



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Aline Claro de Oliveira Guglielmi

MODELAGEM DO CONTROLE DA EROSÃO COMO SUPORTE À
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROVIDORAS DE SERVIÇOS AMBIENTAIS:
ESTUDO DE CASO NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO UBERABA
– UBERABA/MG

Rio de Janeiro
2017

Aline Claro de Oliveira Guglielmi

MODELAGEM DO CONTROLE DA EROSÃO COMO SUPORTE À
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROVIDORAS DE SERVIÇOS AMBIENTAIS:
ESTUDO DE CASO NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL MUNICIPAL DO
RIO UBERABA – UBERABA, MG

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D.Sc.
Coorientadora: Julia Célia Mercedes Strauch, D.Sc.

Rio de Janeiro
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Guglielmeli, Aline Claro de Oliveira.

MODELAGEM DO CONTROLE DA EROSÃO COMO SUPORTE À IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROVIDORAS DE SERVIÇOS AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL MUNICIPAL DO RIO UBERABA – UBERABA, MG / Aline Claro de Oliveira Guglielmeli.

– 2017. f. : Il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2017.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D.Sc.

Coorientadora: Julia Célia Mercedes Strauch, D.Sc.

1. InVEST. 2. Recursos Hídricos. 3. Sistema de Informações Geográficas (SIG). 4. Solos. I. Fernandes, Amarildo da Cruz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de

MODELAGEM DO CONTROLE DA EROSÃO COMO SUPORTE À
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROVIDORAS DE SERVIÇOS AMBIENTAIS:
ESTUDO DE CASO NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL MUNICIPAL DO
RIO UBERABA – UBERABA, MG

Aline Claro de Oliveira Guglielmi

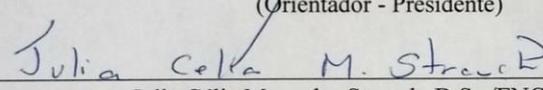
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D.Sc.
Coorientadora: Julia Célia Mercedes Strauch, D.Sc.

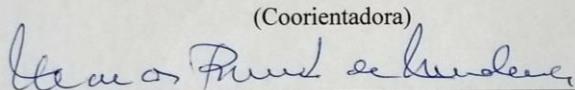
Aprovada pela Banca:



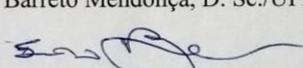
Amarildo da Cruz Fernandes, D.Sc./UFRJ/POLI/DEIPEA
(Orientador - Presidente)



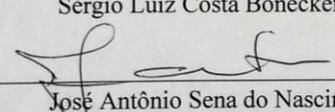
Julia Célia Mercedes Strauch, D.Sc./ENCE/UERJ
(Coorientadora)



Marcos Barreto Mendonça, D. Sc./UFRJ/POLI



Sérgio Luiz Costa Bonecker, D. Sc./UFRJ/IB



José Antônio Sena do Nascimento, D.Sc/IBGE

Rio de Janeiro
2017

Este trabalho é dedicado ao
meu filho Antônio.

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Antônio, por ser a razão do meu viver.

À mamãe que me prestou todo amparo na fase final de elaboração desse trabalho.

À minha tia Valdirene, minha avó Sirlene e ao meu avô Antônio por algumas vezes terem cuidado do Antônio para que eu pudesse me dedicar à pesquisa.

Ao André, que sempre me prestou todo auxílio para elaboração desta pesquisa.

À professora Júlia, uma das pessoas mais maravilhosas que pude conhecer no meio acadêmico até hoje. Sempre tão prestativa, dedicada e compreensiva.

Ao professor Amarildo por ter aceitado me orientar e ter sido sempre tão compreensivo e atencioso.

À secretária do PEA Andrea, por ser sempre tão prestativa.

À todo corpo docente do PEA e aos funcionários da UFRJ.

E à todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

RESUMO

GUGLIELMELI, Aline Claro de Oliveira. **Modelagem do controle da erosão como suporte à identificação de áreas provedoras de serviços ambientais:** estudo de caso na Área de Proteção Ambiental Municipal do Rio Uberaba – Uberaba, MG. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

A utilização de modelos é uma das formas de identificar áreas potencialmente provedoras de serviços ambientais. Um desses modelos é o de retenção de sedimentos do programa InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), que utiliza como base a Equação Universal da Perda de Solo (EUPS). Uma vez que o aporte de sedimentos para os leitos dos rios impacta na produção de água, este estudo foi realizado na Área de Proteção Ambiental (APA) municipal do rio Uberaba, criada para proteger o manancial de abastecimento público do município de Uberaba, MG. O objetivo principal é identificar as áreas provedoras do serviço ambiental que apresentam controle da erosão. Para se alcançar tal objetivo, foram estimadas as perdas de solo, a retenção de sedimentos, a exportação de sedimentos, as perdas de solo nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba para um cenário hipotético, em que as Áreas de Preservação Permanente (APPs) foram reflorestadas de acordo com a Lei 12.651/2012; e por fim, foram comparados os resultados da modelagem do cenário atual (ano de 2016) com o cenário hipotético. O módulo de retenção de sedimentos do programa InVEST utiliza como dados de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE), a delimitação das microbacias hidrográficas, os mapas da erosividade das chuvas, da erodibilidade dos solos, de uso e ocupação da terra, a tabela biofísica além de fatores intrínsecos ao modelo, que são as variáveis k_b e IC_0 de calibração e a variável relação máxima do aporte de sedimento ($SDR_{máx}$). Como resultado identificou-se que as microbacias da APA municipal do rio Uberaba foram classificadas com perdas de solos média (61%), média forte (27%), forte (2%), nula a pequena (6%) e moderada (4%). A microbacia do Córrego Lanhoso foi considerada, uma área crítica, necessitando prioritariamente da implantação de ações de recuperação das áreas de preservação permanente e práticas conservacionistas do uso e manejo do solo, ocupando uma área de cerca e 4% da área total da APA municipal do rio Uberaba, essa microbacia apresentou a segunda maior estimativa de perda de solo em ton/ha.ano e a terceira que exporta mais

sedimentos para o leito do rio Uberaba. De acordo com a modelagem do programa InVEST, o total de sedimentos estimados pelas microbacias que compõem a APA municipal do rio Uberaba em 2016 foi de 2.620.062 ton/ano e para o cenário futuro foi de 1.258.989 ton/ano. Esse resultado indica que a recuperação de cerca de 6 km² de APPs pode reduzir a geração de sedimentos em 48%. Apesar do InVEST ter se apresentado como uma importante ferramenta, o modelo analisa somente o período de acordo com o uso e cobertura da terra baseado na imagem de satélite escolhida, ou seja, não quantifica as perdas de solo sazonalmente, isto é, os valores estimados pelo programa InVEST podem estar subestimados.

Palavras-chave: InVEST; Recursos Hídricos; Sistema de Informações Geográficas (SIG); Solos.

ABSTRACT

GUGLIELMELI, Aline Claro de Oliveira. **Erosion control modeling as support for identification of environmental service provider areas:** case study in the Municipal Environmental Protection Area of Uberaba River – Uberaba, MG. Rio de Janeiro, 2017. Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Utilizing models is a form of identifying potential areas that provide environmental services. One of these models is the sediment retention program from InVest (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) that uses the Universal Equation of Soil Loss. Since the input of sediments to river beds impacts on water production, this study was carried out in the Municipal Environmental Protection Area (EPA) of the Uberaba River, which was created in order to protect the public water supply of the municipality of Uberaba, MG. The main objective is to identify the environmental service provider areas that have erosion control. To reach this objective, the soil losses, sediment retention, sediment export, soil losses in the microbasins of the municipal EPA of the Uberaba river were estimated for a hypothetical scenario, in which the Permanent Preservation Areas (PPAs) were reforested according to Law 12.651/2012; Lastly, the modeling results of the current scenario (year 2016) were compared with the hypothetical scenario. The sediment retention module of the InVEST program uses as input data the Digital Elevation Model (DEM), the delimitation of watersheds, rain erosivity maps, soil erodibility, land use and occupation, biophysical table as well as intrinsic factors to the model, which are the variables k_b and IC_0 of calibration and the variable maximum relation of the sediment input (SDRmax). As a result, it was identified that the microbasins of the municipal EPA of the Uberaba River were classified with the following soil losses: medium (61%), medium strong (27%), strong (2%), null to small (6%) and moderate (4%). The Córrego Lanhoso microbasin was considered a critical area, requiring the implementation of restoration actions in the permanent preservation areas and conservation practices for land use and management. Occupying an area of approximately 4% of the total area of the municipal EPA Uberaba river, this microbasin presented the second largest estimate of soil loss in ton/ha.year and the third one that exports more sediments to the bed of the Uberaba river. According to the modeling of the InVEST program, the total sediments generated by the microbasins that compose the municipal EPA of the Uberaba river in 2016 was

2,620,062 tons / year and for the future scenario the result was 1,258,989 tons / year. This result indicates that the recovery of approximately 6 km² of PPAs can reduce sediment generation by 48%. Although InVEST has presented itself as a valuable tool, the model analyzes only the period according to the land use and coverage based on the chosen satellite image, it does not quantify the soil losses seasonally, which means that the values estimated by the InVEST program may be underestimated.

Keywords: InVEST; water resources; Geographic Information System (GIS); Soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Pagamentos por Serviços Ambientais Hidrológicos	9
Figura 2 - Fluxograma dos problemas causados pela erosão	10
Figura 3 - Utilização do Projeto Capital Natural em mais de 20 locais ao redor do mundo	16
Figura 4 - Representação matricial.....	21
Figura 5 - Mapa da localização da APA municipal do rio Uberaba.....	24
Figura 6 - Mapa das rodovias e linhas férreas	25
Figura 7 - Localização da APA municipal do rio Uberaba na bacia hidrográfica do rio Uberaba.....	27
Figura 8 - Mapa da hidrografia da APA municipal do rio Uberaba	28
Figura 9 - Covoais na nascente do rio Uberaba.....	28
Figura 10 - Área inundada no covoal	28
Figura 11 - Capim presente na área de covoais	29
Figura 12 - Plantio de cana-de-açúcar nas áreas de chapadas	30
Figura 13 - Precipitação média mensal para o ano de 2016	30
Figura 14 - Mapa Geológico da APA municipal do rio Uberaba.....	31
Figura 15 - Mapa dos Solos da APA municipal do rio Uberaba	32
Figura 16 - Série temporal do IQA para trecho do alto curso do rio Uberaba	35
Figura 17 - Fluxograma da Metodologia.....	36
Figura 18 - Correção de erros do tipo sink por meio da execução da função fill sinks..	38
Figura 19 - Estações de monitoramento pluviométrico e respectivas coordenadas	41
Figura 20 - Fluxograma das etapas de elaboração do mapa de uso e cobertura da terra	43
Figura 21 - Imagem do satélite Landsat 8, banda 5.....	44
Figura 22 - Imagem do satélite Landsat 8, composição 6R5G4B	45
Figura 23 - Área de pastagem.....	46
Figura 24 - Cultura de cana de açúcar em estágio inicial	46
Figura 25 - Cultura de cana de açúcar em estágio avançado.....	46
Figura 26 - Vegetação natural	46
Figura 27 - Solo coberto por palhada de cana de açúcar	46
Figura 28 - Solo exposto preparado para o cultivo.....	46
Figura 29 - Tela de alimentação para executar o módulo retenção de sedimentos	49

Figura 30 - Modelo Digital de Elevação da APA municipal do rio Uberaba.....	51
Figura 31 - Delimitação automática da APA municipal do rio Uberaba e da rede de drenagem	52
Figura 32 - Diferença da delimitação automática para a manual da APA municipal do rio Uberaba	53
Figura 33 - Delimitação automática das microbacias hidrográficas da APA municipal do rio Uberaba	53
Figura 34 - Mapa das microbacias hidrográficas da APA municipal do rio Uberaba....	54
Figura 35 - Mapa de erosividade da APA municipal do rio Uberaba	55
Figura 36 - Curva de distribuição da erosividade acumulada da chuva (EI30 e KE>25) de Uberaba (MG).....	56
Figura 37 - Mapa de erodibilidade da APA municipal do rio Uberaba.....	56
Figura 38 - (A) Imagem sem filtro (B) Imagem com filtro majoritário do Arcgis 10.1.	58
Figura 39 - (A) Área de solo exposto classificado como área urbana (em rosa), (B) Área de solo exposto após ser editada.....	58
Figura 40 - Mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal do rio Uberaba para o ano de 2016.....	59
Figura 41 - Tabela de atributos do mapa de uso e cobertura da terra com código numérico para cada classe	60
Figura 42 - Mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal do rio Uberaba para o cenário hipotético	61
Figura 43 - Estimativa das perdas de solo em ton/ha.ano nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba	64
Figura 44 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego 15	66
Figura 45 - Período de plantio de grãos e estabelecimentos de culturas na bacia hidrográfica do rio Uberaba.....	67
Figura 46 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego Lanhoso	69
Figura 47 - Estimativa da retenção de sedimentos em ton/ano nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba	65
Figura 48 - Estimativa da exportação de sedimentos em ton/ano das microbacias para o rio Uberaba	65
Figura 49 - Percentual do uso da terra na microbacia do Ribeirão Saudade	70
Figura 50 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego dos Pintos.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos serviços ambientais em serviços de provisão, regulação, culturais e de suporte.	7
Tabela 2: Modelo de matriz de confusão.....	22
Tabela 3: Grau de concordância a partir do índice <i>Kappa</i>	23
Tabela 4: Dados utilizados na pesquisa.	36
Tabela 5: Dados de entrada do modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3.	37
Tabela 6: Erosividade por Estação Pluviométrica.....	41
Tabela 7: Valores de erodibilidade.....	42
Tabela 8: Classes amostrais para treinamento.....	47
Tabela 9: Microbacias com as respectivas áreas	54
Tabela 10: Classe de interpretação da erosividade da chuva.....	55
Tabela 11: Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação	57
Tabela 12: Matriz de confusão gerada para a classificação em 9 classes para o ano de 2016. Em vermelho os erros e em verde os acertos.....	57
Tabela 13: Quantitativo das classes de uso e cobertura da terra para o ano de 2016.	59
Tabela 14: Tabela biofísica para a área de estudo.	60
Tabela 15: Quantitativo das classes de uso e cobertura da terra para o cenário hipotético.	61
Tabela 16: Resultado da modelagem do InVEST 3.3.3, módulo retenção de sedimentos.	62
Tabela 17: Percentual de perda de solo por microbacia	64
Tabela 18: Estimativa das perdas de solo para o cenário atual e para o cenário hipotético	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplos de aplicações dos SIG.....	19
Quadro 2: Atividades potencialmente poluidoras exercidas na bacia do rio Uberaba à montante do ponto de captação do CODAU	34
Quadro 3: Classes identificadas e reclassificação	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
APPs	Áreas de Preservação Permanente
CODAU	Centro Operacional de Desenvolvimento e Saneamento de Uberaba
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
FCA	Ferrovias Centro Atlântica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
InVEST	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs</i>
LULC	<i>Land Use/Land Cover</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
ONG	Organização não Governamental
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
RN	Coefficiente de Rugosidade
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TNC	<i>The Nature Conservancy</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
UTM	Universal Transverso de Mercator
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2. Definição do Problema e Delimitação dos Objetivos.....	3
1.3. Justificativas para o Estudo	4
1.4. Delimitação do Estudo.....	5
1.5. Organização do Trabalho.....	6
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Serviços Ambientais	7
2.2 Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)	8
2.3 Erosão do Solo.....	10
2.4 Equação Universal de Perda do Solo (EUPS)	12
2.4.1 Fator de erosividade da chuva	13
2.4.2 Fator de erodibilidade do solo	13
2.4.3 Fator topográfico	14
2.4.4 Fator de Cobertura do Solo.....	14
2.4.5 Fator de Práticas Conservacionistas	14
2.5 <i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs</i> (INVEST)	15
2.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIG).....	19
2.6.1 Uso do SIG na confecção de mapas de uso e cobertura da terra	21
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
3.1 Localização.....	24
3.2 Histórico da Criação da APA Municipal do Rio Uberaba.....	26
3.3 Objetivos da Criação da APA Municipal do Rio Uberaba.....	26
3.4 Hidrografia.....	27
3.5 Clima	30
3.6 Geologia.....	31

3.7 Solos	31
3.8 Cobertura Vegetal Remanescente.....	34
3.9 Qualidade da Água	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Obtenção dos Dados de Entrada do Modelo de Retenção de Sedimentos	37
4.1.1 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	38
4.1.2 Delimitação da APA Municipal do Rio Uberaba e das microbacias hidrográficas.....	38
4.1.3 Erosividade da Chuva.....	40
4.1.4 Erodibilidade do Solo	42
4.1.5 Mapa de Uso e Cobertura da Terra (ano base 2016)	42
4.1.6 Mapa de Uso e Cobertura da Terra para o Cenário Hipotético	48
4.2 Alimentação do Modelo de Retenção de Sedimentos do Programa InVEST	49
5 RESULTADOS	51
5.1 Dados de Entrada do Modelo de Retenção de Sedimentos Gerados no ArcGIS	51
5.1.1 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	51
5.1.2 Delimitação das microbacias hidrográficas da área de estudo	52
5.1.3 Erosividade da Chuva.....	55
5.1.5 Uso e Cobertura da Terra.....	57
5.1.6 Uso e Cobertura da Terra para o Cenário Hipotético	60
5.2 Dados de Saída do Modelo de Retenção de Sedimentos do Programa InVEST	62
6 DISCUSSÃO DO RESULTADO DA MODELAGEM UTILIZANDO O MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS DO PROGRAMA INVEST	66
6.1 Microbacias com as maiores estimativas de perdas de solo.....	66
6.2 Microbacias com as maiores estimativas de retenção e exportação de sedimentos ..	69
6.3 Comparação da Estimativa das Perdas de Solo para o Cenário Hipotético em relação ao Cenário Atual.....	71
7 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O bioma Cerrado, conhecido como berço das águas, tem um importante papel na perenidade dos rios. Neste espaço territorial encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata), o que resulta em um elevado potencial aquífero e favorece a sua biodiversidade (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2005).

De acordo com Souza *et al.* (2010) até a década de 1950, o Cerrado permaneceu praticamente inalterado. Em 1960 houve um avanço da pecuária e agricultura extensiva, mas foi durante as décadas de 1970 e 1980 que houve uma rápida expansão das áreas modificadas por ação antrópica, devido ao deslocamento das fronteiras agrícolas.

Em busca de se retirar da terra o máximo de proveito, as poucas áreas de remanescentes florestais do Cerrado são substituídas por áreas de monoculturas e pastagens. Tal modelo de uso e ocupação da terra, impacta diretamente na qualidade e quantidade dos recursos hídricos. A retirada da cobertura vegetal interfere na qualidade da água, pois aumenta o aporte de sedimentos para os leitos dos rios. A quantidade de água disponível também diminui, uma vez que o ciclo hidrológico é afetado. Uma das consequências é o encarecimento do tratamento da água para o abastecimento público.

A devastação do Cerrado nas últimas décadas, vem se tornando uma ameaça à provisão dos serviços ambientais deste bioma. Os benefícios que os seres humanos obtêm a partir dos ecossistemas são denominados serviços ambientais ou ecossistêmicos, podendo ser diretos, indiretos e regulatórios (ZOLIN, 2010). Os benefícios diretos são aqueles obtidos com o uso de um certo recurso natural como por exemplo, o uso da água, a geração da energia ou a produção de alimentos. Os benefícios indiretos são aqueles obtidos pela preservação de uma área ambiental observando aspectos tais como o ciclo de nutrientes, a produção de solos e fotossíntese. Os benefícios regulatórios são aqueles obtidos da avaliação de redução de riscos, como por exemplo, controle de enchentes, controle da erosão, purificação da água, etc.

Nesse sentido, estudos que promovam o pagamento por serviços ambientais se tornam necessários para investigar o uso de forma sustentável dos recursos naturais, de modo que gerações futuras possam usufruir destes mesmos recursos.

A criação de Programas de Pagamentos por Serviços Ambientais é uma das políticas públicas que vem sendo adotadas para alinhar os interesses de proprietários de terras que se encontram localizadas em bacias hidrográficas que possuem mananciais utilizados para abastecimento público, aos interesses das companhias de água. De acordo com Farley e Costanza (2010) o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) está se tornando cada vez mais popular como uma forma de gerenciar os ecossistemas utilizando incentivos econômicos.

De acordo com Zolin (2010) países como Costa Rica, El Salvador, Equador, Peru, Guatemala, Colômbia, EUA, Espanha e Itália já possuem sistemas de PSA em bacias hidrográficas implantados. No Brasil, o caso pioneiro é o do município de Extrema, MG. O programa denominado Conservador das Águas, foi a primeira iniciativa municipal de implantação de PSA, que se baseia na relação existente entre a floresta e os serviços prestados por ela referente a conservação do solo, quantidade e qualidade da água (ZOLIN, 2010).

O PSA é um tipo de transferência financeira dos beneficiários para aqueles que, por meio de suas atividades e práticas, conservam a natureza (SILVA, 2011). Também são chamados de compensação ou arrendamento, em que os proprietários das terras que proporcionam os serviços hídricos são beneficiados ao adotar medidas de conservação do uso da terra (QUINTERO, 2010). Para Wunder (2013) o PSA é uma ferramenta bastante exigente, demandando uma cultura de pagamento e uma boa organização dos usuários dos serviços.

Antes de implantar um PSA em determinada área, seu verdadeiro potencial deve ser estudado. Como afirma Ferraro (2011) a auto seleção adversa, ou seja, aquela que é voluntária, pode direcionar os pagamentos para terras de baixo valor ambiental. De acordo com Muradian *et al.* (2010) o contexto em que a maioria dos esquemas de PSA operam é muitas das vezes caracterizada por elevada incerteza na prestação de contas de serviços ambientais, devido às complexidades biofísicas associadas às relações entre o uso da terra e esses serviços.

Nesse contexto, a modelagem espacial de interações e *tradeoffs*¹ e de avaliação de impactos de políticas públicas sobre a provisão de serviços ambientais (ALARCON, 2014) aliada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são instrumentos importantes de suporte à tomada de decisões.

¹ *Tradeoffs*: A expressão *trade-off* é largamente utilizada para designar situações de escolha entre opções conflitantes, onde a escolha por uma ação que visa à solução de um problema em detrimento de outro, quando se abre mão de um bem ou serviço para se obter outro (PARRON *et al.*, 2015)

O InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) é um dos programas mais promissores para modelagem de serviços ambientais e um dos seus componentes é o modelo de retenção de sedimentos (GARRASTAZU *et al.*, 2012). Esse modelo tem como base a Equação Universal da Perda de Solo (EUPS) que calcula a perda de solo média anual de cada parcela de terra, determina o quanto de solo pode chegar a um determinado ponto de interesse, possibilita conhecer a capacidade de cada parcela para reter sedimentos, além de poder estimar o custo de remoção do sedimento acumulado (THOMPSON, FIDALGO, 2013).

As informações geradas pelo InVEST podem fornecer subsídios para uma gestão mais adequada das bacias hidrográficas e contribuir para a implantação de esquemas de PSA, uma vez que permite identificar as áreas provedoras e beneficiadas pelos serviços ecossistêmicos (GARCIA e ROMEIRO, 2013).

1.2. Definição do Problema e Delimitação dos Objetivos

A Área de Proteção Ambiental (APA) municipal do rio Uberaba foi criada através da Lei Municipal 9.892/2005 e teve como principal objetivo o de proteger o rio Uberaba, que é o manancial de abastecimento público do município de Uberaba, MG.

O rio Uberaba no período da seca já não consegue atender à demanda, problemática que vem se agravando a cada ano devido aos impactos ambientais que estão ocorrendo ao longo de seu curso, especialmente pelo uso indiscriminado da irrigação (CÂNDIDO *et al.*, 2010). Uma alternativa ao conflito de uso da água que se encontra instalado, seria a implantação de um Programa de PSA, sendo necessário estudos que orientem o Poder Público no planejamento e na tomada de decisões.

Outro problema identificado por Candido *et al.* (2010) é o potencial natural de erosão alto, muito alto e extremamente alto nas áreas de nascentes localizadas na APA municipal do rio Uberaba. Valle Júnior (2008) ressalta que os prejuízos sociais e ambientais gerados pela erosão são bastante elevados e os principais fatores relacionados com o aumento da degradação ambiental estão as frequentes alterações não planejadas no uso da terra, acima da capacidade de suporte do solo.

Barrella *et al.*, (2009) destacam a importância da cobertura vegetal para os cursos de água localizados em cabeceiras, por serem considerados frágeis. Segundo esses autores, a vegetação é de extrema importância para sua preservação, pois evita a erosão dos solos

adjacentes, impedindo a sedimentação ou assoreamento do leito do rio. Eles destacam que em média um terreno de um hectare descoberto chega a transportar 16 toneladas de solo por ano.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é identificar áreas provedoras do serviço ambiental que apresentam controle da erosão, utilizando um modelo de retenção de sedimentos baseado na Equação Universal de Perda de Solo, representado em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Os objetivos específicos norteadores deste trabalho são:

1. Modelar as perdas de solo nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba para identificar as áreas com maior valor de aporte de sedimentos aos rios.
2. Modelar a retenção de sedimentos nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba para identificar as áreas prioritárias para o pagamento de serviços ambientais.
3. Modelar a exportação de sedimentos nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba para identificar as áreas críticas que necessitam de intervenção.
4. Modelar as perdas de solo nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba para um cenário hipotético, em que as Áreas de Preservação Permanente foram reflorestadas de acordo com o Código Florestal, Lei 12.651/2012.
5. Comparar os resultados da modelagem do cenário atual (ano de 2016) com o cenário hipotético, a fim de levantar questões acerca da importância que a vegetação exerce sobre a minimização do aporte de sedimentos para os leitos dos rios.

1.3. Justificativas para o Estudo

A Avaliação Ecosistêmica do Milênio alertou sobre a relevância da pesquisa relacionada à avaliação, modelagem e mapeamento de serviços ambientais (PARRON *et al.*, 2015). A APA municipal do Rio Uberaba é uma potencial área de estudos, pois é um local de interesse estratégico para o município de Uberaba, uma vez que o rio Uberaba, que é o manancial de abastecimento público, se encontra nesta unidade de conservação. Estudos que contribuam para o planejamento de ações que possam intervir de maneira a aumentar a qualidade e quantidade da disponibilidade hídrica se fazem necessárias. Uma alternativa é a implantação de um programa de pagamento de serviços ambientais, que visa remunerar os proprietários de terras que adotarem medidas conservacionistas do uso e ocupação da terra.

Sendo assim, o estudo se justifica pela ausência de pesquisas sobre a temática apresentada na APA municipal do rio Uberaba, para identificar áreas provedoras dos serviços ecossistêmicos e para que não implique no investimento de recursos financeiros em áreas de baixo valor ambiental.

1.4. Delimitação do Estudo

De acordo com Guswa *et al.* (2014) os modelos precisam incorporar e produzir informações relevantes em escalas adequadas de decisão no espaço e no tempo, a estrutura do modelo apropriado dependerá do contexto de decisão, das saídas biofísicas desejadas, e dos processos hidrológicos dominantes.

No entanto, quanto menor a escala em que se decide trabalhar, maior é o desafio para se obter os dados sobre o lugar. Muitas das vezes os dados existem nas prefeituras, mas não são de fácil acesso, principalmente por não estarem em meio digital. Um avanço nesse sentido é a criação de um banco de dados denominado Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), que pode, futuramente, facilitar o acesso de dados nas esferas municipais, estaduais, federais, uma vez que é alimentado por informações de produtores de dados. De acordo com o Decreto Nº 6.666 de 27/11/2008 (BRASIL, 2012), a INDE tem a seguinte definição:

"conjunto integrado de tecnologias; políticas; mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento; padrões e acordos, necessário para facilitar e ordenar a geração, o armazenamento, o acesso, o compartilhamento, a disseminação e o uso dos dados geoespaciais de origem federal, estadual, distrital e municipal."

Este trabalho se propôs realizar um estudo em uma escala local, sendo escolhida a Área de Proteção Ambiental (APA) municipal do rio Uberaba. A fim de não tornar a pesquisa inviável do ponto de vista acadêmico, que tem por objetivo aplicar o modelo de retenção de sedimentos do InVEST 3.3.3 na área de estudo, foram utilizados dados secundários para a elaboração da tabela biofísica e dos mapas de erosividade e erodibilidade. Porém, tal medida não empobrece este trabalho, que visa não apenas a execução e interpretação dos dados de saída do modelo de retenção de sedimentos, mas também contribuir com a metodologia para geração dos mapas solicitados pelo modelo, assim como a divulgação destes dados que poderão subsidiar estudos futuros.

1.5. Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, onde é apresentado os conceitos adotados neste trabalho. No terceiro capítulo a área de estudo é apresentada, abordando sobre seu posicionamento geográfico, dimensão da área ocupada, objetivos da criação da unidade de conservação, hidrografia, clima, enfim, buscou-se apresentar as principais características que possam auxiliar o leitor em relação ao local em que a pesquisa foi realizada. No quarto capítulo é descrita a metodologia utilizada. No quinto capítulo são apresentados os resultados, divididos em dois tópicos. No primeiro, estão os resultados dos dados gerados em ambiente SIG e no segundo, os dados de saída resultantes da modelagem executada pelo modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3. No sexto é apresentada a discussão e por fim o sétimo capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Serviços Ambientais

De acordo com Nusdeo (2012), a expressão serviços ambientais designa duas categorias diferentes. A primeira para os produtos ambientais usados diretamente e de mais fácil valoração, que podem ser a água, frutos, madeira, semente e plantas medicinais. Já a segunda categoria trata-se dos serviços relativos ao suporte da natureza, tais como a polinização natural, a ciclagem de nutrientes do solo, o fluxo de genes e a manutenção do volume e qualidade dos recursos hídricos, entre outros.

O estudo desenvolvido neste trabalho é referente a segunda categoria, que define serviços ambientais como sendo “aqueles relacionados aos processos ecológicos por meio dos quais a natureza se reproduz e mantém as condições ambientais que são a base de sustentação da vida no planeta e do bem-estar das espécies nele existentes” (NUSDEO, 2012).

A Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2003) classificou os serviços ambientais em quatro categorias fundamentais: provisão, regulação, cultural e de suporte, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos serviços ambientais em serviços de provisão, regulação, culturais e de suporte

Categorias	Exemplos de serviços
Serviços de suporte	Manutenção da biodiversidade Manutenção do ciclo de vida (ciclagem de nutrientes e da água/fotossíntese) Formação do solo
Serviços de provisão	Alimentos Fibras/madeira Recursos genéticos Recursos medicinais Recursos ornamentais Água potável
Serviços de regulação	Regulação da qualidade do ar Regulação do clima (incluindo sequestro de C) Regulação dos fluxos de água (enchente/seca) Purificação da água Fertilidade do solo Prevenção da erosão Controle biológico (doenças/pragas) Polinização

	Prevenção de desastres
	Controle de resíduos
Serviços culturais	Valores estéticos (paisagem)
	Recreação e turismo
	Valores espirituais e religiosos
	Valores educacionais/culturais

Fonte: *Millennium Ecosystem Assessment* (2003)

2.2 Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)

O princípio básico dos sistemas de PSA é o reconhecimento de que o meio ambiente fornece gratuitamente vários bens e serviços que são de interesse direto ou indireto do ser humano, permitindo sua sobrevivência e seu bem-estar (ANA, 2012).

Os pagamentos são uma forma de ressarcir os custos dispendidos pelas práticas conservacionistas do solo que permitem o fornecimento dos serviços ecossistêmicos, indo ao encontro dos princípios usuário-pagador e provedor-recebedor, onde o usuário paga e o conservacionista recebe (ANA, 2012).

O PSA pode ser através da remuneração monetária ou por outros meios, para agentes responsáveis pela conservação de áreas específicas que propiciarão à natureza prestar um determinado serviço ambiental (NUSDEO, 2012).

As modalidades de PSA mais conhecidas a nível internacional são a captura de carbono, os serviços ambientais hidrológicos e biodiversidade e beleza cênica (PEREVOCHTCHIKOVA e TAMAYO, 2012). De acordo com Villas Bôas (s.d.) os projetos de Pagamento por Serviços Ambientais são uma transação contratual entre:

- a) Pagador de serviços ambientais: agente econômico, público ou privado, situado na condição de beneficiário ou usuário de serviços ambientais, sendo por eles favorecido direta ou indiretamente.
- b) Provedor de serviços ambientais: toda pessoa física ou jurídica que mantém ou recupera ecossistemas que prestam quaisquer serviços ambientais, tais como produtores rurais, comunidades rurais, governos municipais etc.

A Agência Nacional de Águas (ANA) tem financiado projetos voltados para o PSA hídrico através do Programa Produtor de Água. Nesse tipo de PSA, os projetos viabilizam o pagamento a proprietários rurais pelos serviços ambientais prestados pelas suas áreas naturais, através de ações de conservação e restauração florestal, em áreas chave para a produção de

água, como as margens de rios, nascentes e topos de morros (VILLAS BÔAS, s.d.). A Figura 1 representa um modelo de PSA hídrico.



Figura 1 - Modelo de Pagamentos por Serviços Ambientais Hidrológicos
Fonte: Veiga e Gavaldão (2012, p.129 *apud* Simões, 2014)

Além dos fatores ambientais, as características sociais também devem ser levadas em consideração ao se implantar um programa de PSA. Alarcon (2014) constatou que pequenos produtores rurais do corredor ecológico Chapecó, localizado em Santa Catarina, mostraram-se mais interessados em aderir ao PSA, tal característica pode resultar em maior equidade de acesso ao programa e uma melhora nas condições sociais locais.

Os primeiros programas de PSA foram iniciados no vale do rio Cauca na Colômbia, em meados da década de 1990. Todavia, somente a partir de 1997, quando a Costa Rica instituiu um PSA, que outros países passaram a considerá-lo. Em 2009, na América Latina havia mais de 150 programas de PSA e similares (PAGIOLA *et al.*, 2012).

No Brasil, os primeiros programas de PSA foram implantados a partir de 2006, sendo os municípios de Extrema e Montes Claros, em Minas Gerais, os precursores (PAGIOLA *et al.*, 2012). O município de Extrema foi o primeiro a sancionar uma lei que criou um projeto e regulamentou um PSA relacionado com a água no Brasil, autorizando o Poder Executivo a prestar apoio financeiro aos proprietários rurais que aderirem ao projeto denominado Conservador das Águas, mediante cumprimento das metas (PEREIRA, 2012). O Projeto Conservador das Águas é de suma importância, pois as microbacias onde é realizado, integram o Sistema Cantareira, cujo objetivo é abastecer a região metropolitana de São Paulo (PEREIRA, 2012).

Em áreas de mananciais, utilizadas na produção de água para abastecimento público, o percentual de abatimento de erosão (PAE) é um dos fatores calculados após a

implementação de programas de PSA. As alterações no uso do solo podem resultar em impactos bastante negativos como o assoreamento de reservatórios e o aumento no custo de tratamento por causa da maior presença de sólidos solúveis na água (PADOVEZI *et al.*, 2012).

Estudos sobre os processos erosivos são essenciais em alguns programas de PSA. A título de exemplo, o PSA produtor de água na bacia hidrográfica Piracicaba/Capivari/Jundiá considera que quanto maior for o nível de abatimento da erosão, maior será o valor pago pelo projeto, sendo que projetos de conservação que propiciem menos de 25% de PAE não são contemplados com PSA (PADOVEZI *et al.*, 2012).

2.3 Erosão do Solo

A erosão do solo é um fator importante considerado nos programas de PSA, pois afeta o potencial hídrico de um manancial para abastecimento público levando à diminuição da água de recarga, além de causar a perda da qualidade da água, seja pelo aumento de sólidos em suspensão, o que leva ao aumento da turbidez, ou pelo aporte de nutrientes, que pode ocasionar a eutrofização do corpo hídrico (CONCEIÇÃO, 2014). Na Figura 2 são apresentados os problemas causados pela erosão hídrica que levam a redução do potencial hídrico e a perda da qualidade da água.

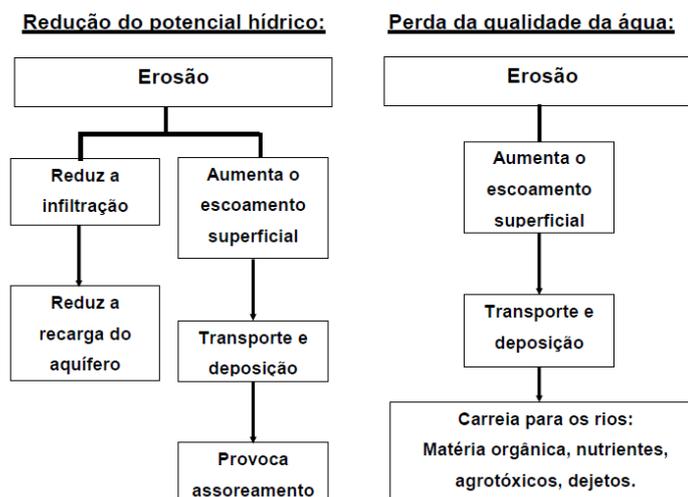


Figura 2 - Fluxograma dos problemas causados pela erosão
Fonte: Conceição (2014)

A erosão do solo se dá principalmente pela ação dos ventos, originando a erosão eólica, e pela ação das chuvas, resultando na erosão hídrica. De acordo com Jorge e Guerra (2013), paisagens com declividade, geralmente acima de 3°, podem sofrer erosão.

Segundo Galdino (2012) a erosão pode ser geológica (natural ou normal) ou acelerada (antrópica). A erosão geológica é um processo natural resultante unicamente da atuação de forças da natureza e responsável pelo nivelamento da superfície terrestre. Já erosão antrópica é resultado da interferência humana nos sistemas naturais, intensificando o processo natural de erosão.

De acordo com Wild (1993 *apud* JORGE e GUERRA, 2013, p. 10) as principais causas da erosão são:

- 1) Desmatamento, deixando os solos desprotegidos;
- 2) Agricultura e pecuária, sem adoção de práticas conservacionistas;
- 3) Cultivo e pecuária em encostas de elevada declividade, às vezes superiores a 45°, sem adoção de práticas conservacionistas;
- 4) Trilhas abertas por animais e por homens, compactando os solos, por onde a água se escoava com facilidade;
- 5) Construção de rodovias sem cuidados especiais, o que faz aumentar o escoamento superficial, causando ravinas que podem evoluir para voçorocas; e
- 6) Mineração e outras atividades econômicas, que deixamos solos desprotegidos, sem recuperação dessas áreas, durante e após o término dessas atividades.

De acordo com Jorge e Guerra (2013), a erosão dos solos não é um problema somente para as áreas onde se está ocorrendo. Os referidos autores citam como exemplos dos problemas causados pela erosão dos solos:

Remoção dos nutrientes existentes no topo dos solos; redução da penetração das raízes e do armazenamento de água; diminuição das áreas a serem utilizadas para agricultura e pecuária; aumento do assoreamento de rios, lagos reservatórios e açudes, levando muitas vezes a grandes enchentes em várias partes do mundo; poluição dos corpos hídricos, em especial pelo transporte de defensivos agrícolas, junto com os sedimentos erodidos.

O foco deste trabalho é a erosão hídrica, que pode ser laminar, formar sulcos ou ravinas, e voçorocas. Para Valle Junior (2008), os sedimentos provenientes da erosão hídrica são decorrentes do seguinte processo:

...se inicia quando as gotas de chuva começam a incidir sobre a superfície do solo, gerando ruptura dos agregados e predispondo-os ao transporte pela enxurrada. O impacto das gotas precipitadas, coloca em suspensão as partículas finas, as quais são transportadas quando o solo está saturado ou quando a lâmina precipitada é superior à capacidade de infiltração de água no solo, gerando escoamento superficial. Desta

forma, o material transportado deposita-se em locais mais baixos, depressões naturais ou reservatórios de água, concluindo assim o processo erosivo.

Na erosão laminar ocorre a remoção de uma camada fina, teoricamente homogênea (para solos em condições de declividade uniforme em toda a vertente), sendo comum em áreas agrícolas, durante o período de preparo do solo e plantio, quando geralmente o solo encontra-se desnudo (VALLE JÚNIOR, 2008).

2.4 Equação Universal de Perda do Solo (EUPS)

De acordo com Valle Júnior (2008), a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) foi desenvolvida a partir da quantificação dos potenciais natural e antrópico de erosão laminar. O potencial natural é composto por fatores pluviométricos (erosividade das chuvas), fatores pedológicos (erodibilidade dos solos) e por fatores topográficos (comprimento de rampa e declive). O potencial antrópico é composto pelas práticas conservacionistas praticadas aliadas à interação entre as variáveis quanto ao uso e manejo do solo.

A EUPS é um modelo quantitativo e foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Sendo:

A - Perda média anual de solo por unidade de área (t/ha/ano); onde: t = tonelada, ha = hectare

R - Fator de erosividade da chuva (MJ/ha/mm/h/ano); onde: MJ = megajoule, mm = milímetro, ha = hectare, h = hora

K - Fator de erodibilidade do solo (t/h/MJ.mm); onde: t= tonelada, ha = hectare, h = hora, MJ = megajoule e mm = milímetro

L - Fator de comprimento de rampa (adimensional);

S - Fator de declividade (adimensional);

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

P - Fator de práticas conservacionistas (adimensional).

De acordo com Vale Júnior (2008), a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) ao ser aplicada em pequenos talhões com o uso agrícola apresenta bons resultados quanto a quantificação da perda de solos por erosão laminar. No entanto, ao se aplicar a EUPS em grandes áreas, como na escala municipal, deve-se considerar que ao longo de uma vertente ocorrem simultaneamente, os processos de erosão e de deposição, além da erosão que se observa nos canais fluviais. O conjunto desses eventos colaboram para que haja limitações quanto ao uso da EUPS na quantificação da erosão.

A descrição dos fatores que compõem a EUPS é apresentada nos tópicos a seguir.

2.4.1 Fator de erosividade da chuva

O fator de erosividade da chuva (fator R) é a habilidade da chuva causar erosão e é determinada pela energia cinética, que é altamente significativa para a erosão, por que envolve o gasto de energia para a ruptura dos agregados de solo quando golpeados pela gota d'água da chuva (GUERRA, 2012).

Wischmeier e Smith (1958, 1978 *apud* CABRAL *et al.*, 2005) concluíram que a relação que melhor expressa o potencial da chuva em causar erosão é o produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em trinta minutos (EI_{30}). O fator R da Equação Universal de Perdas de Solo é determinado pela soma dos valores mensais de EI_{30} , de um período de vinte ou mais anos de chuva, e é expresso na unidade $MJ.ha^{-1}mm.h^{-1}$ (CABRAL *et al.*, 2005).

2.4.2 Fator de erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo representa a susceptibilidade de um solo à erosão. O fator erodibilidade dos solos (Fator K) implica que diferentes solos possuem distintas suscetibilidades ao processo erosivo (GALDINO, 2012). Vale Júnior (2008) define a erodibilidade dos solos como a quantidade de material que é removido por unidade de área quando os demais fatores determinantes da erosão, como a chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo, permanecem constantes.

A erodibilidade dos solos é influenciada principalmente pela textura, teor de matéria orgânica, estrutura, porosidade, permeabilidade, gradiente textural, teores de óxidos e

hidróxidos de ferro e alumínio, atividades das argilas e profundidade do *solum* e do solo (GALDINO, 2012).

2.4.3 Fator topográfico

O fator topográfico (Fator LS) avalia a influência do relevo no risco de erosão considerando a extensão de vertentes e as classes de declividade de forma a identificar áreas mais susceptíveis à dinâmica erosiva.

De acordo com Conceição (2014), na EUPS, o Fator L avalia o comprimento da encosta que é definido como a distância entre a origem do escoamento superficial e a deposição final dos sedimentos, ou seja, é onde o declive decresce ou quando o escoamento superficial atinge um corpo hídrico. O Fator S avalia a declividade que é expressa em porcentagem, sendo metros de desnível por metros de comprimento.

2.4.4 Fator de Cobertura do Solo

O fator de cobertura do solo (Fator C) é definido como a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente com o solo descoberto (NASCIMENTO *et al.*, 2014). De acordo com Nascimento *et al.* (2014), o Fator C é o que apresenta maiores incertezas dentre os fatores que compõem a EUPS.

2.4.5 Fator de Práticas Conservacionistas

O fator de práticas conservacionistas (Fator P) é a relação entre a intensidade esperada de perda de solo com determinada prática conservacionista correlacionado com a disposição da cultura no sentido do declive (VALLE JUNIOR, 2008). De acordo com Jorge e Guerra (2013), geralmente a ausência de práticas conservacionistas faz com que as taxas de perda de solo ultrapassem os níveis naturais.

2.5 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (INVEST)

O InVEST é um conjunto de ferramentas de modelagem de serviços ambientais do Projeto Capital Natural, da Universidade de Stanford (Califórnia-EUA), desenvolvido com apoio da *The Nature Conservancy* (TNC) e do *World Wildlife Fund* (WWF). Este conjunto de ferramentas permite o mapeamento dos serviços ecossistêmicos e a quantificação do serviço ambiental (VILLAS BÔAS, s.d.). De acordo com Sharp *et al.*, (2016) o InVEST pode ajudar a responder perguntas como:

- Onde os serviços ecossistêmicos são originados e onde eles são consumidos?
- Como um plano de manejo florestal afeta os rendimentos de madeira, biodiversidade, qualidade da água e recreação?
- Quais os tipos de políticas de gestão de pesca costeira produzirão os melhores retornos para a pesca sustentável, a proteção da costa e a recreação?
- Quais as partes de uma bacia hidrográfica fornecem os maiores valores de sequestro de carbono, biodiversidade e turismo?
- Onde o reflorestamento alcançaria os maiores benefícios da qualidade da água a jusante, mantendo ou minimizando as perdas nos rios?
- Como as mudanças climáticas e o crescimento da população afetarão os serviços ecossistêmicos e a biodiversidade?
- Quais os benefícios que o planejamento espacial marinho proporciona à sociedade, além dos alimentos da pesca e da aquicultura, e locais seguros para instalações de energia renovável?

O Projeto Capital Natural usou o InVEST em mais de 20 contextos de decisão em todo o mundo, conforme ilustrado na Figura 3.

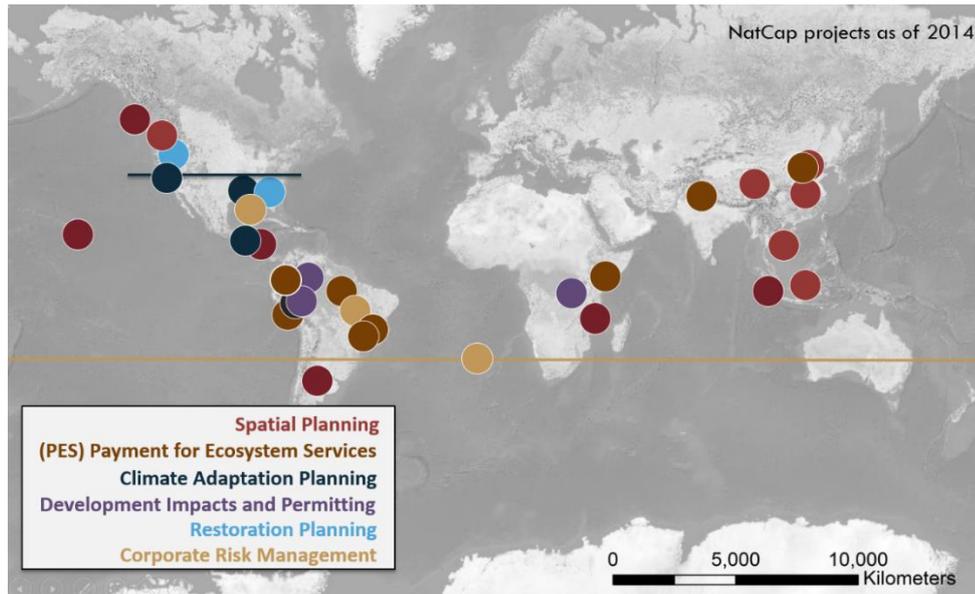


Figura 3 - Utilização do Projeto Capital Natural em mais de 20 locais ao redor do mundo
 Fonte: Sharp *et al.* (2016)

De acordo com Sharp *et al.*, (2016), o conjunto de ferramentas InVEST inclui modelos para quantificar, mapear e avaliar os benefícios fornecidos pelos sistemas terrestres, de água doce e marinhos. Podendo se citar alguns deles: i) armazenamento e sequestro de carbono: regulamento climático; ii) retenção de nutrientes: purificação de água; iii) retenção de sedimentos: dragagem evitada e purificação de água; iv) abundância do polinizador: polinização de cultivos; v) atenuação das ondas e redução da erosão: proteção costeira.

Neste trabalho será utilizado somente o modelo de retenção de sedimentos. Trata-se de um modelo espacialmente explícito trabalhando na resolução espacial da matriz de entrada do Modelo Digital de Elevação (MDE). Para cada célula, o modelo calcula pela primeira vez a quantidade de sedimentos erodidos e, em seguida, a relação de entrega de sedimento, que é a proporção de perda de solo que atinge a saída da captação (SHARP *et al.*, 2016).

Sharp *et al.* (2016) citam que entre as principais limitações do modelo de retenção de sedimentos é a dependência da EUPS e que apesar desta equação ser amplamente utilizada, seu alcance é limitado, representando apenas os processos de erosão laminar. Assim, com base no conhecimento local, os usuários podem modificar a EUPS utilizando os valores dos fatores de erosividade, erodibilidade, cobertura do solo e práticas conservacionistas, para refletir os resultados de estudos locais.

Dada a simplicidade do modelo e o baixo número de parâmetros, as saídas são muito sensíveis à maioria dos parâmetros de entrada. Erros nos parâmetros empíricos da EUPS terão, portanto, um grande efeito nas previsões. Análises de sensibilidade são recomendadas

para investigar como os intervalos de confiança nos parâmetros de entrada afetam as conclusões do estudo (SHARP *et al.*, 2016).

Alarcon (2014) identificou como limitação do InVEST o uso de variáveis globais, que muitas das vezes não têm aplicabilidade em escala local, para minimizar os erros gerados e obter resultados mais próximos à realidade. Para contornar essa questão a autora sugere a utilização de dados locais. No entanto, nem sempre isso é possível, pois existe uma carência de dados disponíveis. Ainda, de acordo com Alarcon (2014), o InVEST é uma ferramenta que se tem disponível no momento e poderá ser melhor aferida em estudos futuros.

De acordo com Thompson e Fidalgo (2013), deve-se ter cautela ao utilizar o InVEST, pois o modelo simula apenas a erosão laminar, além de produzir as estimativas anuais, não permitindo a análise da variação sazonal e de eventos extremos.

As informações geradas pelo InVEST podem fornecer subsídios para uma gestão mais adequada das bacias hidrográficas e contribuir para a implantação de esquemas de PSA, uma vez que permite identificar as áreas provedoras e beneficiadas pelos de serviços ecossistêmicos (GARCIA; ROMEIRO, 2013).

O InVEST tem sido largamente utilizado para estimar as perdas de solos em bacias hidrográficas à montante de reservatórios. Zanella (2016) modelou o aporte de sedimentos na bacia contribuinte da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Costa Rica em Mato Grosso do Sul, utilizando o InVEST e o Soil and Water Assessment Tool (SWAT). A perda total média de solo estimada pela modelagem com o InVEST foi de 19,23 ton/ ha.ano (2.392.353,10 ton/ano), cerca de 2,2 vezes superior ao valor obtido pelo software SWAT, de 8,54 ton/ ha.ano (1.062.402,15 ton/ano).

O autor supracitado ressalta ainda que a utilização do InVEST em uma bacia que não possui séries históricas de dados hidrossedimentológicos representou uma inovação tecnológica, podendo se avaliar de forma quantitativa o aporte de sedimentos que atingem os corpos d'água. Outro aspecto relevante apontado pelo autor é que ao se utilizar o InVEST foi possível realizar a modelagem do cenário atual e futuro de perda de solo, sendo que no cenário futuro as APP foram reflorestadas. Com tal estudo o autor pode identificar espacialmente as áreas com maior potencial de geração de sedimentos e demonstrar que a recomposição vegetal das APPs poderá minimizar os impactos do assoreamento no canal de adução da PCH Costa Rica.

Conceição (2014) utilizou o InVEST para modelar as perdas de solo e identificar as microbacias que estavam exportando mais sedimentos na Bacia do Passaúna no Paraná. Com

este trabalho o autor pode identificar a área prioritária para ações de controle da erosão hídrica e a consequente diminuição do aporte de sedimentos.

Montalvão (2016) utilizou os modelos de produção de água anual, produção de água mensal e de aporte de sedimentos do InVEST para estimar os serviços ecossistêmicos de provisão hídrica e de regulação do solo, resultantes da implantação de projetos conservacionistas em propriedades da bacia do Córrego Taquara, Distrito Federal. A autora realizou suas análises sob dois cenários sendo (A) o uso atual sem ações conservacionistas e (B) cenário após as boas práticas do Programa Produtor de Água financiado pela ANA. Para o modelo de aporte de sedimento a autora verificou que após a implementação das práticas conservacionistas na bacia houve uma redução de 64% de perda de solo.

Alarcon (2014) modelou três serviços ambientais na ferramenta InVEST: estoque de carbono, qualidade de hábitat para a biodiversidade e controle da erosão no Corredor Ecológico Chapecó, situado em Santa Catarina, sul do Brasil. A autora definiu três cenários. O primeiro deles foi seguindo o Código Florestal Brasileiro de 1965; o segundo ao Código Ambiental Catarinense; e o terceiro foi simulado um cenário hipotético para uma condição futura, onde as leis ambientais são fracamente implementadas. O Código Florestal de 1965 produziu os maiores ganhos para todos os bens e serviços florestais (carbono, erva-mate, pinhão e qualidade de hábitat para a biodiversidade) e controle da erosão. Por outro lado, o cenário de Baixa Efetividade Legal produziu os maiores ganhos para a provisão de *commodities*, enquanto o cenário do Código Ambiental Catarinense apresentou-se em uma situação intermediária.

O tipo de cobertura vegetal apresenta forte correlação com a taxa de sedimentos que é carregada para dentro do corpo hídrico. Em um estudo realizado por Saad *et al.* (2011) para o Sistema Cantareira, em São Paulo, é comprovada a importância das florestas para a retenção dos sedimentos, sendo analisados mapas de uso da terra com pastagem e floresta em todo o domínio, com o cenário de uso da terra real, e o mesmo, considerando a restauração das áreas de preservação permanente (APP). O InVEST foi empregado para avaliar a perda de solo e foi constatado que a pastagem tem a maior perda (média espacial de 4,87 t ha⁻¹ ano⁻¹), seguida pelo cenário atual (2,99 t ha⁻¹ ano⁻¹), por APP (2,52 t ha⁻¹ ano⁻¹) e por último pela floresta (0,02 t ha⁻¹ ano⁻¹).

Goldstein *et al.* (2012) utilizou essa ferramenta no Havaí para avaliar as implicações ambientais e financeiras de sete cenários de planejamento, contrastando combinações de uso da terra, incluindo matérias-primas de biocombustíveis, culturas alimentares, silvicultura,

pecuária e desenvolvimento residencial. Saad *et al.* (2011) e Thompson, Fidalgo (2013) identificaram resultados positivos na utilização do InVEST, sendo considerado como uma ferramenta de grande potencial para se avaliar e valorar os serviços ambientais nas bacias brasileira, além de apresentar como principal vantagem a possibilidade de integração dos dados necessários em um único ambiente, reduzindo a possibilidade de erros na conversão de dados. Com o InVEST é possível mapear e valorar bens e serviços naturais de forma a alinhar a conservação de ecossistemas com a economia (CARDOSO *et al.*, 2012).

2.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ambientes empregados na área de Geoprocessamento para processar dados geográficos empregando um conjunto de técnicas e tecnologias destinados à coleta, armazenamento, recuperação, transformação e visualização de dados (IBGE, 2013). De acordo com Aronoff (1989 *apud* FRANCISCO, 2014), a utilização de SIG em estudos nos quais a localização geográfica seja uma questão fundamental na análise, representam um potencial para serem utilizados nas mais diversas aplicações (Quadro 1).

Quadro 1 - Exemplos de aplicações dos SIG

Finalidade	Objetivo	Exemplos de aplicação
Projetos	Definição das características do projeto	Projeto de loteamentos Projeto de irrigação
Planejamento territorial	Delimitação de zoneamentos e estabelecimento de normas e diretrizes de uso	Planos de manejo de unidades de conservação Planos diretores municipais
Modelagem	Estudo de processos e comportamento	Modelagem de processos hidrológicos
Gestão	Gestão de serviços de utilidade pública	Gerenciamento de rede abastecimento
Banco de Dados	Armazenamento e recuperação de dados	Cadastro urbano e rural
Avaliação de riscos e potenciais	Identificação de locais susceptíveis à ocorrência de um determinado evento	Mapeamento de riscos ou potenciais
Monitoramento	Acompanhamento da evolução dos fenômenos espaciais através de mapeamentos sucessivos no tempo	Monitoramento da cobertura florestal Monitoramento da expansão urbana

Logístico	Identificação de locais e rotas ideais	Definição da melhor rota Identificação de locais para implantação de empreendimento econômico
-----------	--	--

Fonte: Francisco (2014)

De acordo com Christofolletti (1999), na área de Geoprocessamento os modelos são de são de dois tipos:

- Modelos cartográficos: resultam da automação de técnicas manuais que tradicionalmente usam instrumentos de desenho e sobreposição de transparências, por exemplo, um mapa identificando localização de solo produtivos e vertente suaves.
- Modelos espaciais: são expressões das relações matemáticas entre variáveis mapeadas, por exemplo, o mapa de aquecimento da superfície em função da temperatura ambiente e da irradiação solar.

Uma das funções dos modelos é servir como instrumentos para o planejamento por meio da simulação de cenários possíveis em função das mudanças ambientais. O autor ressalta que o planejamento envolve-se em realizar previsões, considerando as implicações de planos alternativos sem os custos de esperar ou colocá-los em prática (CHRISTOFOLETTI, 1999). Nesse contexto, uma das possibilidades de se utilizar o modelo de retenção de sedimentos do InVEST, aliado ao uso dos SIGs, é criar um cenário hipotético em que as Áreas de Preservação Permanente foram todas reflorestadas.

A espacialidade é uma característica atribuída aos sistemas ambientais, evidenciando a importância dos SIGs para os procedimentos de modelagem. Os ambientes de SIGS são frequentemente utilizados para o processamento de dados, elaboração de mapas relacionados com os dados de entradas ou com os resultados de modelos ou ainda na própria elaboração de modelos (CHRISTOFOLETTI, 1999).

No ambiente SIG os componentes espaciais podem ser representados por estrutura de dados matriciais e vetoriais. De acordo com Francisco (2014) nos dados matriciais (Figura 4), também denominado *raster*:

O terreno é representado por uma matriz $M(i, j)$, composta por i colunas e j linhas, que definem células, denominadas de *pixels* (*picture cell*), ao se cruzarem. Cada *pixel* apresenta um valor referente ao atributo, além dos valores que definem o número da coluna e o número da linha, correspondendo, quando o arquivo está georreferenciado, às coordenadas x e y , respectivamente

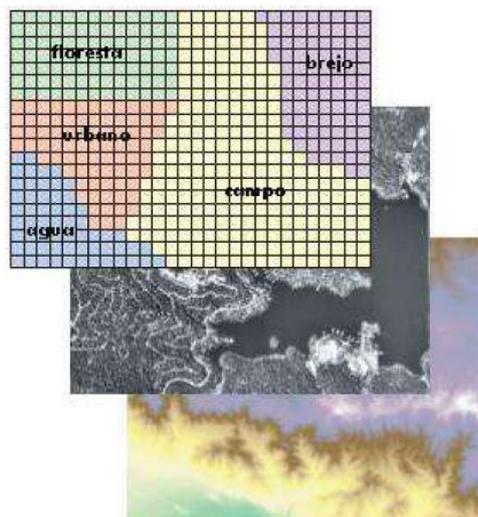


Figura 4 - Representação matricial
Fonte: Francisco (2014)

Já os dados na estrutura vetorial representam os elementos do mundo real por meio de pontos, linhas e polígonos. De acordo com Francisco (2014) estes elementos podem representar:

- **Pontos:** representados por um vértice, ou seja, por apenas um par de coordenadas, definindo a localização de objetos que não apresentam área nem comprimento. Exemplos: hospital representado em uma escala intermediária, cidade em uma escala pequena, epicentro de um terremoto, etc.
- **Linhas poligonais ou arcos:** representados por, no mínimo, dois vértices conectados, gerando polígonos abertos que expressam elementos que possuem comprimento. Exemplos: estradas, rios, etc.
- **Polígonos:** representados por, no mínimo, três vértices conectados, sendo que o primeiro vértice possui coordenadas idênticas ao do último, gerando, assim, polígonos fechados que definem elementos geográficos com área e perímetro. Exemplos: limites político-administrativos (municípios, estados), classes de mapas temáticos (uso e cobertura da terra, pedologia), etc.

2.6.1 Uso do SIG na confecção de mapas de uso e cobertura da terra

Para Simão e Moraes (2009) um mapeamento de uso e cobertura da terra pode ser entendido como um processo técnico de análise e interpretação específica, realizado sobre imagens de satélite. Para a confecção desses mapas demanda-se do profissional um certo conhecimento sobre a área de estudo.

Uma das etapas para se confeccionar um temático de uso e cobertura da terra é a definição do método de classificação. Neste trabalho o método adotado foi o de classificação supervisionada *pixel-a-pixel*, conhecido como Máxima Verossimilhança (Maxver). Este

método utiliza amostras de treinamento representativas das classes a serem mapeadas de forma a extrair das imagens os grupamentos mais homogêneos que compõem uma unidade de mapeamento ou o polígono. A quantidade de amostras de treinamento é estabelecida em função da maior ou menor variabilidade de respostas que a imagem apresenta (IBGE,2013). O algoritmo Maxver considera a ponderação das distâncias entre as médias dos valores dos *pixels* das classes, utilizando parâmetros estatísticos e calcula a probabilidade de cada *pixel* pertencer a cada classe (RABELLO, 2016).

O mapa temático precisa ser validado, para verificar sua confiabilidade. Sendo assim, a validação da classificação é uma etapa muito importante, pois possibilita a verificação da qualidade dos dados gerados, uma vez que “a classificação é subjetiva e nem sempre consegue atender a todo tipo de usuário, tampouco abarcar toda a complexidade do alvo” (IBGE, 2013). Assim as classificações só podem ser julgadas “na esfera do adequado – inadequado, significativo – não significativo, e jamais na do certo e errado” (DINIZ, 1984, p. 182).

Neste trabalho a validação será por meio da aplicação do índice *Kappa*, que demanda dados resultantes da matriz de confusão. De acordo com Rabello (2016) a matriz de confusão é gerada a partir da definição de amostras teste de todas as classes de um mapa. Para isso é necessário ter certeza da correta classificação ou verificações de campo dessas amostras. Estas amostras que foram classificadas corretamente serão cruzadas com a classificação feita pelo algoritmo. Na Tabela 2 é apresentado um esquema da matriz de confusão.

Tabela 2 - Modelo de matriz de confusão

Classes	Amostras teste (verdade) x resultado da classificação				Total linha (amostras por classe)
	A	B	C	D	
A	Acertos	Erros	Erros	Erros	$\sum L1$
B	Erros	Acertos	Erros	Erros	$\sum L2$
C	Erros	Erros	Acertos	Erros	$\sum L3$
D	Erros	Erros	Erros	Acertos	$\sum L4$
Total coluna (amostras na classe)	$\sum C1$	$\sum C2$	$\sum C3$	$\sum C4$	

Fonte: Adaptado de Galparsoro e Fernández (1999), *apud* Rabello (2016)

O índice *Kappa* corresponde à razão entre a soma da diagonal principal da matriz de erros e a soma de todos os elementos dessa matriz, representada pelo número total da amostra, tendo como referência o número total de classes, considerando assim a proporção de amostras

corretamente classificadas (COHEN, 1960). O índice *Kappa* é calculado por meio da seguinte equação:

$$K = \frac{N \sum_{c=l} X_{cl} - \sum_{cl=A}^U (X_c * X_l)}{N^2 - \sum_{cl=A}^U (X_c * X_l)}$$

Onde:

K = coeficiente *Kappa* de concordância;

N = número de observações (pontos amostrais);

X_{cl} = observações na linha i e coluna j, respectivamente;

X_l = linha

X_c = coluna

O valor do índice *Kappa* pode oscilar entre 0 e 1, sendo tanto mais preciso quanto mais próximo de 1 estiver. Valores superiores a 0,75 são considerados adequados, pois possuem concordância elevada (FERNANDES, 2006). Na Tabela 3 estão descritos os graus de concordância para cada resultado do índice *Kappa*.

Tabela 3 - Grau de concordância a partir do índice *Kappa*

Valor do índice <i>Kappa</i>	Graus de concordância
< 0,20	Pobre
0,21 a 0,40	Débil
0,41 a 0,60	Moderado
0,61 a 0,80	Bom
0,81 a 1,00	Muito bom

Fonte: Adaptado de Galparsoro e Fernández (1999), *apud* Rabello (2016)

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A APA Municipal do Rio Uberaba está localizada no município de mesmo nome, Uberaba, e ocupa uma área de 520 km², cerca de 11% do município. O município de Uberaba, localizado no estado de Minas Gerais, especificamente na microrregião do Triângulo Mineiro possui uma área de 4.523,957 km² e está totalmente inserido no bioma Cerrado. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população do município para o ano de 2010 era de 295.988 habitantes e a estimada para o ano de 2016 de 325.279 habitantes, apresentando um aumento de aproximadamente 10%.

Uberaba está cerca de 500 km da capital mineira, Belo Horizonte, e faz limite com os municípios mineiros Uberlândia, Indianópolis, Nova Ponte, Sacramento, Conquista, Delta, Água Comprida, Veríssimo e Conceição das Alagoas e com os municípios paulistas Miguelópolis, Aramina e Igarapava, conforme ilustrado na Figura 5.

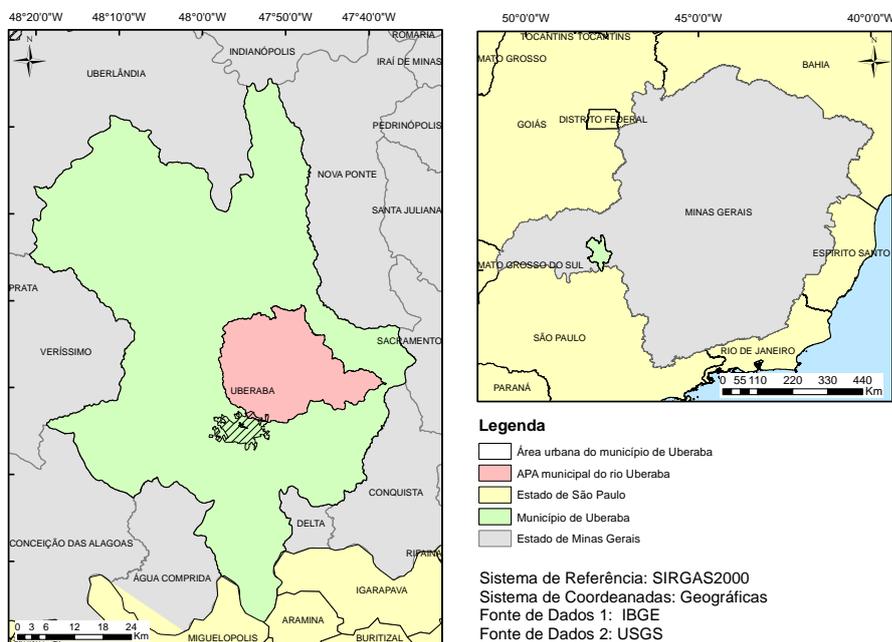


Figura 5 - Mapa da localização da APA municipal do rio Uberaba
 Fonte: A autora (2017)

A infraestrutura logística do município de Uberaba, que tem implicações diretas ou indiretas na APA Municipal do Rio Uberaba, é composta por rodovias e linhas férreas. A unidade de conservação é cortada pelo centro pela Rodovia MG-427, numa extensão com

3.2 Histórico da Criação da APA Municipal do Rio Uberaba

No ano 2003, às margens do córrego Alegria, a 15 Km da captação do rio Uberaba, descarrilhou um trem da Ferrovia Centro Atlântica (FCA). Os vagões carregados de produtos químicos, como: metanol, octanol, isobutanol e cloreto de potássio (granulado), causou a interrupção do regular serviço de abastecimento de água à população do município de Uberaba, durante o período de 8 dias, bem como danos ambientais diretos à mata ciliar, ao solo e subsolo do local e a contaminação do córrego Alegria e ribeirão Uberaba (CODAU, 2005).

Devido ao ocorrido, em 2005 com a promulgação da Lei Municipal 9.892 de 28 de dezembro de 2005 foi criada a APA municipal do rio Uberaba. Sua criação foi uma iniciativa do governo cuja finalidade é restringir o uso e ocupação na bacia hidrográfica do rio Uberaba e de seus afluentes, uma vez que este é o principal responsável pelo abastecimento público do município.

3.3 Objetivos da Criação da APA Municipal do Rio Uberaba

De acordo com Lei Municipal 9.892/2005, a necessidade de se criar uma unidade de conservação de uso sustentável se fez necessária por se tratar de um ambiente que reúne formas de vegetação natural, uma rica fauna, uma área de potencial interesse turístico e por possuir mananciais de importância regional.

Os objetivos da criação da APA municipal do Rio Uberaba estão estabelecidos no artigo 4º da Lei Municipal 9.892 de 28 de dezembro de 2005:

- I - Recuperação, preservação e conservação do rio Uberaba.
- II - Promover o uso sustentado dos recursos naturais.
- III - Proteger a biodiversidade.
- IV - Proteger os recursos hídricos e os remanescentes da vegetação do cerrado.
- V - Proteger o patrimônio cultural.
- VI - Promover a melhoria da qualidade de vida das populações que ali residem.
- VII - Manter o caráter rural da região.
- VIII - Disciplinar a ocupação humana na área protegida.
- IX - Estímulo à melhoria da qualidade ambiental das áreas circunvizinhas.

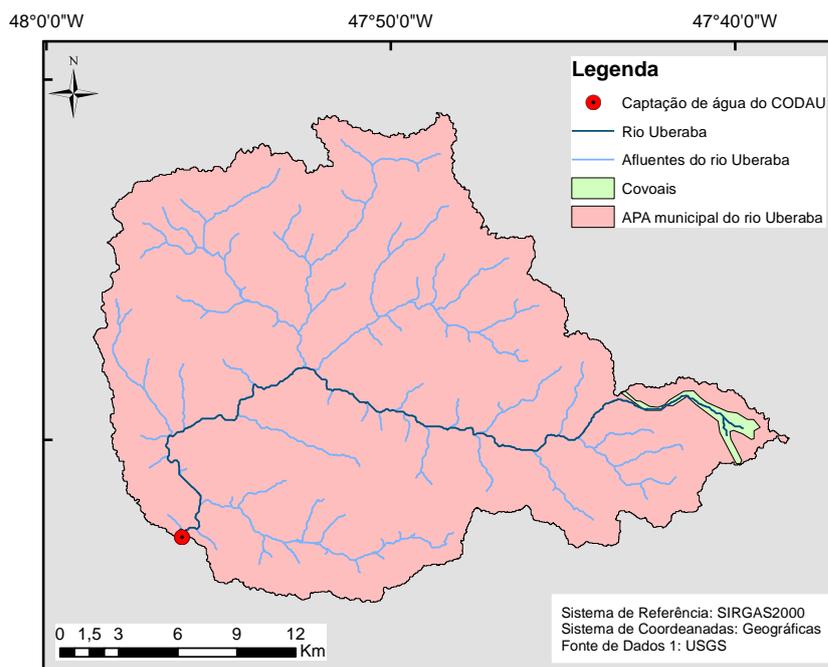


Figura 8 - Mapa da hidrografia da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

A área de covaais é constituída por uma área plana, inundável no período das chuvas, onde se encontram inúmeros morrotes (Figuras 9 e 10). Esses covaais têm grande importância ecológica no ciclo hidrológico dessas regiões (UBERABA, 2012).



Figura 9 - Covaais na nascente do rio Uberaba
Fonte: A autora (2013)



Figura 10 - Área inundada no covaal
Fonte: A autora (2013)

O covaal está associado a condições de má drenagem, compondo as bordas das veredas, comuns nas áreas de cerrado e, normalmente associadas a nascentes (NETO e COSTA, 2010). Os covaais também são caracterizados como campos hidromórficos, ou seja, campos inundados de água, que funcionam como esponjas que absorvem a água das chuvas e

a liberam lentamente durante o ano, atuando como um grande reservatório (UBERABA, 2004). A Figura 11 adquirida em setembro de 2013, mês que é considerado de estiagem na região, mostra que o capim presente nos covaais funciona como uma esponja. Esse capim exerce um papel muito importante, evitando que água acumulada no período chuvoso evapore e possibilita que ela escoe lentamente contribuindo para a perenidade do rio Uberaba.



Figura 11 - Capim presente na área de covaais
Fonte: A autora (2013)

Abdala *et al.* (2009) utilizando o método de Strahler identificaram que na APA municipal do rio Uberaba apresenta ramificações de primeira e segunda ordem. O sistema de drenagem possui um padrão dendrítico e as altitudes variam de 750 a 1000 m, possuindo relevo suave ondulado, com declividade predominante menor que 10%.

Abdala *et al.* (2009) após gerarem o mapa de isoconcentração das nascentes da APA municipal do rio Uberaba, observaram que ocorre um maior número de nascentes concentradas nas áreas de maior altitude, na chapada ou nas proximidades desta, concluindo que a sustentação hídrica do rio Uberaba no período da seca é feita pelos córregos que tem nascentes na borda da chapada. No entanto a recarga hídrica dos córregos da APA municipal do rio Uberaba pode estar sendo ameaçada devido a substituição da vegetação nativa pela monocultura de cana-de-açúcar nessas áreas de chapada (Figura 12).

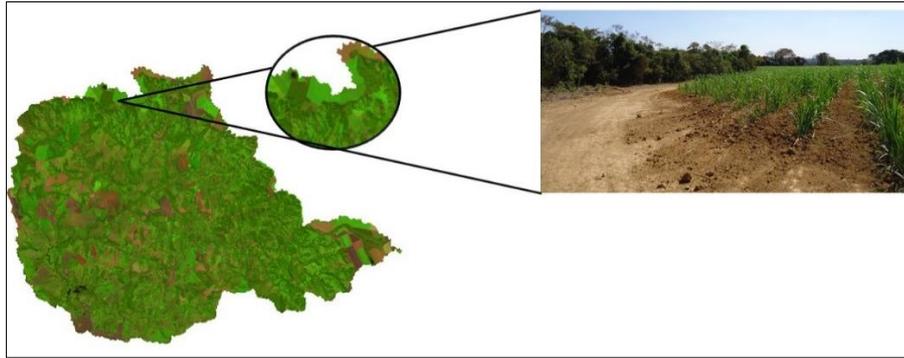


Figura 12 - Plantio de cana-de-açúcar nas áreas de chapadas
Fonte: A autora (2017)

3.5 Clima

A bacia hidrográfica do rio Uberaba apresenta, de acordo com a classificação internacional de *Koppen*, o clima do tipo Aw, caracterizado como tropical, sendo o domínio climático conceituado como semiúmido com 4 a 5 meses secos, os regimes climáticos da região possuem um inverno, frio e seco, e o verão, quente e chuvoso (VALLE JUNIOR, 2008). O regime pluviométrico é definido por uma estação seca, que vai de maio a setembro e por uma estação chuvosa que vai de outubro a abril, com os meses de dezembro e janeiro mais chuvosos. A Figura 13 apresenta a precipitação média mensal para o ano de 2016. Foram utilizados dados da Estação BDMEP – INMET, Uberaba - MG (OMM: 83577) no período de 01/01/2016 a 31/12/2016.

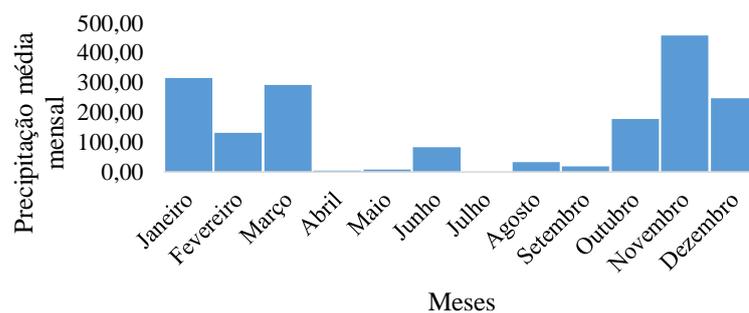


Figura 13 - Precipitação média mensal para o ano de 2016
Fonte: INMET (2016)

3.6 Geologia

A APA municipal do rio Uberaba está localizada na porção norte/nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, apresentando estratigraficamente rochas do Grupo São Bento (basaltos da Formação Serra Geral) sobreposto pelos arenitos e conglomerados do Grupo Bauru (arenitos de Formação Uberaba e Formação Marília), com boa parte da área coberta com sedimentos cenozoicos (sedimentos aluviais recentes) (VALLE JÚNIOR, 2008) (Figura 14).

A situação geológica da bacia do rio Uberaba possui camadas intercaladas entre material basáltico e deposição de sedimentos, proporcionando uma excelente infiltração, deposição e armazenamento de água no solo, guardando um grande manancial de água no subsolo, o Aquífero Guarani (OLIVEIRA, 2005).

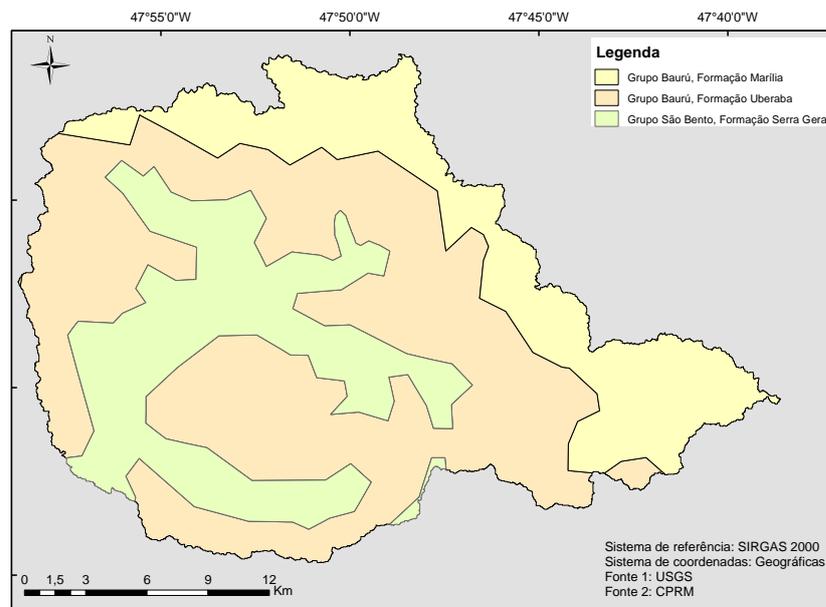


Figura 14 - Mapa Geológico da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

3.7 Solos

As unidades de solos identificadas na APA municipal do rio Uberaba estão representadas na Figura 15.

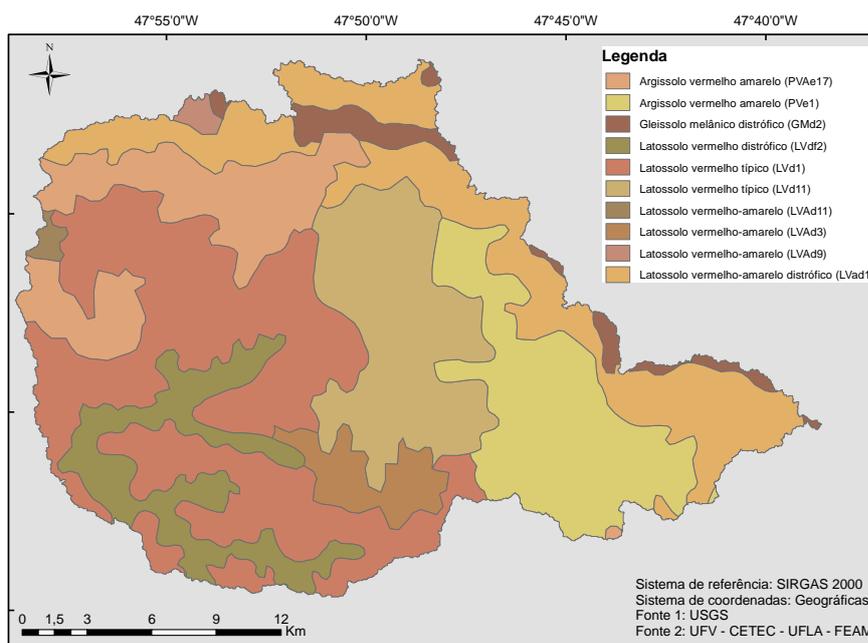


Figura 15 - Mapa dos Solos da APA municipal do rio Uberaba
 Fonte: A autora (2017)

De acordo com o mapa de solos da UFV (2010) para o Estados de Minas Gerais a descrição das unidades de mapeamento identificadas na APA municipal do rio Uberaba são:

- **Latossolo vermelho-amarelo**

- **LVAd1** – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa; fase cerrado, relevo plano e suave ondulado.
- **LVAd3** – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média; fase caatinga hipoxerófila, relevo plano e suave ondulado.
- **LVAd9** – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico plânticos argissólicos A moderado textura argilosa; ambos fase campestre e cerrado, relevo plano e suave ondulado.
- **LVAd11** – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura siltosa/argilosa, cascalhento/ não cascalhento, pedregoso/não pedregoso; ambos fase cerrado, relevo suave ondulado e ondulado.

- **Latossolo Vermelho**

- **LVd1** – LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura média; fase floresta subcaducifólia, relevo plano e suave ondulado.
- **LVd6** – LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa; ambos fase cerrado, relevo plano e suave ondulado.
- **LVd11** – LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico textura média A moderado + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico A moderado/chernozêmico textura média + NEOSSOLO LITÓLICO típico chernossólico textura média; todos cerrado e floresta subcaducifólia e campo cerrado, relevo plano e suave ondulado e ondulado e forte ondulado.
- **LVdf1** – LATOSSOLO VERMELHO distroférico típico A moderado/proeminente textura argilosa; fase floresta subcaducifólia, relevo plano e suave ondulado.
- **LVdf2** – LATOSSOLO VERMELHO distroférico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico A moderado textura média/argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO eutrófico típico A chernozêmico textura média/argilosa, fase pedregosa; todos fase cerrado e floresta caducifólia, relevo plano e suave ondulado e ondulado.
- **Argissolo Vermelho Amarelo**
 - **PVAe17** – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico A moderado/ chernozêmico textura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico e léptico A moderado textura média/argilosa, cascalhento/não cascalhento; todos fase floresta caducifólia e cerrado e caatinga hipoxerófila, relevo plano e suave ondulado e ondulado.
 - **PVe1** - Argissolo Vermelho Eutrófico típico A moderado textura média/argilosa e argilosa/muito argilosa; fase floresta subcaducifólia, relevo ondulado.
- **Gleissolo Melânico**
 - **GMd2** - GLEISSOLO MELÂNICO distrófico típico A proeminente + ORGANOSSOLOS HÁPLICO sáprico típicos e terricos + LATOSSOLO

VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa; todos fase campestre, relevo plano e suave ondulado.

3.8 Cobertura Vegetal Remanescente

Com relação à cobertura vegetal natural remanescente na APA Municipal do Rio Uberaba, foram observados os seguintes tipos: mata/cerradão (galeria, topo e encostas), cerrado e campo sujo, que juntos perfazem o equivalente a 30.363,57 hectares (57% da área) (ABDALA *et al.*, 2011).

3.9 Qualidade da Água

O CODAU (2005) efetuou o levantamento das diversas atividades potencialmente poluidoras exercidas na bacia do rio Uberaba antes do ponto de captação de água. As principais atividades são descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Atividades potencialmente poluidoras exercidas na bacia do rio Uberaba à montante do ponto de captação do CODAU

Local	Atividade geradora de impacto	Potencial poluidor sobre a água
Nascentes	Cultura de milho e soja	Fertilizantes e biocidas (nitrogênio, fósforo, potássio, cádmio, cobre, mercúrio, chumbo e zinco).
	Pastagens	Aceleração dos processos erosivos e diminuição da vazão do rio (sólidos em suspensão, coliformes)
Comunidade rural de Santa Rosa/Uberaba	Horticultura	Fertilizantes e biocidas (nitrogênio, fósforo, potássio, cádmio, cobre, mercúrio, chumbo e zinco).
	Fossa Negra	Contaminação do lençol freático (coliformes)
	Extração de cascalho e argila	Perda da cobertura vegetal. Foco de processos erosivos (sólidos em suspensão)
Uberaba	Captação de água (CODAU)	Diminuição da vazão do rio Uberaba.
À montante da captação	Pesque-pague	Contaminação da água com resíduos sólidos e efluentes domésticos (coliformes e matéria orgânica)
	Malha urbana de Uberaba	

Fonte: Adaptado de CODAU (2005)

Guglielmeli *et al.* (2016) avaliaram a qualidade da água de um trecho do alto curso do rio Uberaba por meio do Índice de Qualidade da Água (IQA) para os anos de 2000 a 2012. O IQA apresentou resultados em 58% das amostras como bom e médio em 38% das amostras (Figura 16). Estatisticamente a sazonalidade não teve interferência direta significativa.

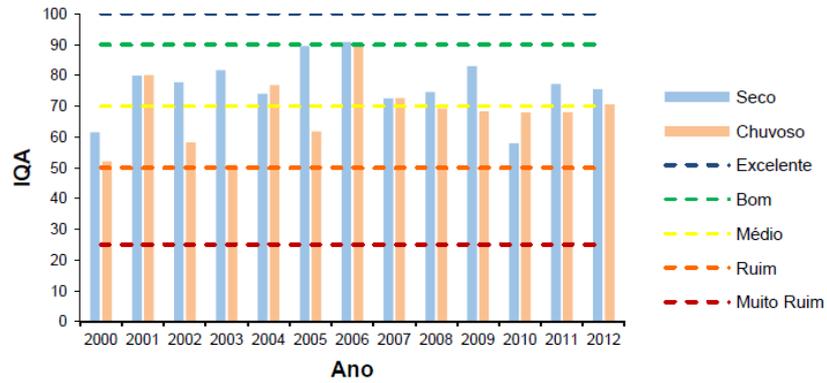


Figura 16 - Série temporal do IQA para trecho do alto curso do rio Uberaba
Fonte: Guglielmeli *et al.* (2016)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para identificar as áreas provedoras do serviço ambiental de controle da erosão na APA municipal do rio Uberaba foram necessários os dados que se encontram descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados utilizados na pesquisa.

Dados	Fonte
Imagens do satélite Landsat 8	USGS
Modelo Digital de Elevação (MDE)	USGS
Limites municipais e estaduais	IBGE
Arquivos vetoriais das rodovias e ferrovias	Ministério dos Transportes
Arquivos vetoriais da hidrografia	Agência Nacional das Águas
Limite da APA municipal do rio Uberaba	Secretaria de Meio Ambiente de Uberaba
Mapa de Solos de Minas Gerais	Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Neste trabalho foram utilizados programas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ArcGis Desktop 10.1 da ESRI, Word e Excel da Microsoft, Google Earth da Google e o NetErovidadeMG da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para coleta dos pontos de validação foi utilizado GPS portátil Garmin eTrex.

Para se atingir os objetivos deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas descritas no fluxograma representado pela Figura 17 e descritas nas subseções a seguir.

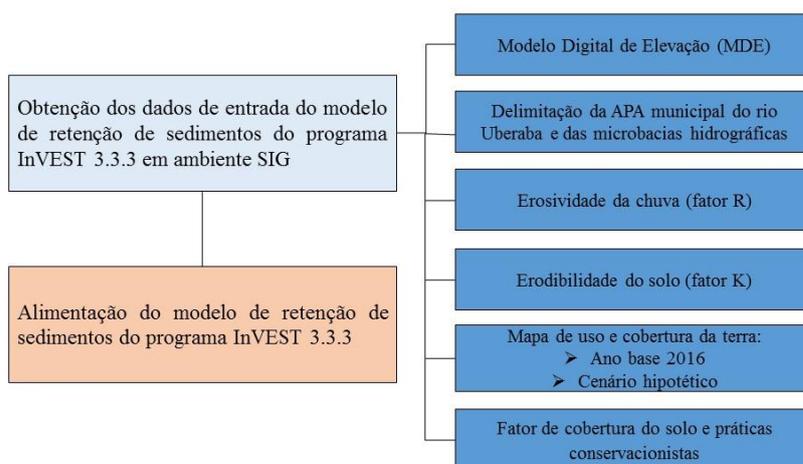


Figura 17 - Fluxograma da Metodologia

4.1 Obtenção dos Dados de Entrada do Modelo de Retenção de Sedimentos

Para execução do modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3 foi preciso gerar os dados de entrada. Os dados foram gerados em ambiente SIG e no Excel conforme descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de entrada do modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3

Dados de entrada	Descrição	Programa utilizado
Modelo Digital do Terreno (MDE)	Mapa na estrutura <i>raster</i> com o valor de elevação para cada célula.	ArcGis 10.1
Delimitação das microbacias hidrográficas da área de estudo	Mapa com a delimitação das microbacias hidrográficas, que serão analisadas quanto à produção e retenção de sedimentos para um determinado ponto de interesse.	ArcGis 10.1
Erosividade da chuva (R)	Mapa na estrutura <i>raster</i> com o valor do índice de erosividade para região (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹). Valor que depende da duração e intensidade da chuva para a região.	ArcGis 10.1
Erodibilidade do solo (K)	Mapa na estrutura <i>raster</i> com o valor de erodibilidade (Mg ha h MJ ⁻¹ mm ⁻¹) para cada tipo de solo. Esta erodibilidade é determinada pelo potencial de desagregação das partículas constituintes do solo.	ArcGis 10.1
Mapa de uso e cobertura da terra	Mapa na estrutura <i>raster</i> com os usos e coberturas da região de estudo	ArcGis 10.1
Tabela biofísica	Tabela com os usos e coberturas dos solos com seus respectivos fatores relativos ao potencial de retenção de sedimentos e referidas práticas conservacionistas no formato .csv.	Excel 2013

Fonte: Adaptado de Zanella (2016)

Todos os dados gerados em ambiente SIG estão no sistema de referência SIRGAS 2000 e no sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM) no fuso 23 S.

4.1.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado neste trabalho, foi obtido gratuitamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). O MDE foi processado antes de ser utilizado de modo a definir o sistema de referência para o SIRGAS 2000 na projeção UTM fuso 23 S e a resolução radiométrica de 16 bits.

Seguindo a recomendação do manual do InVEST 3.3.3, as depressões no MDE advindas dos dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram corrigidas pela função *fill sinks* do ArcGIS 10.1. De acordo com Sobrinho *et al.* (2010) essa função considera as altitudes dos *pixels* vizinhos para preencher as depressões presentes no MDE (Figura 18), que representam um empecilho ao escoamento durante a aplicação de modelos hidrológicos, sedimentológicos e de poluentes de origem difusa. O preenchimento do MDE é o primeiro tratamento dado à matriz de altitudes.

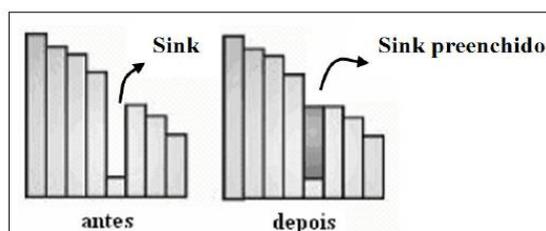


Figura 18 - Correção de erros do tipo *sink* por meio da execução da função *fill sinks*
Fonte: Sobrinho *et al.* (2010)

4.1.2 Delimitação da APA Municipal do Rio Uberaba e das microbacias hidrográficas

A delimitação da APA municipal do rio Uberaba foi realizada no Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis 10.1 utilizando a ferramenta ArcHydro, que delimita de forma automática a rede de drenagem, as bacias e microbacias hidrográficas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE).

A fim de gerar resultados que pudessem ser comparados com estudos realizados nas microbacias do rio Uberaba e alinhados com o Diagnóstico Ambiental da APA municipal do rio Uberaba, foi mantida a delimitação das 13 microbacias hidrográficas mais a área restante. A área restante não é uma microbacia, mas sim o resultado da soma de todas as pequenas microbacias que não atingiram 1% da área da APA (UBERABA, 2004). Neste trabalho as

microbacias da área restante serão analisadas individualmente, assim como as treze microbacias supracitadas, que são: Saudade, Lanhoso, Pintos, Lageado, Buracão, Alegria, Da Vida, Barreiro, Limo, Mutum, Inhame, Sapecado e Água Santa.

As etapas realizadas no ArcGis 10.1 utilizando a ferramenta ArcHydro foram:

1. *Fill sinks*: preenche pequenas imperfeições nos dados e remove todas as depressões considerando as altitudes dos *pixels* vizinhos;
2. *Flow direction*: esta ferramenta calcula a direção do fluxo em oito direções tomando por base a linha de maior declividade do terreno, gerando como saída uma grade regular que define as direções de fluxo;
3. *Flow accumulation*: calcula o fluxo acumulado obtido somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (ou escoamento), representando assim a rede hidrográfica;
4. *Stream definition*: define a rede de drenagem para o DTM utilizando um limiar para acumulação de fluxo, que neste trabalho, o especificado foi 1000;
5. *Catchment grid delineation*: gera uma grade de captação contendo o delineamento da rede de drenagem combinado com o fluxo;
6. *Catchment polygon processing*: converte a grade de captação em uma classe de recurso de polígono de captação;
7. *Drainage line processing*: processa a linha de drenagem atribuindo um identificador da bacia em que reside;
8. *Adjoint catchment processing*: processa as bacias adjacentes, considerando as captações de fluxo ascendente de modo que para cada microbacia um polígono representa toda a área de drenagem da área a montante;
9. *Drainage point processing*: essa função gera os pontos de drenagem associados às microbacias hidrográficas;
10. *Bath point generation*: esta etapa é efetuada em dois momentos. Primeiro para delimitar a APA municipal do rio Uberaba, onde o *bath point* inserido correspondeu às coordenadas do ponto de captação de água do CODAU. O outro foi para delimitar as treze microbacias hidrográficas, onde para cada uma delas foi inserido um *bath point* na foz do corpo hídrico.

11. *Watershed delineation*: esta etapa foi realizada quatorze vezes, sendo uma para delimitar a APA municipal do rio Uberaba e as outras 13 para delimitar as microbacias.

As microbacias da área restante foram adquiridas no arquivo *catchment* gerado durante o processo realizado na extensão do ArcHydro do programa ArcGis 10.1. Utilizando a ferramenta *clip* foram recortadas somente as microbacias da APA municipal do rio Uberaba. Logo após esse procedimento, foram selecionadas somente as microbacias que correspondem à área restante, que foram exportadas no formato *shapefile*². Utilizando a ferramenta *merge* as treze microbacias foram agrupadas à área restante. Tal procedimento gerou um único arquivo em formato *shapefile* que será utilizado no modelo matemático retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3. Esse arquivo em formato *shapefile* com a delimitação das microbacias deverá ter na tabela de atributos uma coluna denominada “ws_id”, com atributo em formato número inteiro para cada microbacia.

4.1.3 Erosividade da Chuva

O mapa de erosividade da APA municipal do rio Uberaba foi obtido seguindo a metodologia adotada por Matos (2015), descrita a seguir:

- Obtenção e instalação do programa computacional NetErosividade MG no site <<http://www.gprh.ufv.br/>>. O programa computacional NetErosividade MG permite estimar o valor da erosividade da chuva mensal e anual da intensidade máxima da chuva em trinta minutos (EI₃₀) para qualquer localidade do Estado de Minas Gerais (MOREIRA *et al.*, 2008).
- Obtenção das coordenadas das estações pluviométricas existentes no contexto da área de estudo e, em seguida, os valores da erosividade da chuva pela latitude e longitude.
- Interpolação dos dados em SIG.

As coordenadas das estações de monitoramento pluviométrico da área de estudo foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (HIDROWEB/ANA) e baixadas em formato *shapefile* (Figura 19). Foram escolhidas as

² *Shapefile*: é um formato proprietário da ESRI para armazenamento de dados geográficos na estrutura vetorial quanto a sua posição, forma e atributos.

estações próximas a área de estudo, para que os valores da erosividade obtidos no programa NetErosividade MG (MOREIRA *et al.*, 2008) fossem interpolados no SIG ArcGis 10.1.

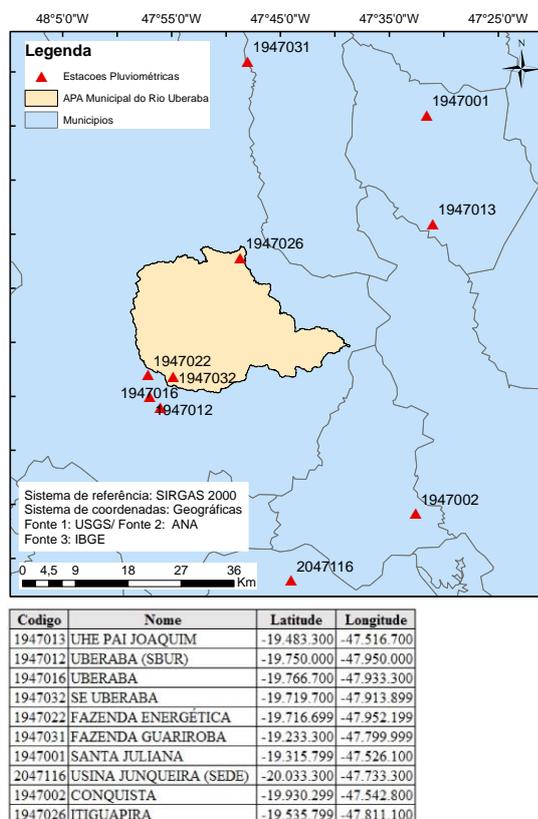


Figura 19 - Estações de monitoramento pluviométrico e respectivas coordenadas

As coordenadas das estações de monitoramento pluviométrico foram inseridas no campo destinado para ela no programa e foi obtida a respectiva erosividade, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Erosividade por Estação Pluviométrica

Estação	Latitude	Longitude	EI F
UHE PAI JOAQUIM	-19.483.300	-47.516.700	6696
UBERABA (SBUR)	-19.750.000	-47.950.000	6518
UBERABA	-19.766.700	-47.933.300	6505
SE UBERABA	-19.719.700	-47.913.899	6543
FAZENDA ENERGÉTICA	-19.716.699	-47.952.199	6545
FAZENDA GUARIROBA	-19.233.300	-47.799.999	6845
SANTA JULIANA	-19.315.799	-47.526.100	6835
USINA JUNQUEIRA (SEDE)	-20.033.300	-47.733.300	6294
CONQUISTA	-19.930.299	-47.542.800	6392
ITIGUAPIRA	-19.535.799	-47.811.100	6674

Fonte: NetErosividade MG (MOREIRA *et al.*, 2008)

No ArcGis 10.1 os dados da erosividade foram interpolados por *Krigagem*³, dentro da extensão *Spatial Analyst Tools*.

4.1.4 Erodibilidade do Solo

Os tipos de solos existentes na bacia devem estar atrelados ao valor do fator de erodibilidade do solo, também conhecido como fator K (CONCEIÇÃO, 2014). Para isso foi necessário o mapa de solos da área de estudo. Neste trabalho foi utilizado o mapa de solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2010) para o estado de Minas Gerais, em escala de 1:600.000 e formato *shapefile*. Neste mapa foi feito o recorte somente da área de estudo utilizando a função *clip* do programa ArcGIS 10.1.

Também foram adotados valores médios do fator K, de acordo com Gómez (2012). Para isso os tipos de solos foram agrupados em apenas três (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de erodibilidade

Tipo de Solo	Valor médio de K (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Gleissolo	0,03612
Latossolo	0,01625
Argissolo	0,04825

Fonte: Gómez (2012)

No programa ArcGis 10.1 o mapa de erodibilidade no formato *shapefile* foi convertido para a estrutura *raster* e posteriormente foi reclassificado. As informações de classe de solos foram substituídas pela informação de erodibilidade (K) (Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹).

4.1.5 Mapa de Uso e Cobertura da Terra (ano base 2016)

Os procedimentos para obtenção do mapa de uso e cobertura da terra estão no fluxograma da Figura 20, conforme metodologia adotada por Guglielmeli (2017).

³ Krigagem: é um método de regressão usado para interpolar dados amostrais.

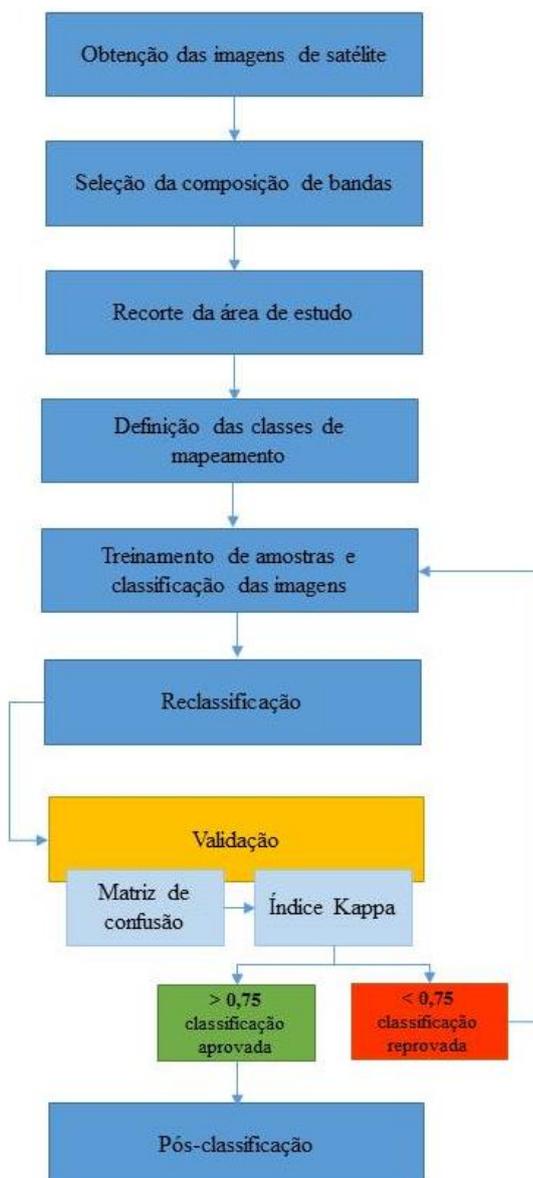


Figura 20 - Fluxograma das etapas de elaboração do mapa de uso e cobertura da terra
Fonte: Guglielmeli (2017)

A imagem de satélite utilizada neste trabalho foi obtida gratuitamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Trata-se de uma imagem do satélite Landsat 8, sensor OLI, órbita/ponto 220/74, resolução espacial de 30 metros e resolução radiométrica de 16 *bits* (Figura 21). Para a escolha da imagem levou-se em consideração que ela tivesse uma porcentagem igual ou inferior a 10% de cobertura de nuvens. A cena adquirida para esta pesquisa foi tomada em 09/04/2016, e esta data foi selecionada no mês de abril por estar no período seco.

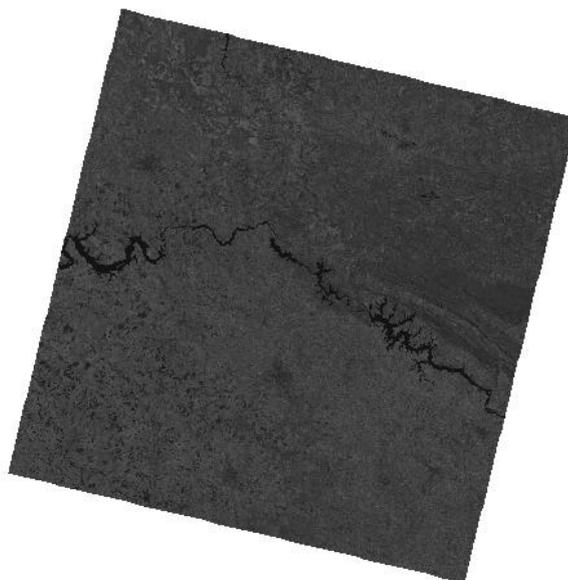


Figura 21 - Imagem do satélite Landsat 8, banda 5
Fonte: USGS (2016)

A imagem do satélite Landsat 8 é disponibilizada georreferenciada. No entanto, ela vem orientada ao norte verdadeiro precisando assim passar por alguns procedimentos no ArcGis 10.1. Desta forma ela foi primeiro colocado no sistema de referência para o Hemisfério Sul no *Datum* SIRGAS 2000 e projetada na projeção UTM fuso 23 S.

O segundo procedimento consiste em escolher a composição colorida RGB (*Red, Green, Blue*), que consiste em associar 3 bandas de imagem às cores vermelho, verde e azul respectivamente. Neste trabalho foram utilizadas as bandas 4, 5 e 6 na composição 6R5G4B (Figura 22) a fim de obter uma composição colorida falsa cor, que é a mais indicada quando o objetivo é a criação do mapa de uso e ocupação da terra. O último procedimento é a realização do recorte da área de estudo através da função extração por máscara.



Figura 22 - Imagem do satélite Landsat 8, composição 6R5G4B
Fonte: USGS (2016)

No primeiro momento as classes identificadas na área de estudo foram: covaais, vegetação natural, agricultura estágio inicial, agricultura estágio avançado, solo exposto 1 (tons de roxo), solo exposto 2 (tons de vermelho escuro), solo exposto 3 (tons de vermelho claro), pastagem, área urbanizada e construída.

Após a classificação foi feita a reclassificação da imagem, onde foram definidas as classes que serão utilizadas para a confecção do mapa de uso e cobertura da terra. O Quadro 3 mostra quais classes foram identificadas inicialmente e as classes após a reclassificação.

Quadro 3 - Classes identificadas e reclassificação

Classes identificadas	Classes reclassificadas	Descrição
Área urbanizada e construída	Área urbana	Área urbana e vias pavimentadas
Solo exposto 1 (tons de vermelho escuro)	Solo exposto	Áreas agrícolas que foram aradas e se encontram temporariamente com o solo exposto
Solo exposto 2 (tons de roxo)		
Solo exposto 3 (tons de vermelho claro)		
Agricultura estágio inicial	Agricultura	Áreas destinadas à agricultura anual ou não
Agricultura estágio avançado		
Pastagem	Pastagem	Áreas cobertas por capim destinadas ao pastoreio do gado
Vegetação natural	Vegetação natural	Áreas de remanescentes florestais, matas ciliares
Covaais		

Fonte: A autora (2017)

No mês julho de 2016 foi realizado um trabalho de campo para validação das classes identificadas. As Figuras de 23 a 28 representam os pontos de validação verificados em campo.



Figura 23 - Área de pastagem



Figura 24 - Cultura de cana de açúcar em estágio inicial



Figura 25 - Cultura de cana de açúcar em estágio avançado

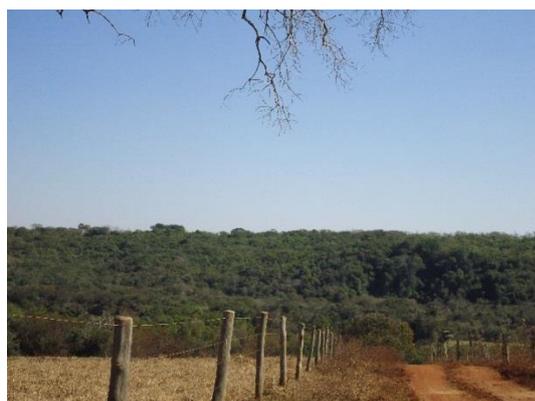


Figura 26 - Vegetação natural



Figura 27 - Solo coberto por palhada de cana de açúcar



Figura 28 - Solo exposto preparado para o cultivo

Uma etapa que antecede à classificação é a seleção das amostras de cada classe e a criação das assinaturas espectrais de cada amostra a partir do *Training Sample Manager*. Esta

etapa é necessária, pois a classificação supervisionada requer que algoritmo seja treinado com base na coleta de amostras das diferentes classes de usos de interesse no estudo em áreas homogêneas, para que com base nessas o mesmo identifique os *pixels* espectralmente similares aos das amostras (FARIA *et al.*, 2015). Após esta etapa foi gerado o arquivo de assinatura no formato (.gsg), que é o arquivo de assinatura definido no treinamento. A Tabela 8 apresenta o tamanho amostral utilizado para a assinatura espectral das classes em cada imagem.

Tabela 8 - Classes amostrais para treinamento

Classes	Número de <i>pixels</i> de treino
Área urbana	279
Solo exposto 1 (tons de vermelho escuro)	739
Solo exposto 2 (tons de roxo)	985
Solo exposto 3 (tons de vermelho claro)	1043
Agricultura estágio inicial	2932
Agricultura estágio avançado	1161
Pastagem	252
Vegetação natural	920
Covoais	523

A classificação foi realizada no programa ArcGis 10.1 utilizando o método de classificação supervisionada *pixel-a-pixel*, conhecido como Máxima Verossimilhança (Maxver). Após a classificação a imagem foi reclassificada através da ferramenta *reclass* do *Spatial Analyst Tools* do ArcGis 10.1. Em seguida foi aplicado o filtro majoritário para eliminar possíveis *pixels* que tenham sido classificados de forma errada, aparecendo como pequenos pontos dentro de classes maiores.

A fim de verificar a confiabilidade dos dados gerados, neste trabalho o resultado da reclassificação foi submetido à validação calculando a matriz de confusão e o índice *Kappa*. Para calcular a matriz de confusão e o índice *Kappa*, foram selecionados 30 pontos de amostras para cada classe, totalizando 150 pontos amostrados. Neste trabalho, ficou definido que o mapa de uso e cobertura da terra gerado pela reclassificação seria aceito se o resultado do índice *Kappa* fosse acima de 0,75, corroborando com Fernandes (2006) que considera este resultado adequado.

De acordo Lima (2014) é comum que a classificação não esteja totalmente precisa, apresentando erros, seja pelas confusões na obtenção das assinaturas espectrais ou pelas

semelhanças espectrais em alvos distintos, resultando em uma classificação equivocada, assim a etapa de correção da classificação é normalmente necessária. Neste trabalho esta etapa foi chamada de pós-classificação, o arquivo *raster* foi transformado para polígono no formato *shapefile*. Na ferramenta *editor* do ArcGis 10.1 foram feitos alguns ajustes em relação às áreas que foram erroneamente classificadas.

4.1.6 Mapa de Uso e Cobertura da Terra para o Cenário Hipotético

A fim de se criar um cenário hipotético, onde as Áreas de Preservação Permanente (APPs) se encontram reflorestadas, foi criado um novo mapa de uso e cobertura da terra, em que estas áreas foram somadas às áreas de vegetação natural. Para isso, primeiro converteu-se o arquivo na estrutura *raster* para polígono na estrutura vetorial, para que o mesmo pudesse ser editado. Logo após, inseriu-se a rede de drenagem para estimar as APPs utilizando a ferramenta *buffer* no Arc toolbox. Para determinar a extensão delas, seguiu-se o que preconiza a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Sendo adotado 30 m ao longo dos cursos d'água com menos de 10 m de largura e um raio de 50 m para as nascentes.

O *buffer* criado foi cruzado com o mapa de uso e cobertura da terra e por meio da função “*erase*” do ArcGIS, de modo a retirar os usos incompatíveis com as APPs. A fim de simular que houve a regeneração das APPs, estes usos incompatíveis foram substituídos pela classe vegetação natural. Por fim, o polígono já com às áreas de vegetação natural somadas às áreas de APP, foi convertido para o formato *raster* novamente para ser utilizado para estimar as perdas de solo na APA municipal do rio Uberaba.

4.1.7 Fator de Cobertura do Solo e Práticas Conservacionistas

Para a área de estudo foram considerados os seguintes valores para os fatores C e P que representam o uso e manejo do solo e as práticas conservacionistas, respectivamente, sendo os dois adimensionais. Para o Fator C considerou-se os valores encontrados por Valle Júnior (2008) para a região. Para os valores do fator P foram adotados o valor $P = 1$, que representa a pior situação possível de práticas conservacionistas, para os usos agricultura, solo exposto e pastagem.

4.2 Alimentação do Modelo de Retenção de Sedimentos do Programa InVEST

O modelo de Retenção de Sedimentos da versão 3.3.3 do programa InVEST é executado através do Menu Iniciar do Windows > Todos os Programas > InVEST > SDR. Para executá-lo não é necessário um ambiente SIG, mas os seus resultados demandam uma ferramenta de SIG para serem analisados. A interface utilizada no InVEST está apresentada na Figura 29.

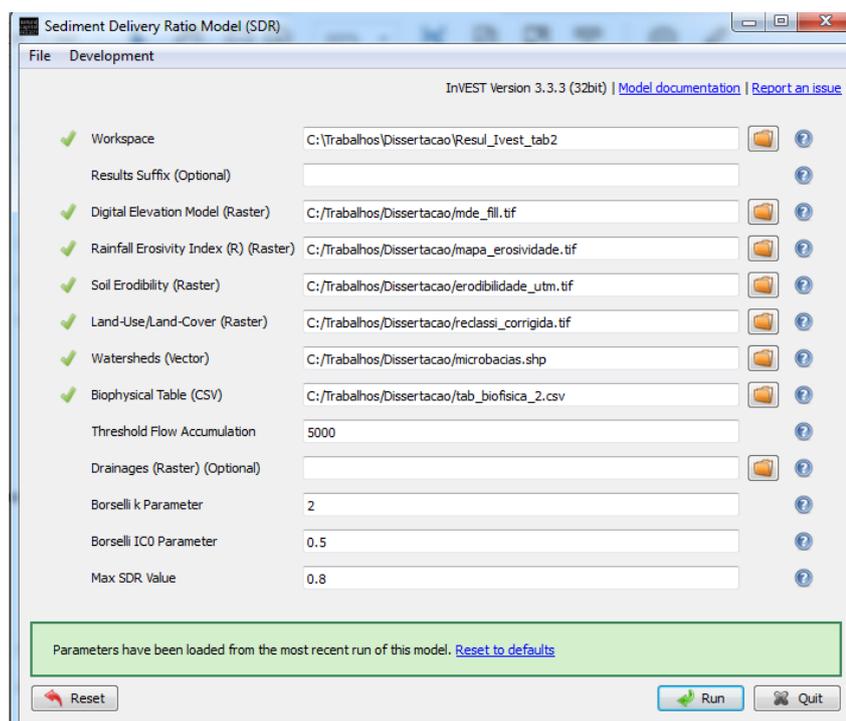


Figura 29 - Tela de alimentação para executar o módulo retenção de sedimentos
Fonte: A autora (2017)

Além dos dados de entrada que precisaram ser gerados para este trabalho, é necessário informar a pasta onde os resultados da modelagem serão salvos no campo denominado *workspace*. Também é preciso informar as variáveis: limite de acumulação de fluxo (*Threshold flow accumulation*), relação máxima do aporte de sedimento (*Max SDR value*) e os fatores de calibração kb (*Borselli K parameter*) e IC0 (*Borselli IC0 parameter*).

O manual da *Natural Capital Project* (2015 *apud* Zanella, 2016) define limite de acumulação de fluxo (*Threshold flow accumulation*) como:

o número de células a montante do ponto de interesse, que deve fluir para uma célula, antes de ser considerado parte de uma drenagem do terreno, utilizado para determinar a drenagem do modelo digital do terreno. Este limiar influi na

conectividade hídrica e na exportação de sedimentos, sendo que quando este atinge a corrente, a deposição de sedimentos é interrompida e o sedimento passa a ser exportado até alcançar o ponto de interesse.

Quanto ao limite de acumulação de fluxo (*Threshold flow accumulation*), Maidment (2002 *apud* Zanella, 2016) afirma que qualquer valor pode ser utilizado, no entanto valores abaixo de 1000 células são questionáveis quando a área apresenta topografia plana. Esse autor destaca que nos Estados Unidos, quando se utiliza imagens de satélite com células de dimensões de 30 metros, o valor típico para o *Threshold flow accumulation* é de 5000. Como neste trabalho foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, que apresenta resolução de 30 metros, aplicou-se o valor de 5000 para a variável *Threshold flow accumulation*.

De acordo com o manual da *Natural Capital Project* (2015 *apud* Zanella, 2016) “a relação do aporte de sedimento máxima (*Max SDR value*) corresponde ao valor máximo que uma célula pode atingir em função da textura do solo”. Conforme Zanella (2016), pode ser adotado o valor padrão de 0,8 para a variável aporte de sedimento máxima (*Max SDR value*) na calibração quando não se tem estudos detalhados do transporte de sedimento da região de interesse.

“Os fatores k_b e IC_0 são de calibração e definem a relação entre o índice de conectividade e a razão de remoção de sedimentos (SDR)” (ZANELLA, 2016). Neste trabalho adotou-se os valores padrões do modelo para as variáveis $k_b = 2$, $IC_0 = 0,5$ e $SDR_{max} = 0.8$.

5 RESULTADOS

Nos tópicos a seguir estão descritos os resultados. No item 5.1 serão apresentados os resultados dos dados gerados em ambiente SIG. Estes dados serão utilizados para alimentar o modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3. Na sequência, no item 5.2 serão apresentados os dados de saída resultantes da modelagem executada pelo modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3.

5.1 Dados de Entrada do Modelo de Retenção de Sedimentos Gerados no ArcGIS

Uma vez que, buscou-se gerar os dados de entrada especificamente para a área de estudo, espera-se diminuir as incertezas causadas quando se utilizam dados globais. Estes são apresentados nos tópicos a seguir.

5.1.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) representa um conjunto de dados na estrutura *raster* com um valor de elevação (em metros) para cada célula. O mapa da Figura 30 mostra que os valores de elevação da APA municipal do rio Uberaba variam de 715 a 1041 metros de altitude.

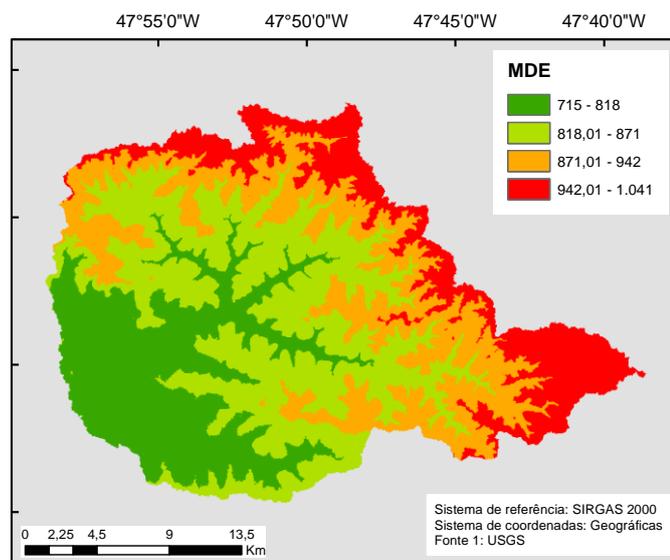


Figura 30 - Modelo Digital de Elevação da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

5.1.2 Delimitação das microbacias hidrográficas da área de estudo

A delimitação da APA municipal do rio Uberaba e da rede de drenagem efetuada automaticamente é ilustrada na Figura 31.

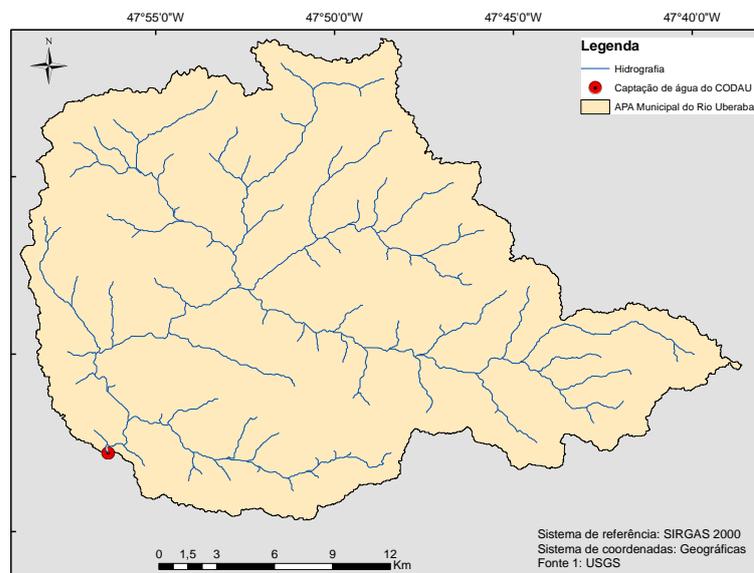


Figura 31 - Delimitação automática da APA municipal do rio Uberaba e da rede de drenagem
Fonte: A autora (2017)

A delimitação automática diverge da delimitação manual, o que já era esperado. Houve uma diminuição na área total da unidade de conservação, que manualmente apresentava uma área de 528 km². Na delimitação automática essa área passou a ter 520 km² (Figura 32).

No entanto, como a área de estudo corresponde ao alto curso da bacia hidrográfica do rio Uberaba, indo da nascente até o ponto de captação de água do Centro Operacional de Saneamento e Desenvolvimento (CODAU), a delimitação automática da APA Municipal do rio Uberaba foi considerada adequada.

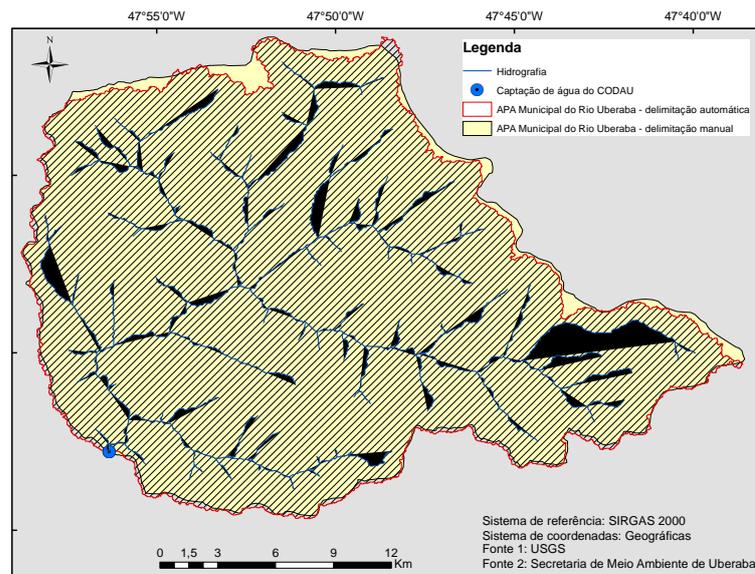


Figura 32 - Diferença da delimitação automática para a manual da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

As microbacias hidrográficas delimitadas automaticamente pela função *catchment* da extensão ArcHydro do ArcGIS 10 estão representadas na Figura 33.

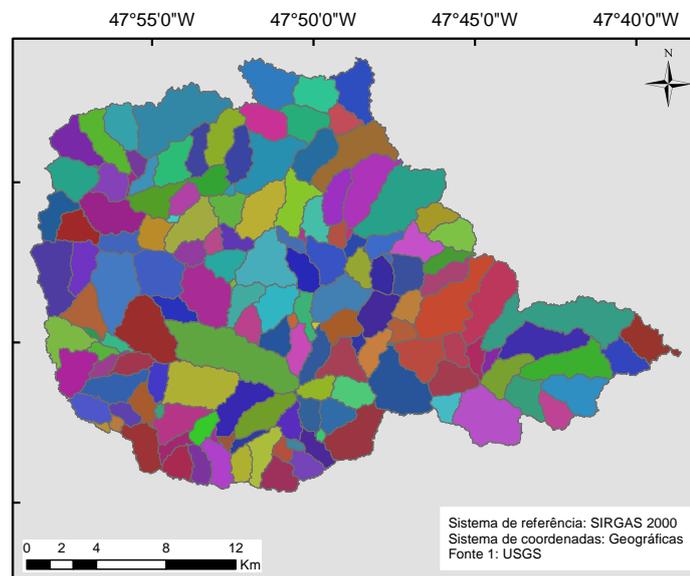


Figura 33 - Delimitação automática das microbacias hidrográficas da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

Como já foi citado na metodologia, neste trabalho optou-se por utilizar a delimitação das microbacias conforme consta no Diagnóstico Ambiental da APA municipal do rio Uberaba (UBERABA, 2004), pois dessa forma os resultados da modelagem desta pesquisa poderão ser comparados com trabalhos realizados na área de estudo. O resultado desta

delimitação utilizando a extensão ArcHydro do programa ArcGIS 10.1 está representada pela Figura 34.

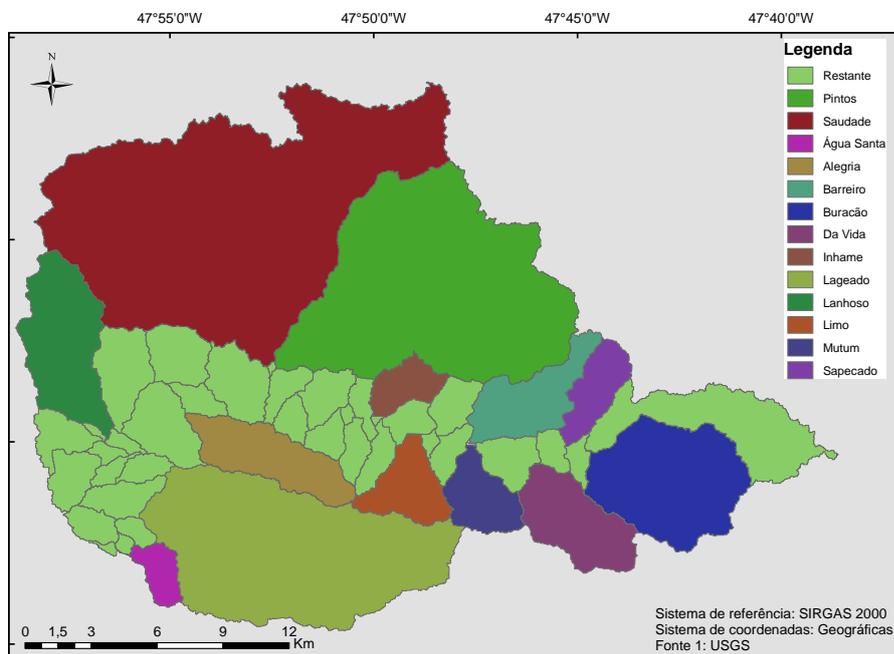


Figura 34 - Mapa das microbacias hidrográficas da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

De acordo com o Diagnóstico Ambiental (UBERABA, 2004), a APA municipal do rio Uberaba foi dividida em 13 microbacias maiores do que 4 km² e as microbacias inferiores a 1% e diretamente ligadas ao rio Uberaba recebeu o nome de Restantes, resultando em aproximadamente 22% da área. Na Tabela 9 estão as áreas correspondentes para cada microbacia, sendo a bacia do Córrego Água Santa a menor, representando apenas 0,76% da área e a microbacia do Ribeirão Saudade a maior representado cerca de 24%.

Tabela 9 - Microbacias com as respectivas áreas

Microbacia	Área (Km ²)	Percentual
Saudade	124,9	23,98%
Restante	115,6	22,21%
Pintos	83,9	16,11%
Lageado	66,9	12,85%
Buracão	29,7	5,70%
Lanhoso	21,2	4,08%
Da Vida	14,9	2,87%
Alegria	15,0	2,87%
Barreiro	13,6	2,60%

Limo	9,3	1,78%
Mutum	8,6	1,65%
Sapicado	7,6	1,45%
Inhame	5,6	1,08%
Água Santa	4,0	0,76%
Soma	520,60	100%

5.1.3 Erosividade da Chuva

O mapa de erosividade da APA municipal do rio Uberaba obtido no NetErosividade é ilustrado na Figura 35.

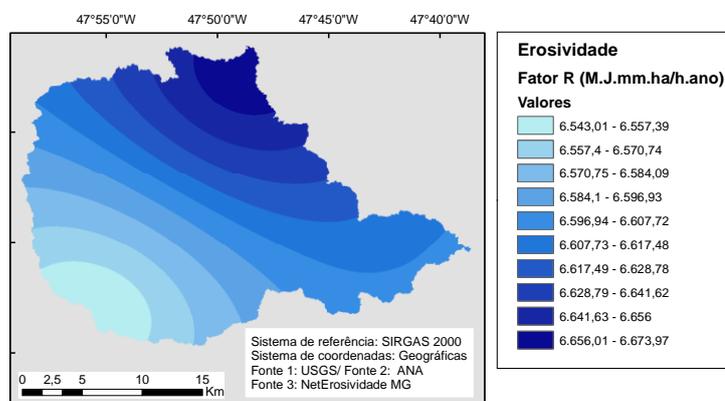


Figura 35 - Mapa de erosividade da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

A erosividade determinada para a área de estudo neste trabalho possui valores entre 6.543,01 a 6.656,01 M.J.mm.ha /h.ano. Segundo a chave de interpretação proposta por Carvalho (1994 *apud* MATOS, 2015), descrita na Tabela 10, os valores alcançados são classificados como média-forte. Valle Júnior (2008) calculou o valor médio anual da erosividade, referente à região de Uberaba – MG entre os anos de 1999 e 2005, e obteve o valor de 7.846,54 MJ.mm.ha/h.ano.

Tabela 10 - Classe de interpretação da erosividade da chuva

M.J.mm.ha/ h.ano	Classe
$R \leq 2452$	Baixa
$2452 < R \leq 4905$	Média
$4905 < R \leq 7357$	Média - forte
$7357 < R \leq 9810$	Forte
$R > 9810$	Muito forte

Fonte: Carvalho (1994) e Silva (2004) *apud* Matos (2015)

De acordo com Valle Júnior (2008), para a região de Uberaba - MG, o período de novembro a março representa maior risco erosivo. Enquanto nos meses de abril a setembro não houve elevação da inclinação das curvas de distribuição dos valores médios, assim estes meses apresentam menor risco erosivo, conforme a curva de distribuição a da erosividade acumulada da chuva calculada por Valle Junior (2008) ilustrada na Figura 36.

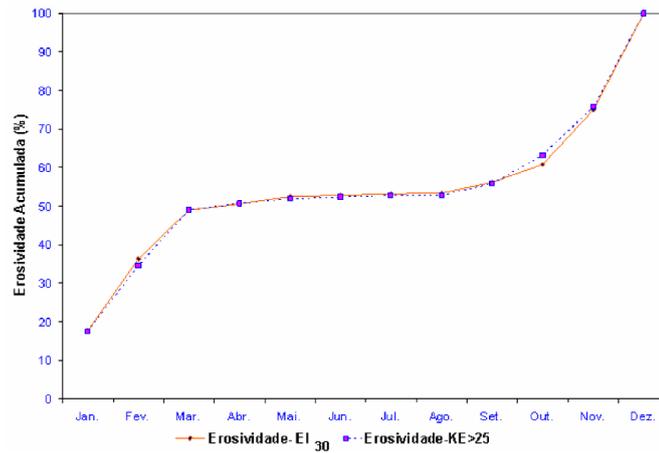


Figura 36 - Curva de distribuição da erosividade acumulada da chuva (EI30 e KE>25) de Uberaba (MG)
Fonte: Valle Júnior (2008)

5.1.4 Erodibilidade do Solo

O mapa de erodibilidade da APA municipal do rio Uberaba obtido do mapa de solos elaborado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2010) é ilustrado na Figura 37.

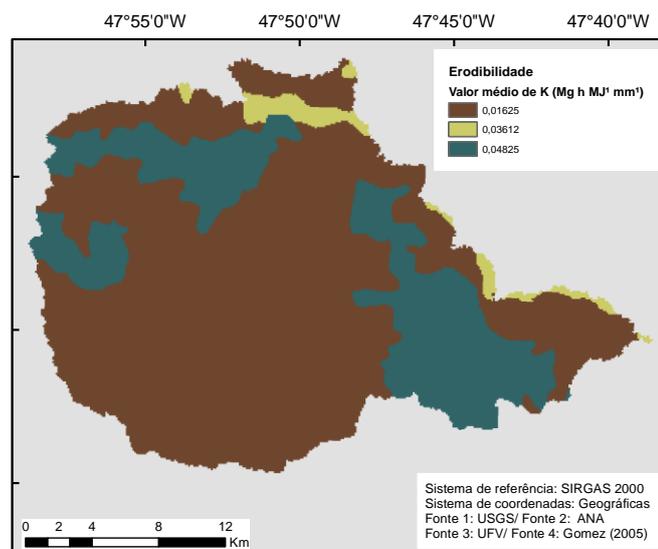


Figura 37 - Mapa de erodibilidade da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

A erodibilidade na área de estudo variou entre 0,01625 e 0,04825 Mg ha HJ⁻¹ mm⁻¹. Segundo a chave de interpretação adaptada de Carvalho (1994 *apud* MATOS, 2015), descrita na Tabela 11, a maior parte da bacia é composta predominantemente por solos de baixa erodibilidade (72%) onde o tipo de solo é o latossolo, os restantes são classificados como alta erodibilidade (25%), onde o tipo de solo é o argissolo e apenas 3% é classificado com erodibilidade média, onde o tipo de solo é o gleissolo.

De acordo com Matos (2015), os latossolos são os mais resistentes, pois além de possuírem alto grau de estabilidade e alta porosidade e permeabilidade, geralmente são bem drenados, profundos e coesos.

Tabela 11 - Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação

Intervalos de valores de K	Classe de Interpretação
k < 0,02	Erodibilidade Baixa
0,02 < k < 0,038	Erodibilidade Média
k > 0,038	Erodibilidade Alta

Fonte: Carvalho (1994) e Silva (2004) *apud* Matos (2015)

5.1.5 Uso e Cobertura da Terra

Para validar o mapa de uso e ocupação da terra foi gerada uma matriz de confusão (Tabela 12) e calculado o índice *Kappa*, que apresentou o resultado igual a 0,80%, ou seja, bom. Sendo assim, o grau de concordância da classificação foi considerado muito bom (Rabello, 2016) e aprovada para este trabalho.

Tabela 12 - Matriz de confusão gerada para a classificação em 9 classes para o ano de 2016. Em vermelho os erros e em verde os acertos

Classes	Área urbanizada	Solo exposto	Agricultura	Pastagem	Vegetação natural	Soma das linhas (amostras por classe)
Área urbanizada	23	4	0	0	0	27
Solo exposto	6	26	0	0	0	32
Agricultura	1	0	21	4	0	26
Pastagem	0	0	5	26	0	31
Vegetação natural	0	0	4	0	30	34
Soma das colunas (amostras na classe)	30	30	30	30	30	126

As classes que apresentaram maior confusão espectral entre si foram: solo exposto e área urbanizada, sendo que 20% dos *pixels* que deveriam ser atribuídos a essa classe área

urbanizada foram imputados erroneamente à classe solo exposto. Outras classes que apresentaram confusão espectral significativa foram: solo exposto e área urbanizada (13%), agricultura e pastagem (16%), agricultura e vegetação natural (13%), pastagem e agricultura (13%). Após a validação foi aplicado o filtro majoritário para agrupar *pixels* com a mesma similaridade (Figura 38)

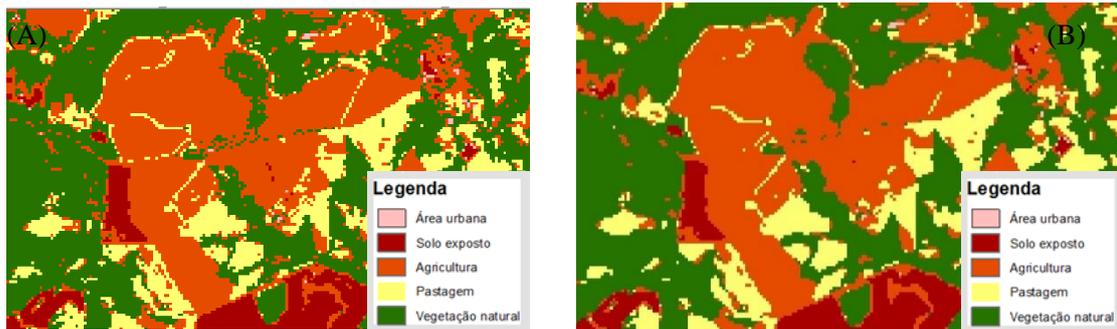


Figura 38 - (A) Imagem sem filtro (B) Imagem com filtro majoritário do Arcgis 10.1
Fonte: A autora (2017)

A seguir o resultado da reclassificação com a filtragem majoritária foi transformado em polígono. Esta etapa permite que cada polígono seja editado para a classe correta. Como mostrado na matriz de confusão, algumas classes apresentaram confusão espectral e para minimizar esses erros, o trabalho de pós-classificação é uma etapa importante. Realizando esse procedimento esses erros puderam ser corrigidos, gerando assim um mapa de uso e ocupação da terra mais condizente com a realidade. A Figura 39 demonstra a importância desta etapa, ilustrando onde antes do processo uma área urbana (em rosa) passou a ser solo exposto.

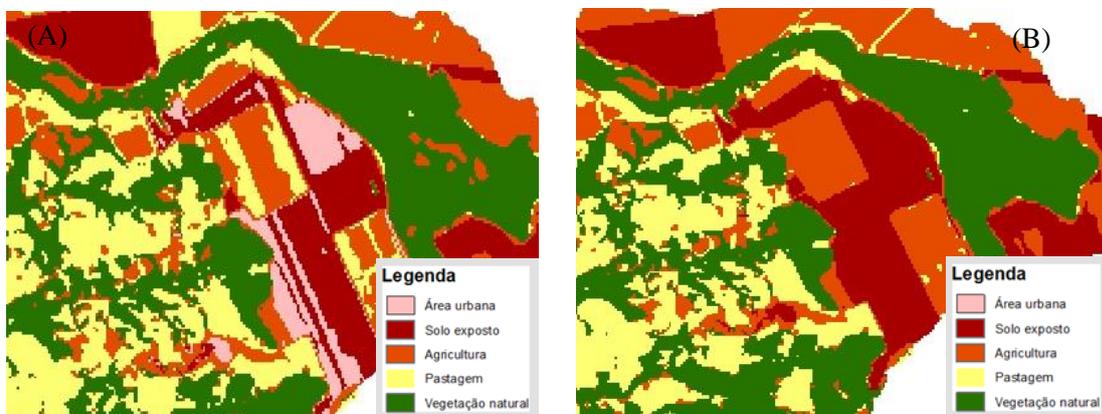


Figura 39 - (A) Área de solo exposto classificado como área urbana (em rosa), (B) Área de solo exposto após ser editada
Fonte: A autora (2017)

Após este processo o mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal de Uberaba passou ao mapa ilustrado na Figura 40.

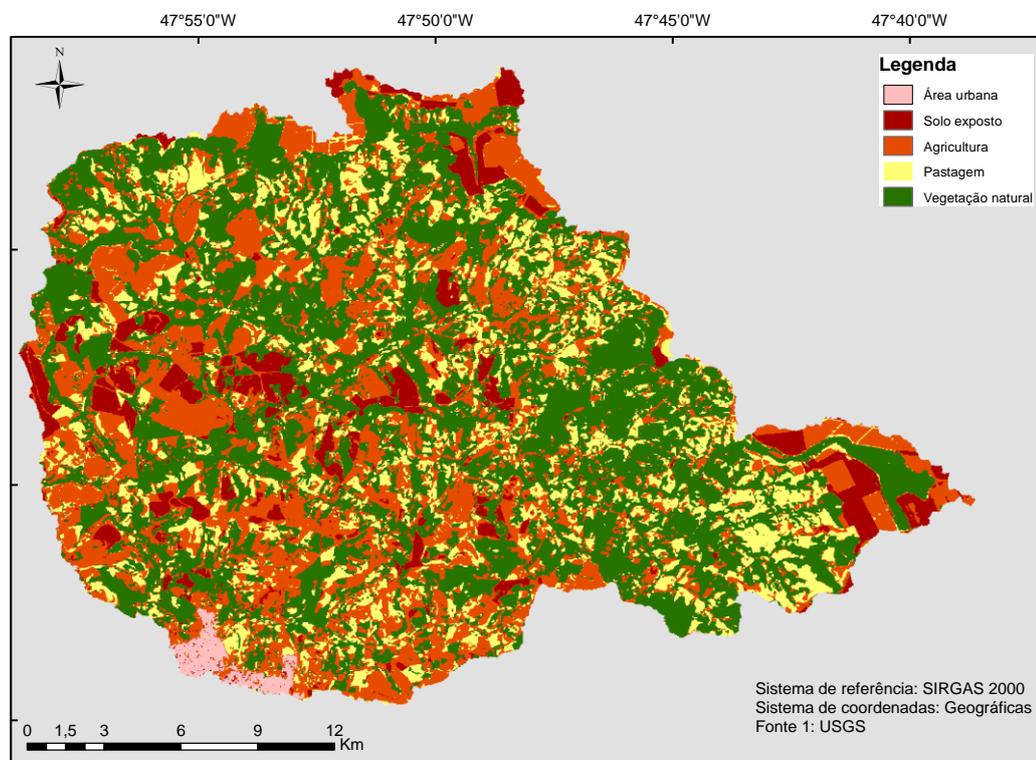


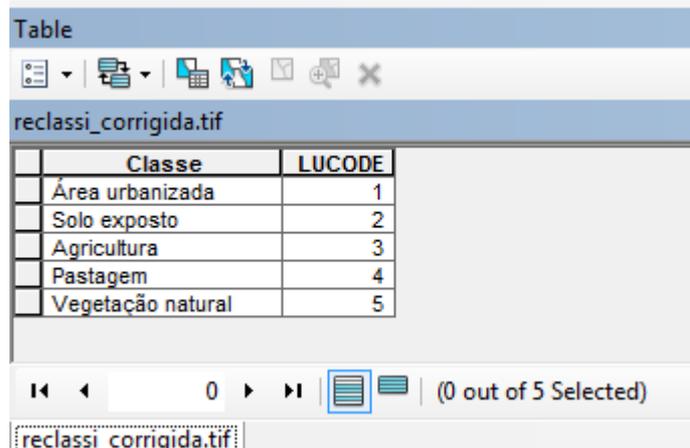
Figura 40 - Mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal do rio Uberaba para o ano de 2016
Fonte: A autora (2017)

Para cada classe foi calculado a área em km² e a porcentagem que cada classe representa dentro da APA municipal do rio Uberaba, conforme descrito na Tabela 13. Observa-se que a vegetação natural ocupa aproximadamente 43% da área, seguido de 31% de áreas agrícolas e 16% de áreas de pastagens. A menor ocupação é de área urbanizada.

Tabela 13 - Quantitativo das classes de uso e cobertura da terra para o ano de 2016

Classe	Área (km ²)	Percentual
Vegetação natural	226,76	43,56%
Agricultura	166,1	31,91%
Pastagem	84,94	16,32%
Solo exposto	38,1	7,32%
Área urbanizada	4,7	0,90%
Soma	520,6	100,00%

Tendo em vista que para o InVest 3.3.3 o mapa de uso e ocupação da terra deve estar em formato *raster*, na sua tabela de atributos é criada uma coluna, denominada LUCODE, com um código numérico inteiro para cada classe conforme ilustrado na Figura 41.



The screenshot shows a window titled 'Table' for the file 'reclassi_corrigida.tif'. It displays a table with two columns: 'Classe' and 'LUCODE'. The table contains five rows of data. Below the table, there are navigation controls and a status bar indicating '(0 out of 5 Selected)'.

Classe	LUCODE
Área urbanizada	1
Solo exposto	2
Agricultura	3
Pastagem	4
Vegetação natural	5

Figura 41 - Tabela de atributos do mapa de uso e cobertura da terra com código numérico para cada classe

O InVEST 3.3.3 necessita de uma tabela no formato (.csv), denominada tabela biofísica, apresentada na Tabela 14, que contém os valores do fator de cobertura do solo (fator C) e o fator de práticas conservacionistas (fator P) para cada classe de uso da terra.

Tabela 14 - Tabela biofísica para a área de estudo

LULC	lucode	usle_c*	usle_p
Área urbanizada	1	0	0
Solo exposto	2	1	1
Agricultura	3	0.16370	1
Pastagem	4	0.05500	1
Vegetação natural	5	0.00522	0

Fonte: *Valle Júnior (2008)

5.1.6 Uso e Cobertura da Terra para o Cenário Hipotético

O mapa de uso e cobertura da terra para o cenário hipotético foi criado substituindo os usos incompatíveis com as APPs, ou seja, agricultura e pastagem, por áreas de vegetação natural. A Figura 42 demonstra como ficou o mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal de Uberaba para o cenário hipotético, em que as APPs foram reflorestadas.

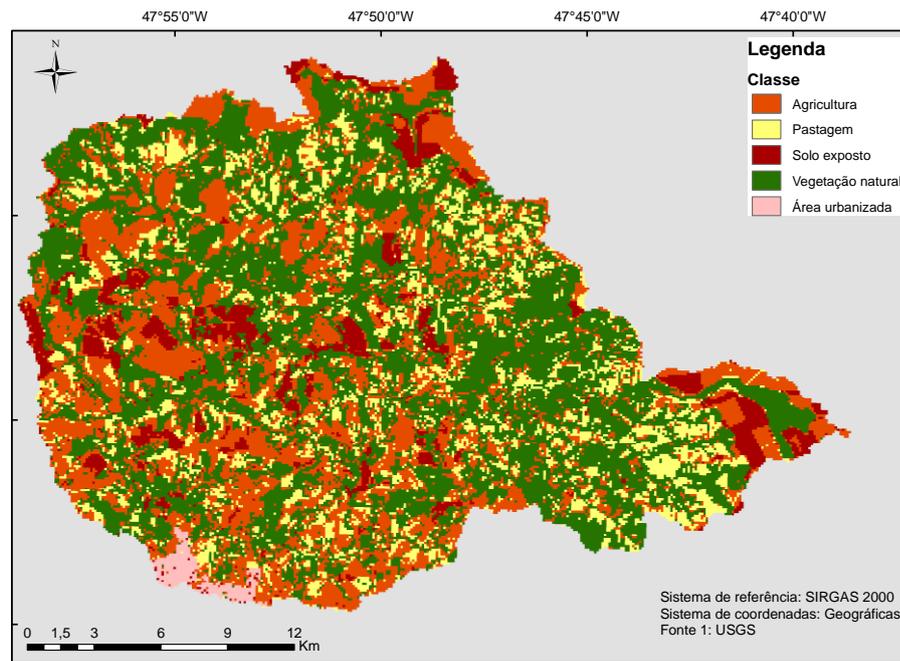


Figura 42 - Mapa de uso e cobertura da terra da APA municipal do rio Uberaba para o cenário hipotético
Fonte: A autora (2017)

Para cada classe foi calculado a área em km² e a porcentagem que cada classe representa dentro da APA municipal do rio Uberaba (Tabela 15).

Tabela 15 - Quantitativo das classes de uso e cobertura da terra para o cenário hipotético.

Classe	Área (Km ²)	Percentual
Vegetação natural	232,69	44,69%
Agricultura	162,65	31,24%
Pastagem	82,80	15,90%
Solo exposto	37,79	7,26%
Área urbana	4,69	0,90%
Soma	520,63	100,00%

De acordo com o mapa de uso e cobertura da terra gerado para o cenário hipotético, há um déficit de área de preservação permanente (APP) de 1,13%, cerca de 6 km². Esse resultado demonstra que estas áreas encontram-se antropizadas, sendo utilizadas possivelmente por agricultura e pastagem. A vegetação nativa presente nas matas ciliares visa minimizar o aporte de sedimentos para os leitos dos rios, sendo sua preservação imprescindível para manutenção da qualidade da água.

5.2 Dados de Saída do Modelo de Retenção de Sedimentos do Programa InVEST

Os dados de saída são salvos em uma pasta pré-definida especificada pelo usuário. Os resultados do modelo de retenção de sedimentos, que são de interesse para este estudo são apresentados a seguir.

- **Waterhed_results_sdr.shp**: tabela contendo valores biofísicos para cada bacia hidrográfica, com os seguintes campos:
 - ✓ **Sed_export** (toneladas/ano): quantidade total de sedimentos exportados para o corpo hídrico por bacia hidrográfica.
 - ✓ **Usle_tot** (toneladas/ano): quantidade total de perda potencial de solo em cada bacia calculada pela equação USLE.
 - ✓ **Sed_retention** (toneladas/ano): quantidade total de sedimentos retidos pela paisagem.

Na Tabela 16 está o resultado da modelagem realizada utilizando o programa InVEST 3.3.3, módulo retenção de sedimentos. Para fins de análise, neste estudo, o resultado *usle_tot* (ton/ano) foi dividido pela área de cada microbacia para ter o resultado das perdas de solo em ton/ha.ano. As microbacias denominadas de 1 a 35 apresentadas na Tabela 16 correspondem a área Restante, que são microbacias que representam menos de 1% da área APA municipal do rio Uberaba.

Tabela 16 - Resultado da modelagem do InVEST 3.3.3, módulo retenção de sedimentos

Microbacias	Área (ha)	sed_retent (ton/ano)	sed_export (ton/ano)	usle_tot (ton/ano)	Perda de solo (ton/ha.ano)
1	2094	137830	3560	111494	53
2	14	306	14	260	18
3	206	5934	145	5296	26
4	262	7676	113	6535	25
5	40	779	11	437	11
6	423	14653	683	17724	42
7	252	5135	77	5119	20
8	227	7077	387	15310	68
9	280	6947	348	13110	47
10	15	419	10	162	11
11	735	17404	1434	43161	59
12	162	30618	236	8661	53
13	239	7506	313	6521	27

14	627	12944	1399	49599	79
15	827	47824	3082	120635	146
16	828	19809	502	17445	21
17	34	711	30	1001	30
18	100	3455	54	1668	17
19	223	5742	292	11848	53
20	434	7397	263	11965	28
21	99	2883	106	3042	31
22	133	7976	116	3608	27
23	431	17593	436	16417	38
24	211	40174	384	12777	61
25	436	8448	380	14914	34
26	278	8523	45	2860	10
27	154	12682	242	5263	34
28	55	2699	19	535	10
29	34	3532	15	206	6
30	475	65635	489	18192	38
31	275	10011	408	9809	36
32	399	34307	232	13892	35
33	61	3296	86	1764	29
34	287	8437	149	6708	23
35	288	6129	156	9387	33
Água Santa	397	12277	197	8445	21
Alegria	1488	41788	1381	41804	28
Barreiro	1321	225042	1477	56805	43
Buracão	2968	677978	5925	198593	67
Da Vida	1494	290065	2547	91880	62
Inhame	552	21766	409	18906	34
Lageado	6690	162739	7112	198377	30
Lanhoso	2121	106886	7669	211234	100
Limo	923	22619	2128	46626	51
Mutum	855	46560	803	32762	38
Pintos	8381	803640	12338	401426	48
Sapocado	753	179575	2116	54774	73
Saudade	12481	1364900	18862	691106	55

Para fins de análise, a partir dos dados de saída foram gerados os mapas do potencial de perda de solo para o cenário atual (ano base 2016) e para o cenário hipotético, o mapa de exportação de sedimentos e o mapa de retenção de sedimentos.

O resultado da modelagem para as microbacias da APA municipal do rio Uberaba utilizando o modelo de retenção de sedimentos do programa InVEST 3.3.3 é apresentado no mapa de perdas de solos em ton/ha.ano na Figura 43.

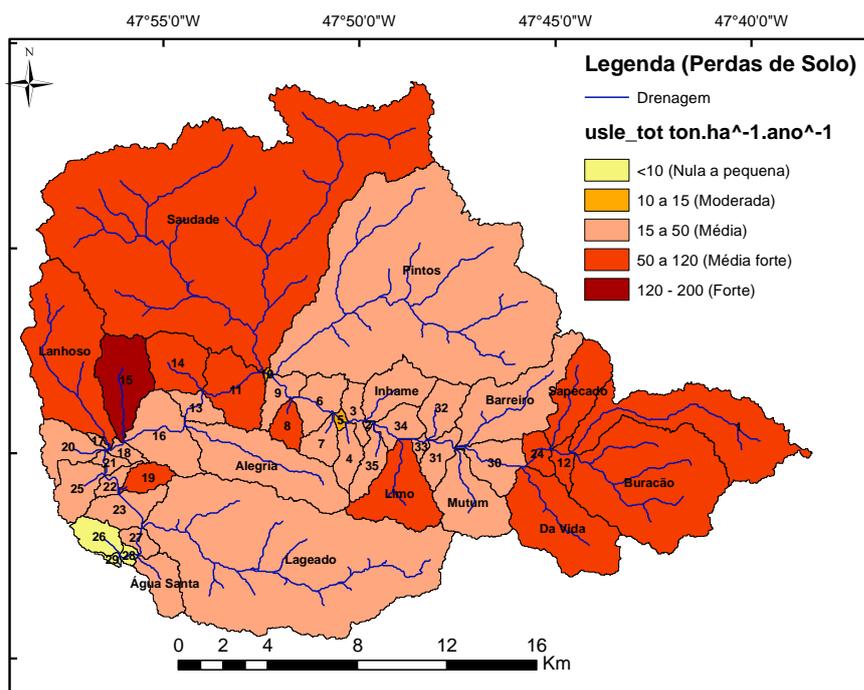


Figura 43 - Estimativa das perdas de solo em ton/ha.ano nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

Os percentuais de perda de solo são apresentados na Tabela 17 descrevendo os níveis de erosão conforme a classificação proposta por SILVA *et al.* (2003 *apud* VALLE JÚNIOR, 2008) e o potencial de perda de solo (colunas 1 e 2). Também são apresentados os resultados da modelagem por microbacia e o respectivo percentual (colunas 3 e 4).

Tabela 17 - Percentual de perda de solo por microbacia

Nível da erosão	Potencial de perda de solo (ton/ha.ano)	Microbacias	Percentual (%)
Nula a pequena	<10	26, 28 e 29	6,25%
Moderada	10 a 15	5 e 10	4,17%
Média	15 a 50	2, 3, 4, 6, 7, 9, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, Pintos, Barreiro, Mutum, Inhame, Lageado, Alegria e Água Santa	60,42%
Média forte	50 a 120	1, 8, 11, 12, 14, 19, 24, Lanhoso, Sapecado, Buracão, Da Vida, Saudade e Limo	27,08%
Forte	120 a 200	15	2,08%

Face aos objetivos deste trabalho foi gerado o mapa de retenção de sedimentos em ton/ano (Figura 47) e o mapa de exportação de sedimentos em ton/ano (Figura 48) para as microbacias da APA municipal do rio Uberaba.

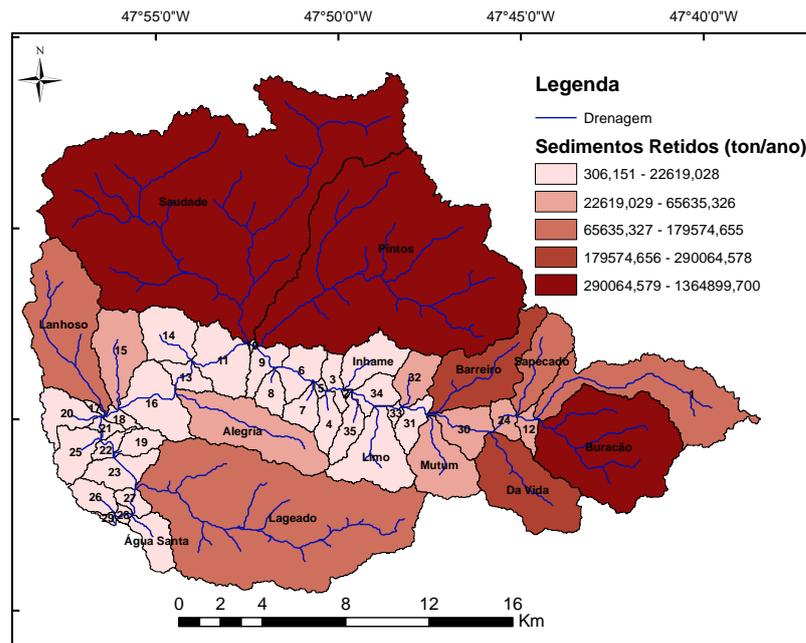


Figura 44 - Estimativa da retenção de sedimentos em ton/ano nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

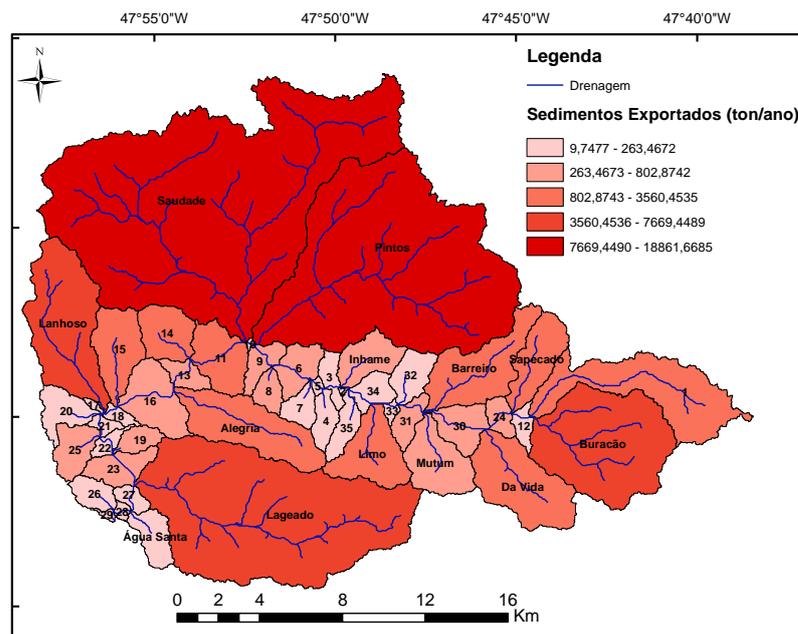


Figura 45 - Estimativa da exportação de sedimentos em ton/ano das microbacias para o rio Uberaba
Fonte: A autora (2017)

6 DISCUSSÃO DO RESULTADO DA MODELAGEM UTILIZANDO O MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS DO PROGRAMA INVEST

Na discussão buscou-se confrontar os resultados de saída do modelo com publicações conceituadas sobre a área de estudo, além de identificar os possíveis fatores que podem estar influenciando no resultado obtido.

Também será apresentada a comparação da modelagem de perdas de solo do cenário atual (ano base 2016) com a modelagem de perdas de solo do cenário hipotético, onde as áreas de preservação permanente foram recompostas, a fim de verificar qual o impacto que a vegetação natural exerce em relação ao aporte de sedimentos para os corpos hídricos.

6.1 Microbacias com as maiores estimativas de perdas de solo

Conforme apresentado na Tabela 17, a microbacia 15 foi a única que apresentou o nível da erosão classificada como forte. No resultado da modelagem apresentada na Tabela 16, a estimativa de perda de solo para essa microbacia foi de 146 ton/ ha.ano, valor 9 vezes acima da média de um terreno de um hectare desprovido de vegetação, que perde 16 ton/ ha.ano (BARRELA *et al.*,2009).

De acordo com o Zoneamento da APA municipal do Rio Uberaba apresentado por Mauro *et al.* (2015), a microbacia 15 é uma zona agropecuária, o que pode estar contribuindo para o elevado valor de perdas de solo é o uso da terra. Conforme o mapa de uso e cobertura da terra confeccionado para este trabalho (ano base 2016), cerca de 39% da microbacia é ocupada por agricultura e 21% de solo exposto (Figura 44).

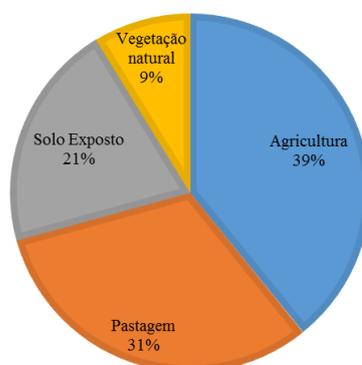


Figura 46 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego 15
Fonte: A autora (2017)

De acordo com Guerra (2012) a erosão pode ser intensificada quando a estação chuvosa ocorre no período em que os solos se encontram descobertos, ou por uma colheita anterior a essa estação, ou por um plantio recente. A adoção de práticas conservacionistas do uso do solo poderia contribuir para reduzir o valor de perdas de solo nesta microbacia.

Valle Júnior (2008) identificou que o período de plantio de grãos e estabelecimentos de culturas na bacia hidrográfica do rio Uberaba, ocorre principalmente entre os meses de outubro a dezembro. O plantio ocorre nos meses de dezembro e janeiro, sendo que nos meses de fevereiro a maio o solo apresenta a máxima cobertura e nos meses de maio a outubro ocorre a colheita, conforme apresentado na Figura 45.

A Figura 45 também apresenta os meses que ocorrem as maiores precipitações, sendo o período mais preocupante entre os meses de outubro a janeiro, em que está ocorrendo o preparo do solo e o plantio, que pode deixar solos mais vulneráveis à ação dos processos erosivos, já que está também apresenta neste mesmo período os maiores índices de erosividade.

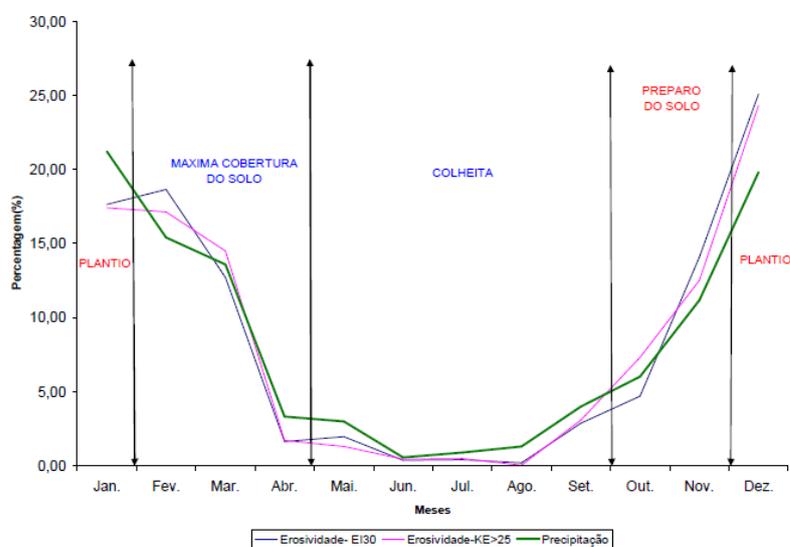


Figura 47 - Período de plantio de grãos e estabelecimentos de culturas na bacia hidrográfica do rio Uberaba
Fonte: Valle Junior (2008)

Considerando que cerca de 32% da APA municipal do rio Uberaba é ocupada por culturas e o fato do InVEST analisar somente o período de acordo com o uso e cobertura da terra da imagem de satélite escolhida, os valores estimados pelo programa InVEST podem estar subestimados. A fim de se obter resultados mais próximos da realidade, a modelagem poderia ser feita de acordo com o período de plantio de grãos e estabelecimentos de culturas.

Embora Torres *et al.* (2008) tenham constatado algumas práticas de manejo e conservação do solo (terraços e plantios em nível) e uma preocupação com a preservação das cabeceiras das nascentes na microbacia do córrego Lanhoso. Esta área apresentou a segunda maior estimativa de perda de solo em ton/ha.ano, a terceira que exporta mais sedimentos para o leito do rio Uberaba ocupando a nona posição quanto a retenção de sedimentos.

Um fator que pode estar contribuindo para este resultado são os tipos de solo, 58% da microbacia é composta por Latossolo e 42% composta por Argissolo, com destaque para os Argissolos que apresentam alta erodibilidade. Prado e Nóbrega (2005) ao estudarem as perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, verificaram que as maiores perdas de solo sob pastagem estão associadas às áreas com declividades superiores a 8% e independentemente da declividade onde ocorrem, nas áreas com ocorrência de Argissolos e Neossolos Quartzarênicos.

Torres *et al.* (2008) determinaram o Coeficiente de Rugosidade (RN)⁴ para a microbacia do córrego Lanhoso, constatando que a área tem aptidão apenas para florestas. No entanto, em visita de campo, os autores constataram que somente o terço superior possui características que evidenciam a necessidade deste uso, enquanto a porção mediana e inferior possibilita o uso agrícola. No Zoneamento da APA municipal do Rio Uberaba apresentado por Mauro *et al.* (2015) a área foi classificada como zona agropecuária.

O mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2016, demonstra que 40% da área da microbacia do córrego Lanhoso é ocupada por vegetação natural, 31% (agricultura), 18% (solo exposto) e 11% (pastagem) (Figura 46). Abdala (2005), encontrou valores diferentes, onde as pastagens nativas e/ou cultivadas correspondiam a 25% da área, culturas em desenvolvimento inicial a 13% e culturas anuais a 5% do total da área. O resultado obtido pelo mapa de uso e cobertura gerado para este trabalho demonstra que houve a substituição das atividades ligadas a bovinocultura pelas atividades ligadas às culturas, sejam elas anuais ou perenes.

⁴ Coeficiente de Rugosidade (RN): é a relação entre a densidade de drenagem e a declividade média da microbacia e indica o uso apropriado da área (TORRES *et al.*, 2008).

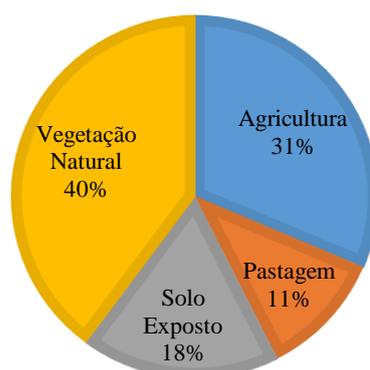


Figura 48 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego Lanhoso
Fonte: A autora (2017)

6.2 Microbacias com as maiores estimativas de retenção e exportação de sedimentos

Neste tópico optou-se por analisar os resultados da modelagem da retenção e exportação de sedimentos em conjunto, pois nos resultados as microbacias que mais exportam sedimentos também são as que mais retém.

A determinação das áreas que retém mais sedimentos tem auxiliado na valoração de pagamentos por serviços ambientais. A Organização Não Governamental (ONG) *The Nature Conservancy* (TNC) utilizou o modelo de retenção de sedimentos do InVEST no Sistema Cantareira para estimar os benefícios econômicos relacionados à redução do custo de tratamento de água e dragagem, após intervenções nas áreas. Neste estudo realizado pela TNC, em 2012, apresentado por João Guimarães, o custo evitado de dragagem foi de R\$ 4.690.650,00/ano e o custo evitado de tratamento, especificamente na eliminação de turbidez foi de R\$ 2.423.994,58/ano (TNC, 2012).

O serviço de retenção de sedimentos fornecido pela vegetação natural é de grande interesse para as companhias de água, pois compreender onde os sedimentos são produzidos e depositados permitem criar estratégias para reduzir as cargas de sedimentos exportadas para os leitos dos rios. As microbacias do Ribeirão Saudade e Córrego dos Pintos correspondem a 40% da área total da APA municipal do rio Uberaba e apresentaram respectivamente as maiores estimativas para retenção, 1.364.899,70 ton/ano e 803.639,9084 ton/ano. A vegetação natural dessas duas microbacias são as que têm contribuído mais para o fornecimento do serviço de retenção de sedimentos.

As microbacias do Ribeirão Saudade e Córrego dos Pintos também são responsáveis pelas maiores taxas de exportação de sedimentos, 18.861,66 ton/ano e 12.337,96 ton/ano, respectivamente.

De acordo com o coeficiente de rugosidade (RN) encontrado por Vieira *et al.* (2012) a microbacia do Ribeirão Saudade tem aptidão para a pecuária. No entanto, de acordo com o mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2016, o uso antrópico predominante nessa microbacia é a agricultura (34%). O restante da sua área é coberto por vegetação natural (46%), pastagem (14%) e 6% por solo exposto (Figura 49).

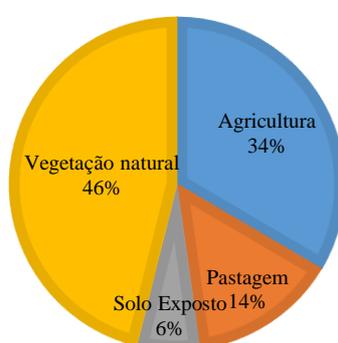


Figura 49 - Percentual do uso da terra na microbacia do Ribeirão Saudade
Fonte: A autora (2017)

Torres e Vieira (2013) identificaram que a microbacia dos Pintos tem aptidão para agricultura. De acordo com o mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2016, a microbacia dos Pintos apresenta 49% da sua área coberta por vegetação natural, 26% por agricultura, 19% por pastagem e 6% por solo exposto (Figura 50).

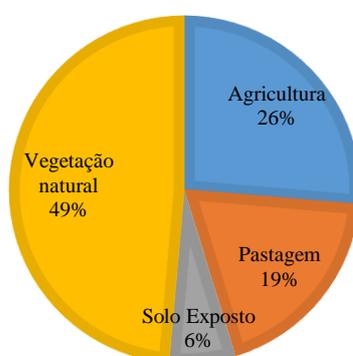


Figura 50 - Percentual do uso da terra na microbacia do córrego dos Pintos
Fonte: A autora (2017)

Gobbi *et al.* (2008) ao realizarem o diagnóstico ambiental do Córrego do Melo, um dos afluentes do córrego dos Pintos, identificaram que a atividade da maioria das propriedades rurais é a pecuária leiteira. No entanto, apesar das pastagens terem sido formadas, estas encontram-se mal conservadas ou degradadas, e bastante deterioradas por erosões, diminuindo assim a produtividade.

Ainda de acordo com Gobbi *et al.* (2008), os autores identificaram processos erosivos em diferentes estágios em todas as propriedades visitadas, desde sulcos pequenos, médios e profundos e várias voçorocas, principalmente devido ao acúmulo e liberação de água em um único ponto, em decorrência da linha de trem. Tal fato têm contribuído para o assoreamento e diminuição do volume de água do córrego do Melo. Além desses fatores, foi constatado gradagens em áreas declivosa e desmatamento e presença de gado em áreas de preservação permanente.

6.3 Comparação da Estimativa das Perdas de Solo para o Cenário Hipotético em relação ao Cenário Atual

Na Tabela 18 está o resultado da modelagem realizada utilizando o programa InVEST 3.3.3, módulo retenção de sedimentos para as microbacias que compõem APA municipal do rio Uberaba para o cenário hipotético.

Tabela 18 - Estimativa das perdas de solo para o cenário atual e para o cenário hipotético

Microbacias	Área (ha)	usle_tot	
		Cenário para 2016 (ton/ano)	Cenário hipotético (ton/ano)
1	2093,9761	111494	22724
2	14,4087	260	76
3	205,8786	5296	2221
4	262,4051	6535	2713
5	39,8087	437	653
6	423,4873	17724	2190
7	251,968	5119	3166
8	226,568	15310	1249
9	279,7695	13110	2756
10	15,3324	162	31
11	735,1222	43161	3629
12	162,0982	8661	10701
13	239,4066	6521	610
14	626,5949	49599	3321

15	826,5622	120635	8890
16	827,9477	17445	4536
17	33,8051	1001	110
18	100,1222	1668	769
19	223,3353	11848	1121
20	434,1071	11965	2322
21	99,1985	3042	1236
22	132,9113	3608	1561
23	430,784	16417	1826
24	211,1433	12777	14060
25	435,5862	14914	2415
26	277,7368	2860	1313
27	153,9702	5263	1503
28	55,3255	535	579
29	34,4512	206	53
30	474,9338	18192	13018
31	274,8742	9809	2941
32	398,5491	13892	7148
33	61,2371	1764	474
34	286,9738	6708	2550
35	288,2669	9387	2391
Água Santa	396,5171	8445	42745
Alegria	1488,3477	41804	14034
Barreiro	1320,9848	56805	49321
Buracão	2968,2902	198593	229257
Da Vida	1493,52	91880	70397
Inhame	551,688	18906	6419
Lageado	6689,8983	198377	93552
Lanhoso	2121,131	211234	18475
Limo	923,1746	46626	7166
Mutum	855,3797	32762	10675
Pintos	8380,5224	401426	228213
Sapecado	752,5789	54774	57263
Saudade	12481,0061	691106	304618
Total	52061,6846	2620062	1258990

De acordo com a modelagem do programa InVEST, o total de sedimentos estimados pelas microbacias que compõem a APA municipal do rio Uberaba em 2016 foi de 2.620.062 ton/ano e para o cenário futuro foi de 1.258.989 ton/ano. Esse resultado indica que a recuperação de cerca de 6 km² de APPs pode reduzir a geração de sedimentos em 48%.

Zanella (2016) utilizou o InVEST para modelar as perdas de solo na bacia contribuinte da PCH Costa Rica em Mato Grosso do Sul, para o cenário atual e para um cenário futuro, em que as APPs foram reflorestadas. Os resultados da modelagem obtidos pelo

autor, demonstraram que ao realizar a recomposição vegetal de uma área de 13,78 km² de APPs, gerou uma redução de 6.464,99 ton/ano de sedimentos em relação à perda de solo total obtida no cenário atual.

Além da recomposição florestal das APPS, ações como o plantio direto, que é uma tecnologia conservacionista, poderiam ser adotadas a fim de minimizar as perdas de solo em áreas descobertas.

Apesar dos benefícios apresentados pela ação de reflorestamento das APPs, principalmente em relação à diminuição das perdas de solo, cabe ressaltar que um programa de PSA deve ser implementado levando em consideração as relações socioecológicas locais. Assim, deve ser feito um intenso trabalho de educação ambiental com os produtores rurais a fim de se afastar a cultura de que é pagando que se preserva, uma das preocupações de vários estudiosos, que podem levar ao fracasso dos programas de PSA.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O InVEST é uma importante ferramenta para criação de cenários, em que, através da modelagem é possível estimar os serviços ambientais, como por exemplo o controle da erosão, quando se adota ações conservacionistas e a recomposição florestal das APPs. A modelagem para o cenário hipotético, em as APPs se encontram reflorestadas, houve uma redução de 48% de perdas de solo nas microbacias da APA municipal do rio Uberaba. Assim, neste estudo foi possível demonstrar quantitativamente as perdas de solo que poderiam ser evitadas com a recomposição das APPs, representando a importância que a vegetação ripária exerce na provisão dos serviços ambientais de controle da erosão e qualidade da água.

Apesar das microbacias do Ribeirão Saudade e Córrego dos Pintos apresentarem as maiores estimativas de exportação de sedimentos, elas também apresentam as maiores estimativas de retenção de sedimentos, fato que pode estar relacionado à representatividade da área das duas microbacias, cerca de 40%, na APA municipal do rio Uberaba. Por estes fatores, estas microbacias não foram consideradas prioritárias para a implantação de ações de recuperação das áreas de preservação permanente.

Neste trabalho, a microbacia do Córrego Lanhoso foi considerada, uma área crítica, necessitando prioritariamente da implantação de ações de recuperação das áreas de preservação permanente e práticas conservacionistas do uso e manejo do solo, pois apesar da sua área ocupar cerca e 4% da área total da APA municipal do rio Uberaba, essa microbacia apresentou a segunda maior estimativa de perda de solo em ton/ha.ano e a terceira que exporta mais sedimentos para o leito do rio Uberaba. De acordo com o resultado da modelagem do cenário hipotético, com a recomposição das APPs haveria uma redução de 14% nas perdas de solo nessa microbacia. Outro fator que demanda atenção é que 42% dessa microbacia é composta por Argissolo, que possui alta erodibilidade. De acordo com Conceição (2014) para monitoramento da qualidade da água, a análise da exportação de sedimentos total de cada microbacia é a que deve ser levada em consideração para priorizar ações.

Considerando que as perdas de solo anuais podem variar muito de acordo com os valores do uso e o manejo dos solos (fator C) e que esses valores variam de acordo com o período do ano e com a estação climática (PRADO e NÓBREGA, 2005). Além disso, cerca de 32% da APA municipal do rio Uberaba é ocupada por culturas tem o fato do InVEST analisar somente o período de acordo com o uso e cobertura da terra baseado na imagem de

satélite escolhida, ou seja, não quantifica as perdas de solo sazonalmente, isto é, os valores estimados pelo programa InVEST podem estar subestimados.

Em estudos futuros o cruzamento dos resultados obtidos através da modelagem utilizando o InVEST com o mapa de risco de erosão podem auxiliar no planejamento e na tomada de decisões, além de confrontar os resultados obtidos pelo modelo.

REFERÊNCIAS

ABDALA, V. L.; NISHIYAMA, L.; TORRES, J. L. R. Uso do solo e cobertura vegetal na bacia do alto curso do rio Uberaba, Triângulo Mineiro, Sudeste do Brasil. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 12, n. 37, p. 258–267, 2011.

ABDALA, V. L.; TORRES, J. L. R.; BARRETO, A. C. Análise hidrológica das nascentes do alto curso do rio Uberaba. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 10, p. 171–183, 2009.

ABDALA, V.A; **Zoneamento Ambiental da Bacia do Alto Curso do rio Uberaba - MG como subsidio para Gestão do Recurso Hídrico Superficial**. 87f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Pós- Graduação em Geografia, Uberlândia. 2005.

ALARCON, G.G. É pagando que se preserva? Limitações e oportunidades do pagamento por serviços ambientais como instrumento de conservação de recursos florestais no corredor ecológico Chapecó, Santa Catarina. 244f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Manual Operativo do Programa Produtor de Água / Agência Nacional de Águas**. 2ª Edição. Brasília: ANA, 2012.84 p.

BARRELLA, W. PELTRERE JR., M.; SMITH, W.S.; MONTAG, L. F. A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. (Editores). **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. 2 ed. 2 reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, Fapesp, 2009. 187-207.

BRASIL. Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008. Institui, no âmbito do Poder Executivo federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.

CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M. Estudo da erosividade e espacialização dos dados com técnicas de geoprocessamento na carta topográfica de Morrinhos-Goiás / Brasil para o período de 1971 a 2000. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geografica**, nº 5, p. 1-18, 2005.

CÂNDIDO, H. G.; GALBIATTI, J. A.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V. Degradação ambiental na bacia hidrográfica do rio Uberaba: uma abordagem metodológica. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 179–192, 2010.

CARDOSO, D. J.; GARRASTAZU, M. C.; LACERDA, A. E. B.; HIGA, R. C. V.; ROSOT, M. A. D. Avaliação das variáveis e disponibilidade de informações do modelo de estoque de carbono do aplicativo InVEST. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, Curitiba. **Anais...**, 2012. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/66929/1/Denise-CFP_Avaliacao.pdf>. Acesso em: 04 out. 2015.

CARVALHO, A. R. **Avaliação da qualidade da água e da interação entre o ecossistema terrestre em dois afluentes do rio Jacaré-guaçu, na APA Corumbataí (Itirapina/SP)**. 114f. Dissertação (Mestrado). USP-EESC-CRHEA, 1993.

CASTANHARI, L. C. M.; GARRASTAZU, M. C.; ROSOT, M. A. D. Modelagem de carbono utilizando a ferramenta InVest. Anais X Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas. Anais...Colombo: 2011

CODAU – Centro Operacional de Desenvolvimento e Saneamento de Uberaba. **Projeto Água Viva – Relatório de Avaliação Ambiental**. Uberaba, Brasil, 2005, 416 p.

COHEN, J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37-46, 1960.

CONCEIÇÃO, J. R. **Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná: Estudo de caso do Passaúna**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado profissional) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, SENAI –PR, Universitat Stuttgart, Curitiba, 2014.

CRUZ, J. C.; VIANA, J. H. M.; ALVARENGA, R. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; SANTANA, D. P.; PEREIRA, F. T. F.; HERNAN, L. C. Cultivo do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo**. 2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/mandireto.htm>. Acesso em: 15 jun. 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 1999. 256p.

DINIZ, J. A. F. Geografia da agricultura. São Paulo: DIFEL, 1984. 278 p.

FARLEY, J.; COSTANZA, R. Payments for ecosystem services: From local to global. **Ecological Economics**, v. 69, n. 11, p. 2060–2068, 2010.

FARIA, M. M.; SOUZA, L. T. FERNANDES FILHO, E. I.; FRANCELINO, M. R. Avaliação da influência do número de amostras de treinamento no índice Kappa. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** 2015.

FARLEY, J.; COSTANZA, R. Payments for ecosystem services: From local to global. **Ecological Economics**, v. 69, n. 11, p. 2060–2068, 2010.

FERNANDES, S. C. S. **Análise da evolução da ocupação e uso do solo: aplicação com base num SIG para o Parque Nacional Peneda-Gerês**. 137f. Relatório Final (Curso Licenciatura em Engenharia do Ambiente e dos Recursos Rurais). Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, 2006.

FERRARO, P. J. The Future of Payments for Environmental Services. **Conservation Biology**, v. 25, n. 6, p. 1134–1138, 2011.

FONSECA, A.C. Geoquímica dos Solos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Organizadores). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 7 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012, 165-194.

FRANCISCO, C. N. **Conceitos de Geoprocessamento**. Disponível em: <file:///C:/Users/Aline/Desktop/Conceitos%20Geoprocessamento%20(1).pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

GALDINO, S. **Estimativa da perda de terra sob pastagens cultivadas em solos arenosos da bacia hidrográfica do Alto Taquari – MS/MT**. 115 f. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade de Campinas, 2012.

GALPARSORO, L. U. I.; FERNÁNDEZ, P. S. Medidas de concordancia: el índice de Kappa. *Cadernos de Atención Primaria* 1999; 6: 169- 171.

GARCIA, J. R.; ROMEIRO, A. R. Valoração e Cobrança pelo Uso da Água: uma abordagem. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 34, n. 124, p. 101–121, 2013.

GARRASTAZU, M. C.; AUGUSTA, M.; ROSOT, D. Uso do gvSIG como apoio a mapeamentos de solos. In: JORNADAS BRASILEIRAS DE gvSIG, 3., 2012, São Paulo. **Anais eletrônicos...**2012. Disponível em: <

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/72127/1/2012-Marilice-JBgvSIG-Uso.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

GOBBI, G. A. F.; TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J. Diagnóstico ambiental da microbacia do Córrego do Melo em Uberaba (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, p. 206 – 223, 2008.

GOLDSTEIN, J. H. et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 19, p. 7565–7570, 23 abr. 2012.

GÓMEZ, J. D. P. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo o território Brasileiro**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 2012.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Editores). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. 17-50.

GUGLIELMELI, A. C. O. **Análise multitemporal do grau de antropização da Área de Proteção Ambiental Municipal do rio Uberaba – Uberaba/MG**. Monografia (Especialização), Escola Nacional de Ciências Estatísticas, 2017.

GUGLIELMELI, A. C. O.; SOUZA, A. C. M.; SOUZA, V. A. S.; LAGE, A. A. A. Avaliação da qualidade da água em trecho do alto curso do rio Uberaba – Uberaba/MG. In: XIII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, Poços de Caldas, 2016. **Anais...** Disponível em: < <http://www.meioambientepocos.com.br/anais-2016/index.php>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

GUSWA, A. J.; BRAUMAN, K. A.; BROWN, C.; HAMEL, P.; KEELER, B. S.; SAYRE. Ecosystem services: Challenges and opportunities for hydrologic modeling to support decision making. **Water Resources Research**, Res., 50, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 2013/Rio de Janeiro: 2013.171p.

INMET / BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Estação Uberaba - MG (OMM: 83577). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

JARDIM, M. H. Pagamentos Por Serviços Ambientais Na Gestão De Recursos Hídricos: O Caso Do Município De Extrema - MG Pagamentos Por Serviços Ambientais Na Gestão De Recursos Hídricos : O Caso Do Município De Extrema - MG. 2010.

JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de área degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. (Editores). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 7-28.

LIMA, L. T. **A paisagem costeira do Rio Grande do Sul: Leitura e interpretação das propriedades fisionômicas do espaço como estratégia de planejamento e gestão do território**. 163 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Programa de pós-graduação em gerenciamento costeiro, 2014.

MATOS, T. V. S. **Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)**. 116 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2015.

MAURO, L. M.; CASTRO, K. J. S. X.; CAMPOS, I. C. C. RODRIGUES, N. U. A. VALERA, C. A. Desafios na delimitação do zoneamento da Área de Proteção Ambiental do rio Uberaba (Uberaba/MG). In: I SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ÁGUAS, SOLOS E GEOTECNOLOGIAS - SASGEO – 2015, Uberaba.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação. SCARIOT, A.; SILVA, J. C. S.; FELFILI, J. M. (Org.). Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/publicacoes/biomas/category/62-cerrado>>. Acesso em: 09 fev. 2017.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC: Island Press, 2003. 245 p. Disponível em: <http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf>. Acesso em: 09 maio 2017.

MONTALVÃO, M. T. L. **Modelagem dos serviços hidroambientais resultantes de práticas conservacionistas na bacia do córrego Taquara – DF**. 68f. Trabalho Final. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, 2016.

MOREIRA, M. C.; PRUSKI, F.F. OLIVEIRA, T. E. C.; PINTO, F. A. C, SILVA, D. D. NetErosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1349-1353, 2008.

MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL, U.; KOSOY, N.; MAY, P. H. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1202–1208, 2010.

NASCIMENTO, A. T. P.; PEREIRA, B.S.; MEDEIROS, P. H. A. Revisão dos valores do fator de cobertura vegetal da USLE para condições brasileiras. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDEIMENTOS, 2014, João Pessoa. **Anais...** 2014.

NETO, J. C. P.; COSTA, J. O. Caracterização química e física dos murundus da nascente do rio Uberaba. **FAZU em Revista**, Uberaba, n.7, p. 27- 31, 2010.

NUSDEO, A. M. O. **Pagamento por Serviços Ambientais: Sustentabilidade e Disciplina Jurídica**. São Paulo: Atlas, 2012.

OLIVEIRA, M.S.M. **Rio Uberaba: quando os desgastes ambientais refletem os desgastes sociais**. 176 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

PADOVEZI, A.; AUGUSTO, R.; VIANI, G.; KUBOTA, U.; ARELLO, D. T.; FARIA, M.; BRACALE, H.; FERRARI, V. CARVALHO, F. H. Produtor de água na bacia hidrográfica Piracicaba/Capivari/Jundiaí. In: (Organização) PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2012.

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. Pagamentos por serviços ambientais. In: (Organização) PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2012.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Florestas Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Brasília, DF 2015.

PEREIRA, P. H. Projeto conservador das águas – Extrema. In: (Organização) PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2012.

PEREVOCHTCHIKOVA, M.; TAMAYO, A. M. O. Avances y limitantes del programa de pago por servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2009. **Revi. Mex.Cienc.For**, v. 3, n. 10, p. 89–112, 2012.

PRADO, J. P. B.; NOBREGA, M. T. Determinação de perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, com aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS). **Acta Sci. Technol.** v. 27, n. 1, p. 33-42, 2005.

QUINTERO, M. Servicios ambientales hidrológicos en la Región Andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales. Lima, IEP; CONDESAN, 2010. (Agua y Sociedad, 12; Serie Panorama Andino.

RABELLO, T. S. **Avaliação da efetividade da conservação da cobertura vegetal do Parque Nacional da Serra da Bocaina através do sensoriamento remoto.** 164f. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Escola Nacional de Botânica Tropical, Mestrado Profissional em Biodiversidade em Unidades de Conservação, 2016.

SAAD, S. I. et al. Avaliação do modelo Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs para o sistema Cantareira: módulos de hidrologia e de perda de sedimentos. In: **XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 2011, Maceió. Anais eletrônicos...2011.** Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/67bd0df97b4670702e805d47bd5c37db_7a2c9f02db398099f4ce3ef555308daa.pdf>. Acesso em: 17 ago.2015.

SHARP, R., TALLIS, H.T., RICKETTS, T., GUERRY, A.D., WOOD, S.A., CHAPLIN-KRAMER, R., NELSON, E., ENNAANAY, D., WOLNY, S., OLWERO, N., VIGERSTOL, K., PENNINGTON, D., MENDOZA, G., AUKEMA, J., FOSTER, J., FORREST, J., CAMERON, D., ARKEMA, K., LONSDORF, E., KENNEDY, C., VERUTES, G., KIM, C.K., GUANNEL, G., PAPENFUS, M., TOFT, J., MARSIK, M., BERNHARDT, J., GRIFFIN, R., GLOWINSKI, K., CHAUMONT, N., PERELMAN, A., LACAYO, M. MANDLE, L., HAMEL, P., VOGL, A.L., ROGERS, L., BIERBOWER, W., DENU, D., AND DOUGLASS, J. 2016. **InVEST +VERSION+ User's Guide.** The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

SIMÃO, P.; MORAES, A. **Mapeamento de uso e ocupação de solo.** Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2009/07/09/mapeamento-de-uso-e-ocupacao-do-solo/>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

SIMÕES, M. S. **Pagamentos por serviços ambientais sob uma ótica econômico-ecológica e institucionalista: reconciliando teoria e prática.** 237f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2014.

SILVA, W. C. Viabilidade econômica do Pagamento por Serviços Ambientais no Estado do Amapá utilizando análise de risco. 106f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental e Políticas Públicas, Universidade Federal do Amapá, 2011.

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B.B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Eng. Agrícola**, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev. 2010.

SOUZA, J. R.; REIS, L. N. G.; PETRONZIO, J. A. C. Espacialização das áreas de cana-de-açúcar no município de Uberaba – MG por meio de técnicas de sensoriamento remoto. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, Porto Alegre, 2010. **Anais...XVI ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS**, Porto Alegre, 2010.

THOMPSON, D.; FIDALGO, E.C.C. Estimativa da perda de solos por meio da equação universal de perdas de solos (USLE) com uso do InVEST para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu – RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 2013, Bento Gonçalves. Anais eletrônicos...2013. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/97697/1/Thompson-e-Fidalgo.pdf>>. Acesso em: 17 ago.2015.

TNC. **Aplicação da ferramenta Invest para identificação de Áreas de Risco de Contaminação no âmbito do Plano de Segurança da Água**. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/COALIAR/CTPLAN/gt_psa/5a_reuniao/Invest_Plano_Seguranca_Agua_13_12_2012.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2016.

TORRES, J. L.; VIEIRA, D. M. S. Análise socioeconômica, ambiental e morfológica da microbacia do Córrego dos Pintos, afluente do rio Uberaba. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.16; p. 243-258, 2013.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, J. A.; SILVA, A. L.; PESSOA, E. J.; SILVA, E. C.; RESENDE, E. F. Diagnóstico ambiental e análise morfométrica da microbacia do córrego Lanhoso em Uberaba – MG. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 25, p.1- 11. 2008.

UBERABA. **Diagnóstico Ambiental APA – Rio Uberaba**. Secretaria de Meio Ambiente. Uberaba, Brasil, set. 2004. 127 p.

UBERABA. **Plano de Manejo da APA do Rio Uberaba**. Secretaria de Meio Ambiente. Uberaba, Brasil, set. 2004. 112 p.

UBERABA. **Plano de Manejo da APA do Rio Uberaba**. Secretaria de Meio Ambiente. Uberaba, Brasil, set. 2012. 155 p.

UBERABA. Lei nº 9.892 de 28 de dezembro de 2005. Cria a Área de Proteção Ambiental Municipal de Uberaba - APA do Rio Uberaba - e dá outras providências.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>. Acesso em: 02 abr. 2017

UNIVERSIDADE STANFORD. Ferramenta computacional. Software InVEST® versão 3.3.3, Stanford, CA. 2013. Home page. Disponível em: <<http://naturalcapitalproject.org/download.html>>>. Acesso em: 11/06/2015.

VALLE JUNIOR, R. F. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba**. 222f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2008.

VIEIRA, D. M. S.; TORRES, J. L. R.; BARRETO, A. C.; CUNHA, M. A. Avaliação quantitativa das características geomorfológicas das microbacias hidrográficas que compõem a Área de Proteção Ambiental do rio Uberaba. **Irriga**, v. 17, n. 3, p. 313 - 326, 2012.

VILLAS BÔAS, C.P. Água: conservando nossa fonte de vida. Disponível em: <<http://www.nature.org/media/brasil/agua.pdf>>. Acesso em: 04 out.2015.

WUNDER, S. When payments for environmental services will work for conservation. **Conservation Letters**, v. 6, n. 4, p. 230–237, 2013.

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

ZOLIN, C. A. **Análise e otimização de projetos de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) – o caso do município de Extrema, MG**. 130f. Tese (doutorado) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2010.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosin losses a guide to conservation planning**. Washington, USDA, 1978.