil e, portanto, a qualquer lugar, obtendo um bom resultado de simulação, desde que seja realizada uma calibração dos parâmetros, mais adequada possível ao local onde será utilizado. Porém a qualidade dos resultados está totalmente associada aos dados de entrada.

Nesse trabalho, por exemplo, uma série de parâmetros de clima mais longa, com menos falhas e da própria bacia e que representasse melhor o que realmente acontece na bacia hidrográfica, obteria resultados mais próximos entre o que é simulado e o observado, já que foram utilizados dados de outras bacias próximas. Seria interessante também a medição da vazão do ribeirão José Pereira e uma série tão longa quanto os dados de parâmetros climáticos. A qualidade dos resultados ainda ficou limitada pela resolução do MDE, que no caso, foi 90 metros e já é possível obter um MDE com resolução melhor que permita um maior detalhamento da área em estudo e, portanto, maior precisão nos resultados.

Embora a calibração realizada não tenha sido muito exigente, os resultados simulados, quando comparados ao observado, na média, parecem estar de acordo com o que realmente ocorre na bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira, ainda mais levando-se em consideração os erros inerentes ao uso de modelos matemáticos, que acabam por simplificar os fenômenos ocorridos, a fim de facilitar a resolução das equações que os descrevem.

O cenário da situação atual mostra que algo pode ser feito na bacia para que as vazões sejam reduzidas, pois as vazões simuladas, principalmente a parcela do escoamento superficial, são bastante elevadas. Esse efeito tem sido observado principalmente na área urbana, podendo gerar prejuízos materiais, a moradores, comerciantes e para a Universidade Federal de Itajubá.

A simulação do cenário de pastagem em boas condições, ou seja, de manejo agrícola, indica que essa seria uma possível solução do problema citado anteriormente no cenário Atual. Para a redução das vazões, principalmente do escoamento superficial, uma vez que a redução simulada foi de, aproximadamente, 50%. Portanto o simples fato

de recuperar a pastagem degradada e não alterar os demais usos dentro da bacia pode ajudar na diminuição das vazões.

O cenário de troca de toda área da bacia por floresta acaba servindo mais de comparação com os demais, uma vez que o reflorestamento de toda área seria impossível devido a ocupação da bacia pela urbanização e demais usos. Nele observa-se grande diminuição das vazões, principalmente no escoamento superficial, sendo algo semelhante ao que ocorre no cenário de manejo agrícola. Portanto, novamente indicando que o manejo da pastagem possa ser um bom ponto de partida para a redução das vazões.

Algo inesperado ocorre com o cenário das APPs de margens de rios, ou seja, parece não surtir tanto efeito sobre as vazões, simulando algo muito próximo ao que é simulado no cenário Atual. Esperava-se que as vazões fossem reduzidas, tanto quanto nos cenários de manejo agrícola e de reflorestamento, o que não ocorreu. Isso pode ser atribuído à pequena mudança ocorrida nesse cenário, na entrada de uso do solo, ou seja, as APPs não ocuparam uma área tão grande dentro da bacia, com um aumento do uso floresta mista (associado às APPs) de apenas 7,21% e porque a ocorrência das APPs foi principalmente em áreas antes ocupadas por pastagem e floresta e não em áreas urbanizadas.

Já para o cenário de crescimento urbano, as vazões simuladas novamente são altas, semelhantes ao cenário de pastagem em más condições, embora nessa simulação seja considerado que as pastagens estejam em condições regulares. Portanto, o crescimento urbano, que no caso, nem foi tão elevado, aumentou aproximadamente 8,8% da área da bacia, gera bastante efeito nas vazões, podendo causar mais problemas dentro da bacia, principalmente com o aumento da impermeabilização do solo e consequente aumento do escoamento superficial.

O presente trabalho ainda inicial pode servir de base, para novos estudos dentro da bacia em diversas frentes, inclusive em estudos de inundações, sejam eles aprofundando ao que é proposto neste ou até mesmo que apresentem novas alternativas de soluções. Ainda, levando-se em consideração o que foi comentado sobre os cenários, propõe-se que o manejo da pastagem possa ocorrer nas áreas onde esta se encontra degradada, para que o efeito simulado possa ser observado na bacia.

Propõe-se também, em conjunto com o manejo agrícola, a utilização de telhados verdes, jardins e até mesmo pavimentos de concreto permeável em garagens, pátios e arruamentos, que auxiliem no aumento da infiltração e, consequentemente, na

diminuição da água disponível ao escoamento superficial. O que se observa nos resultados é que se a tendência de crescimento urbano ocorrer, e nada for feito para a redução das vazões, o problema com as inundações tendem a continuar e até se agravar na bacia hidrográfica.

Na geração de sedimento, observa-se uma variação muito grande de um cenário a outro que está totalmente associada ao crescimento do escoamento superficial. Embora não tenha sido feito nenhum tipo de calibração, na média anual os resultados parecem seguir o mesmo efeito observado na vazão, novamente com exceção do cenário das APPs, onde se esperava uma diminuição e ocorre o contrário. No geral, com o manejo adequado da pastagem e com a substituição da área por floresta, ocorre uma diminuição drástica da média anual de sedimento transportado. Já para os cenários das APPs e do crescimento da urbanização, a média anual de sedimento transportado praticamente dobra.

Porém, algo curioso ocorre para o valor máximo de sedimento, nos cenários onde há o aumento da vegetação ou a melhora da qualidade da vegetação, os valores máximos estão muito próximos da situação atual, algo inesperado, uma vez que, o escoamento superficial para esses cenários foi reduzido pela metade. Já para os cenários das APPs e do crescimento urbano, os valores máximos praticamente triplicam, efeito esse que não pode ser facilmente explicado, já que o escoamento superficial para esses cenários aumentam 10% e 50% respectivamente. Portanto, não se observa uma relação tão bem definida neste estudo, entre o escoamento superficial e o transporte de sedimento, porém verifica-se que há correlação entre eles.

Embora possa ser considerado que o estudo tenha alcançado um resultado importante e que possa servir como o início de melhorias a serem realizadas na bacia, algo que pode ser sugerido para melhora deste trabalho. A utilização de um modelo digital de elevação do terreno com melhor resolução espacial, para que o maior detalhamento da área da bacia possa gerar melhores resultados de simulação.

Outra recomendação é que em futuros estudos uma série maior de dados, mais consistente e realista, de vazões observadas possa ser adquirida, se possível, vazão medida no posto fluviométrico e não somente obtida pela curva chave.

Recomenda-se ainda a obtenção de uma série de dados climáticos de mesma escala temporal da série de vazão, juntamente com uma série de dados de sedimentos com mesma escala temporal, para que uma nova e mais exigente calibração seja realizada, com a mudança de novos parâmetros e diferentes valores dos utilizados neste

trabalho e, então, os erros inerentes a modelagem possam ser minimizados. É se possível a utilização do SWAT Cup para a realização da análise de sensibilidade e calibração do modelo.

REFERÊNCIAS

ABARQUERO, N.A. et al. **Implications of land use change on runoff generation at the plot scale in the humid tropics of Costa Rica**. Revista CATENA, Madri, Espanha, vol. 135, p. 263 – 270, 2015.

AGÊNCIA CÂMARA. **Código Florestal: entenda o histórico da legislação ambiental brasileira**. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/codigo-florestal/codigo-florestal-entenda-historico-legislacao-ambiental-brasileira-34196>>. Acesso em: 5 de out. 2012.

AGUIAR, R.O. **Estudos de calibração do modelo AVSWAT em bacias hidrográficas do Sul de Minas Gerais, Serra da Mantiqueira**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2011.

APARECIDA LELIS, T.; CALIJURI, M.L. **Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT**. Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Universidade de Taubaté, Taubaté - SP, vol. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

ARAÚJO, E.L. **Estimativa e análise do crescimento da demanda de água considerando cenários de uso e ocupação do solo**. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos hídricos e sanitária) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502: Rochas e Solos: Terminologia**, Rio de Janeiro, 1995.

BALDISSERA, G.C: **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá - MT, 2005.

BALTOKOSKI *et al.* 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 Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v. 34, p. 253 - 261, 2010.

BEZERRA, I.S.; SILVA, T.C. Análise de riscos à perda de solo para diferentes cenários de uso e ocupação na bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, João Pessoa - PB, v 19, p. 195 - 204, n.4, 2014.

BLAINSKI, E. et al. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v.24, p. 65 - 70, n.1, 2011.

BONUMÁ, N.B. **Curso Básico do Modelo SWAT - Calibração e Análise da Sensibilidade dos Parâmetros do SWAT (Curso)**. Santa Maria - RS, 7 - 11 de out, 2013.

BRASIL. Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. **Aprova o código florestal que com este baixa.** Poder executivo. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D23793impresao.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Institui o novo Código Florestal.** Poder Legislativo, Capital Federal, Brasil: Diário Oficial da União, 16 set. 1965. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771impresao.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

BRASIL. Lei nº 7.511, de 7 de julho de 1986. **Altera dispositivos da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o novo Código Florestal.** Poder Legislativo, Brasília – DF. Diário Oficial da União, seção 1, 8 jul. 1986, p. 10049. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7511impresao.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

BRASIL. Lei nº 7.803, de 18 de julho de 1989. **Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nºs 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986.** Poder Legislativo, Brasília – DF. Diário Oficial da União, seção 1, 20 jul. 1989, p. 12025. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 1 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.** Poder Legislativo, Brasília – DF. Diário Oficial da União, seção 1, 13 fev. 1998, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

BRASIL. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. **Altera os arts. 10, 40, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR,** e dá outras providências. Poder Executivo, Brasília – DF. Diário Oficial da União, seção 1, Eletrônico - Edição Extra, 25 ago. 2001, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/mpv/2166-67impresao.htm>. Acesso em: 5 out. 2015.

CAMPOS, S.M.F.; DIAS, I.C.S.; SANTOS, C.A.G. Influência da erosividade da chuva na produção de sedimentos. In: MESSIAS, A.S.; COSTA, M.R.N. (Org). **Água Superficial, Residuária e Sedimento.** Recife: UNICAP, 2007. p. 189-206.

CASTRO, C.F.A. **Gestão florestal no Brasil colonial.** Dissertação (Doutorado em desenvolvimento sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2002.

CARVALHO, D, F.; SILVA, L.D.B. **Hidrologia**. O Ciclo Hidrológico: Ciclo da Água. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2006.

CARVALHO, N.O. **Hidrosedimentologia Prática**. 2 ed. Rio de Janeiro - RJ. Editora: Interciência, 2008.

CARVALHO, L.A. **O Novo Código Florestal Comentado: Artigo por Artigo**. Curitiba - PR. Editora: Juruá, 2013.

CUARTAS, L.A. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology**, vol. 462 - 463, p. 15 - 27, 2012.

DIAS, L.T.; WALDE, D.H.G. Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do lago Paranoá - DF. **Revista brasileira de cartografia**. Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2012.

DURÃES, 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 (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2010.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Extensão e distribuição dos solos**. Brasília - DF. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fesi63xh02wx5eo0y53mhyx67oxh3.html>>. Acesso 24 set. 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Classes de declividade**. Brasília - DF. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/sesmaria/MAPA-SESMARIA-EMBRAPA-90-60.pdf>>. Acesso em 5 de out. 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Brasil em relevo**. SRTM. Brasília - DF. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>>. Acesso 20 de outubro de 2015.

FERREIRA, R. **O que é o Código florestal**. Rio de Janeiro - RJ, 2014. Disponível em <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28574-o-que-e-o-codigo-florestal>> Acesso em 5 out. 2015.

FERRIGO, S. *et al.* Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Distrito Federal. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH**: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, João Pessoa - PB, 2014.

FLAUZINO, B, K. **Degradação do solo pela erosão hídrica e Capacidade de uso em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2012.

- 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**. UAEA/UFCEG, Campina Grande, PB, v.18, n.2, p.194 – 201, 2014.
- GARCEZ, L.N. ; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 2 ed. São Paulo - SP. Editora: Edgard Blucher, 1998.
- GHORABA, S.M. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. **Alexandria Engineering Journal**, vol. 54, p. 583 – 594, 2015.
- GODOY, M.D.P. **Mudanças na sedimentação no estuário do rio Jaguaribe (CE) devido a mudanças nos usos do solo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2011.
- GOMES, R.L. Aspectos físico-ambientais e de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Almada-BA. **Boletim de Geografia**, Maringá, PR, vol. 30, n. 2, p. 45 - 57, 2012.
- HALWATURA, D.; NAJIM, M.M.M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling e Software**, vol. 46, p. 155 - 162, 2013.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SISTEMA INTEGRADO DE DADOS AMBIENTAIS - SINDA**. Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>>. Acesso 2015.
- KOUMROUYAN, A. **Desenvolvimento de cenários de cobertura da terra em uma bacia de mesoescala na mata Atlântica e análise de respostas hidrológicas simuladas pelo modelo DHSVM**. Dissertação (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, São José dos Campos - SP, 2015.
- LIMA, O. **Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2012.
- LIN, B. et al. Analyses of land use change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. **Ecological Indicators**, vol. 58, p. 55-63, 2015.
- MACEDO, F.L. et al. Modelagem da produção de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do riacho Jacaré - SE. **Revista RAEGA: O espaço geográfico em análise**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2012.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Água / recursos hídricos / águas subterrâneas / ciclo hidrológico. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso 3/4/2017 às 16:19.

MARINHO FILHO, G.M. et al. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas - RS, v. 6, n. 2, 2012.

MOHAMMADI, S.A.; NAZARIHA, M.; MEHRDADI, N. Flood Damage Estimate (Quantity), Using HEC-FDA Model. Case Study: The Neka River. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 1173-1182, 2014.

MOREIRA, A.A.C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Granjeiro-Crato - CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte - CE, 2013.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume do escoamento superficial com simulação de cenários alternativos.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, Piracicaba - SP, 2005.

NIRAULA, R.; MEIXNER, T.; NORMAN, L.M. Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. **Journal of Hydrology**, p. 439 - 451, Tucson - USA, 2015.

NOWATZKI, A. **Bacias hidrográficas.** Disponível em:
<file:///C:/Users/Filipe/Downloads/RedeHidrografica.pdf>. Acesso 18/08/2016.

OHNUMA JÚNIOR, A.A.; MENDIONDO, E.M. Análise de cenários com proposição de medidas de recuperação ambiental para a micro-bacia do Tijuco Preto, São Carlos - SP. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro - RJ, n. 32, p. 42 - 51, jun. 2014.

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.

PEREIRA, J.C.D. **Aplicação do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na bacia hidrográfica do ribeirão da Cachoeirinha – MG.** Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2010.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica.** São Paulo - SP. Editora: Edgard Blucher, 1976.

PONTREMOLEZ, N.S. **Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP.** Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2013.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental.** Relatório técnico parcial - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista - SP, 2000.

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.** Dissertação (Doutorado em Geografia na área de Análise Ambiental e Dinâmica Territorial) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2012.

SANTOS, S.I.P. **Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do Solo até 2040 em Portugal Continental.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informações Geográficas) - Universidade de Lisboa, Portugal, nov. 2014.

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 (RBRH)**, vol. 10, n.4, p. 5 - 18, 2005.

SERPA, D. et al. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. **Science of The Total Environment**, vol. 538, p. 64–77, 2015.

TAKEDA, T.O. Uso e ocupação do solo urbano. Disponível em: <http://www.jurisway.org.br/v2/dhall.asp?id_dh=12363>. Acesso 17/08/2016.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** 2 ed. São Paulo - SP. Editora: Oficina de Textos, 2003.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. **Drenagem Urbana:** Coleção Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2009.

VANZELA, L.S.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, UAEEA/UFCG, v.14, n.1, p.55 – 64, 2010.

VAN WIE, J.B.; ADAM, J.C.; ULLMAN, J.L. Conservation tillage in dryland agriculture impacts watershed hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 483, p. 26 - 38, 2013.

VIEIRA, L.L.A. **Efeitos de alterações de uso e ocupação do solo e de mudanças climáticas sobre o escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema – Alagoas.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2011.

VIOLA, M.R. et al. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil., p. 4537 - 4550, 2014.

WAGNER, P.D. et al. Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of a rapidly developing Indian catchment. **Science of The Total Environment**, vol. 539, p. 153–164, 2015.

WEHMANN, A.; LIU, D. A spatial–temporal contextual Markovian kernel method for multi-temporal land cover mapping. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Columbus - US, vol. 107, p. 77 - 89, 2015.

WINCHELL, M. et al. **User's Guide**. ArcSWAT Interface for SWAT 2012. Texas - US, 2013.