

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
UNIVERSIDADE DE STUTTGART
SENAI/PR**

JOSÉ ROBERTO DA CONCEIÇÃO

**METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA
REDUÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA EM BACIAS DE MANANCIAS DE
ABASTECIMENTO PÚBLICO DO PARANÁ:
Estudo de Caso Bacia do Passaúna**

CURITIBA

2014

JOSÉ ROBERTO DA CONCEIÇÃO

**METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA
REDUÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA EM BACIAS DE MANANCIAIS DE
ABASTECIMENTO PÚBLICO DO PARANÁ:
Estudo de Caso Bacia do Passaúna**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Prof.^a, Dr.^a. Karen Juliana do Amaral.

CURITIBA

2014

Conceição, José Roberto da

Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná / José Roberto da Conceição. – Curitiba, 2014

94 f. : il.; tabs. + mapas

Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, SENAI – PR, Universität Stuttgart.

Orientadora: Karen Juliana do Amaral

Bibliografia: p.83-89

1. Sistemas de informação geográfica. 2. Modelos matemáticos.
I. Amaral, Karen Juliana. II. Título.

CDD: 910.0285

TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ ROBERTO DA CONCEIÇÃO

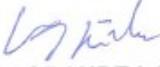
**METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS
PRIORITÁRIAS PARA REDUÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA EM
BACIAIS DE MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DO
PARANÁ: ESTUDO DE CASO BACIA DO PÁSSAÚNA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI/PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Profª. Drª. **KAREN JULIANA DO AMARAL**
PPGMAUI/ Universidade de Stuttgart


Profª. Drª. **MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI**
PPGMAUI/ UFPR


Profª. Drª. **MARIE LUISE CAROLINA BARTZ**
Universidade Positivo


Profª. Drª. **MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE**
Coordenadora do PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 26 de agosto de 2014.

À Kátia, minha esposa, minha filha Isabela e toda minha família,
pelo incentivo e apoio em todos os momentos.
Dedico este trabalho a vocês por compartilharem comigo esta conquista.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná – UFPR, *Universität Stuttgart* - Alemanha e ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI/PR pelo projeto em parceria, de padrão internacional, que possibilitou a aquisição de conhecimentos técnicos e científicos, e o intercâmbio educacional realizado com a *Universität Stuttgart*, Alemanha.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial – PPGMAUI – pela oportunidade de realização deste curso.

À Profª Drª. Karen Juliana do Amaral pela orientação.

À SANEPAR, pelo fornecimento de dados e por permitir o desenvolvimento deste trabalho.

Às instituições AGUASPARANÁ, IAPAR, IPPUC, ITCG, SEDU, pelo fornecimento dos dados.

Ao amigo João Luis Bittencourt Guimarães, pelo apoio no aprendizado do *software* InVEST®.

Aos colegas de curso e aos colegas da SANEPAR pelo incentivo.

À minha família, pela compreensão durante esta jornada.

RESUMO

Diversos fatores podem diminuir a qualidade e quantidade da água de um manancial, dentre os principais podem ser citados o manejo inadequado do solo e o avanço de áreas urbanas sem planejamento sobre as bacias destes corpos hídricos. No Paraná, as bacias de mananciais de abastecimento público possuem a maior parte de suas áreas localizadas em zonas rurais, o que torna primordial a adequação do uso do solo agrícola, juntamente com a preservação, conservação e recuperação ambiental de áreas florestais. Em áreas rurais, a erosão é uma das principais causas da perda do potencial hídrico e da qualidade da água, que pode ser agravada pela ação antrópica. Este trabalho apresenta uma metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução e controle da erosão hídrica em bacias de mananciais. A metodologia desenvolvida utilizou a ferramenta de modelagem ambiental InVEST® (*Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs*), baseada na Equação Universal de Perda de Solos, estima o potencial de perda de solo, a exportação e retenção de sedimentos em uma bacia hidrográfica. A utilização da ferramenta InVEST® foi executada dentro de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e requer a inserção de dados georreferenciados. Os dados de entrada, tais como delimitação da bacia, hidrografia, modelo digital do terreno, mapa de solos, mapa de uso e cobertura da terra, mapa de erosividade das chuvas e erodibilidade dos solos, foram obtidos para todo o estado do Paraná, possibilitando que a metodologia proposta possa ser aplicada em qualquer bacia de manancial do estado. A metodologia desenvolvida foi aplicada na bacia do rio Passaúna, apresentada na forma de um manual, desde a instalação e configuração do programa, passando pela obtenção e tratamento dos dados de entrada até às análises e simulações realizadas, levando à identificação de áreas prioritárias para redução e controle da erosão hídrica dentro da bacia. Os resultados da modelagem matemática da Bacia do Passaúna foram coerentes e serviram para uma primeira aproximação da estimativa do potencial de perda de solo e da exportação de sedimentos para o corpo hídrico. Também foi possível identificar a sub-bacia que mais exporta sedimentos para o reservatório e que, conseqüentemente, é a prioritária para ações de controle da erosão hídrica.

Palavras-chave: Sistema de Informações Geográficas. Modelagem Matemática. Perda de Solo. USLE. InVEST®.

ABSTRACT

Several factors can reduce the quality and quantity of water from a spring, among the principal may be mentioned the inadequate soil management and the advancement of urban areas over fountainhead of these bodies of water without planning. In Paraná, the basins of the public supply of drinking water have most of their fields located in rural areas, which makes primordial the suitability of agricultural land use, together with the preservation, conservation and rehabilitation of forest areas. In rural areas, erosion is a major cause of hydric potential loss and water quality, which can be aggravated by anthropic action. This paper presents a methodology for identifying priority areas for reduction and control of erosion in fountainhead basins. The methodology developed used the environmental modeling tool InVEST® (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs), based on Equation Universal Soil Loss, it estimates the potential for soil loss, the exportation and retention of sediments into a basin. The use of InVEST® tool was performed within a Geographic Information System (GIS) and it requires the inclusion of geo-referenced data. The input data, such as the basin boundary, hydrography, digital terrain model, soil map, use map and land cover, the rainfall erosion and soil erosion map was obtained for the entire state of Paraná, enabling that the proposed methodology can be applied to any watershed basin in the state. The methodology developed was applied in Passaúna River basin, presented in the form of a manual, from installation and configuration program, going through the gathering and processing of the input data until the analysis and simulations performed, leading to the identification of priority areas for reducing and controlling of water erosion within the basin. The results of mathematical modeling of Passaúna Basin were consistent and provided a first estimate approximation of the potential soil loss and sediment export to the body of water. It was also possible to identify the sub-basin which exports more sediment to the reservoir and therefore it is a priority for actions to control water erosion.

Keywords: Geographic Information System. Mathematical Modeling. Soil Loss. USLE. InVEST®.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – BACIA DE MANANCIAL RIO PIAVA.....	17
FIGURA 2 – CAPTAÇÃO DO RIO JORDÃO.....	18
FIGURA 3 – CAPTAÇÃO DO RIO PIAVA	18
FIGURA 4 – CAPTAÇÃO DO RIO NATUREZA	18
FIGURA 5 – CAPTAÇÃO DO RIO PASSAÚNA	18
FIGURA 6 – BACIAS DE MANANCIAIS DO PARANÁ.....	19
FIGURA 7 – PROBLEMAS E CONSEQUÊNCIAS PARA O ABASTECIMENTO PÚBLICO.....	20
FIGURA 8 – PROCESSO AVANÇADO DE EROÇÃO ÀS MARGENS DA REPRESA DO IRAÍ	21
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DOS PROBLEMAS CAUSADOS PELA EROÇÃO	23
FIGURA 10 – FASES DA EROÇÃO HÍDRICA	26
FIGURA 11 – FATORES DA USLE E SUAS CORRELAÇÕES.....	27
FIGURA 12 – BASE TEÓRICA DA USLE	35
FIGURA 13 – IMAGEM AÉREA.....	37
FIGURA 14 – IMAGEM DE SATÉLITE.....	37
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO EM FORMATO VETORIAL DE UMA IMAGEM ...	38
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO EM FORMATO RASTER DE UMA IMAGEM.....	38
FIGURA 17 – PASSOS METODOLÓGICOS DO ESTUDO	45
FIGURA 18 – VISUALIZAÇÃO DO MDT DE UMA BACIA DE MANANCIAL.....	49
FIGURA 19 - IMAGEM DE SATÉLITE SPOT-5 (A) E SEU RESPECTIVO USO DO SOLO (B)	50
FIGURA 20 – CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	51
FIGURA 21 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PASSAÚNA.....	53
FIGURA 22 – TABELA DE ATRIBUTOS DA BACIA	58
FIGURA 23– TABELA DE ATRIBUTOS DAS SUB-BACIAS	58
FIGURA 24 – MAPA DA BACIA DO PASSAÚNA E SUAS SUB-BACIAS.....	59
FIGURA 25 – MAPA DE EROSIVIDADE DO PARANÁ.....	60
FIGURA 26 – MAPA DE EROSIVIDADE DA BACIA DO PASSAÚNA.....	61
FIGURA 27 - MAPA DE SOLOS DO PARANÁ.....	62

FIGURA 28 – TABELA DE ATRIBUTOS DO <i>SHAPEFILE</i> TIPO DE SOLO.....	63
FIGURA 29 – MAPA DE SOLOS DA BACIA DO PASSAÚNA.....	64
FIGURA 30 – MDT DA BACIA DO PASSAÚNA	65
FIGURA 31 – TABELA COM CÓDIGO NUMÉRICO PARA CLASSE DE SOLO	66
FIGURA 32 – MAPA DE USO DO SOLO DA BACIA DO PASSAÚNA.....	67
FIGURA 33 – VISUALIZAÇÃO DA SELEÇÃO DO MODELO DE PERDA DE SOLO .	70
FIGURA 34 – INSERÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	71
FIGURA 35 – TABELA COM O POTENCIAL DE PERDA DE SOLO DE CADA SUB- BACIA.....	72
FIGURA 36 – MAPA DO POTENCIAL DE PERDA DE SOLO DA BACIA DO PASSAÚNA.....	74
FIGURA 37 – MAPA DA ESTIMATIVA DA EXPORTAÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA DO PASSAÚNA	75
FIGURA 38 – MAPA DE USO DO SOLO DA SUB-BACIA Nº 27 DA BACIA DO PASSAÚNA.....	76
FIGURA 39 – PORCENTAGENS DO USO DO SOLO NA SUB-BACIA Nº 27.....	77

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3.	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS DE MANANCIAL DE ABASTECIMENTO PÚBLICO.....	17
3.2	EROSÃO HÍDRICA	20
3.2.1	Fase de desagregação do solo.....	24
3.2.2	Fase de transporte do solo	25
3.2.3	Fase de deposição de sedimento.....	25
3.3	EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DO SOLO – USLE.....	26
3.3.1	Fator de erosividade da chuva – R.....	28
3.3.2	Fator de erodibilidade do solo – K	29
3.3.3	Fator topográfico – LS.....	30
3.3.4	Fator de cobertura do solo – C	32
3.3.5	Fator de práticas conservacionistas – P	33
3.4	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	36
3.4.1	Imagens aéreas.....	37
3.4.2	Imagens de satélite.....	37
3.4.3	Arquivos vetoriais	38
3.4.4	Arquivos raster	38
3.5	A FERRAMENTA COMPUTACIONAL INVEST®.....	39
3.5.1	Funcionamento do modelo de retenção de sedimentos	40

3.5.2	Dados de entrada requeridos.....	40
3.5.3	Dados de saída	41
3.5.4	Limitações do modelo	42
3.5.5	Exemplos de aplicação do InVEST®	43
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO PARA O ESTADO DO PARANÁ	46
4.1.1	Delimitação das bacias de mananciais e suas sub-bacias	46
4.1.2	Erosividade da chuva – Fator R.....	47
4.1.3	Erodibilidade do solo – Fator K	47
4.1.4	Modelo Digital do Terreno – MDT	48
4.1.5	Uso e cobertura do solo	49
4.1.6	Fator de cobertura do solo – Fator C	51
4.1.7	Fator de práticas conservacionistas – Fator P.....	52
4.2	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAÇÃO DO MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS DO InVEST®	52
4.2.1	Localização.....	52
4.2.2	Caracterização	53
4.3	ALIMENTAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA ÁREA DE ESTUDO	54
4.4	EXECUÇÃO DO MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO	55
4.5	DADOS DE SAÍDA DO MODELO	55
4.6	DEFINIÇÃO DAS ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA REDUÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA NA ÁREA DE ESTUDO	56
5.	RESULTADOS	57
5.1	PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA PARA O ESTUDO DE CASO ..	57
5.1.1	Bacia de manancial e sub-bacias	57
5.1.2	Erosividade da chuva – fator R.....	60

5.1.3	Erodibilidade do solo – fator K	62
5.1.4	Modelo Digital do Terreno – MDT	65
5.1.5	Mapa de uso do solo	66
5.1.6	Fatores C e P	68
5.3	EXECUÇÃO DO MODELO	69
5.4	DADOS DE SAÍDA	71
6.	DISCUSSÕES	78
7.	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE 1	90

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental, atualmente verificada em praticamente todas as regiões do planeta ocupadas pelo ser humano, pode ter a sua origem atribuída à primeira revolução industrial ocorrida em meados do século XVIII na Inglaterra. Esta degradação é justificada, em parte, pela busca de matéria prima para a produção de bens de consumo, em uma escala nunca antes vista. Este processo de industrialização trouxe ganhos inegáveis para a humanidade, mas a exploração dos recursos naturais, sem a consciência ambiental e a ideia de sustentabilidade, durante os séculos seguintes, causou e ainda causa sérios danos ambientais (TUNDISI, 2003).

Dentre os danos ambientais, a escassez de água para consumo humano pode ser considerada a mais preocupante. A utilização indiscriminada, o desperdício e a poluição dos corpos hídricos têm provocado, em algumas regiões do mundo, sérios problemas de restrição de água para consumo humano. Segundo relatório da ONU, mais de 1 bilhão de pessoas não tem acesso a fontes confiáveis de água no mundo e, em 2025, boa parte do planeta não terá água suficiente para os diferentes usos, fazendo com que mais de 3 bilhões de pessoas sofram com a escassez (ONU, 2012).

O Brasil possui uma quantidade significativa de recursos hídricos, entretanto essa abundância está concentrada em algumas poucas regiões do país. Cerca de 80% dos recursos hídricos estão concentrados na Amazônia, aonde a população não chega a 5% dos brasileiros (JOHN e MARCONDES, 2010).

Em muitas regiões se observam problemas de escassez de água para consumo humano, seja pela indisponibilidade hídrica ou pela contaminação das águas. Atualmente, com a tecnologia existente, praticamente é possível produzir água potável a partir de qualquer tipo de fonte, seja ela poluída ou não. Entretanto, quanto mais poluída a água, mais caro se torna o tratamento, chegando a níveis economicamente impraticáveis, o que torna primordial a proteção, conservação e recuperação dos mananciais e de fontes de abastecimento de água para consumo humano (TUNDISI, 2005).

Muitos fatores podem deteriorar a qualidade e quantidade da água de um manancial. No Brasil, podemos destacar as ações antrópicas dentro da bacia como

o manejo inadequado do solo e o avanço da área urbana sem planejamento, os principais causadores da degradação ambiental em bacias de mananciais (FENDRICH *et al.*, 1997).

No Paraná, a maior parte dos problemas relacionados com a contaminação dos mananciais é causada pela erosão hídrica na área rural, devido ao pouco uso de práticas conservacionistas de manejo do solo, aliada a alta concentração de nutrientes utilizados na agricultura atual, que na presença da erosão, transporta parte destes nutrientes para os rios, alterando a sua qualidade (BERTOL, 2005). Segundo Parry (1998), a erosão é considerada uma das maiores fontes de poluição difusa e o maior causador da contaminação de águas.

Para o abastecimento com água potável de trezentos e quarenta e seis municípios paranaenses (86,7% do total), aproximadamente dez milhões e seiscentos mil habitantes, a Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR utiliza água proveniente de rios e aquíferos espalhados por todo o Estado. A água captada é tratada e posteriormente distribuída para a população (SANEPAR SisWEB, 2014).

Observa-se, em algumas estações de tratamento de água, o aumento gradativo dos custos para tornar a água potável. Este aumento é um indicativo da diminuição da qualidade da água captada, já existindo casos de abandono de uma captação devido à péssima qualidade da água do manancial. Como a maior parte das bacias de mananciais do Estado está situada em áreas rurais, são primordiais ações e projetos que visem à preservação, conservação e recuperação destas bacias.

Para melhor eficácia das ações a serem desenvolvidas em bacias de mananciais, visando à melhoria e disponibilidade de água, é primordial estudos que indiquem regiões prioritárias para as intervenções, ou seja, aquelas que estão mais suscetíveis à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos para os corpos hídricos. Desta forma é possível concentrar esforços e investimentos, direcionando as ações nas regiões da bacia onde o problema da erosão tem o maior potencial de contaminação dos corpos hídricos.

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução e controle da erosão hídrica, por meio da definição de áreas mais propensas à perda de solo e transporte de sedimentos. Para identificação

destas áreas foi utilizado um *software* de modelagem matemática, baseado na Equação Universal de Perda de Solo, associado a um Sistema de Informações Geográficas, o que permitiu a espacialização das áreas prioritárias. Os dados para execução da modelagem matemática foram obtidos para o estado do Paraná, possibilitando que a metodologia possa ser replicada para qualquer bacia de manancial do Estado.

Para aplicar a metodologia, foi proposto um estudo de caso, no qual foi utilizada a bacia do Passaúna. Nesta bacia está inserido o reservatório do Passaúna, que abastece boa parte de Curitiba e região metropolitana. A execução da modelagem nesta bacia identificou áreas com nível moderado de erosão, na maior parte, mas algumas com nível severo de erosão.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar metodologia para identificação de áreas com maior potencial de perda de solo e transporte de sedimentos para o corpo hídrico em bacias hidrográficas de mananciais de abastecimento público do estado do Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Obter os parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo para o estado do Paraná;
- ii. Elaborar um manual de utilização da ferramenta INVEST®;
- iii. Verificar a aplicabilidade prática da metodologia proposta a partir do estudo de caso na Bacia do Rio Passaúna.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS DE MANANCIAL DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

O bombeamento para adução de água de um corpo hídrico, para posterior tratamento e distribuição para a população, é denominado de ponto de captação. A partir deste ponto é definido uma bacia hidrográfica, que consiste na área de drenagem a montante deste ponto, conforme mostra a Figura 1, que é chamada de Bacia Hidrográfica de Manancial de Abastecimento Público.

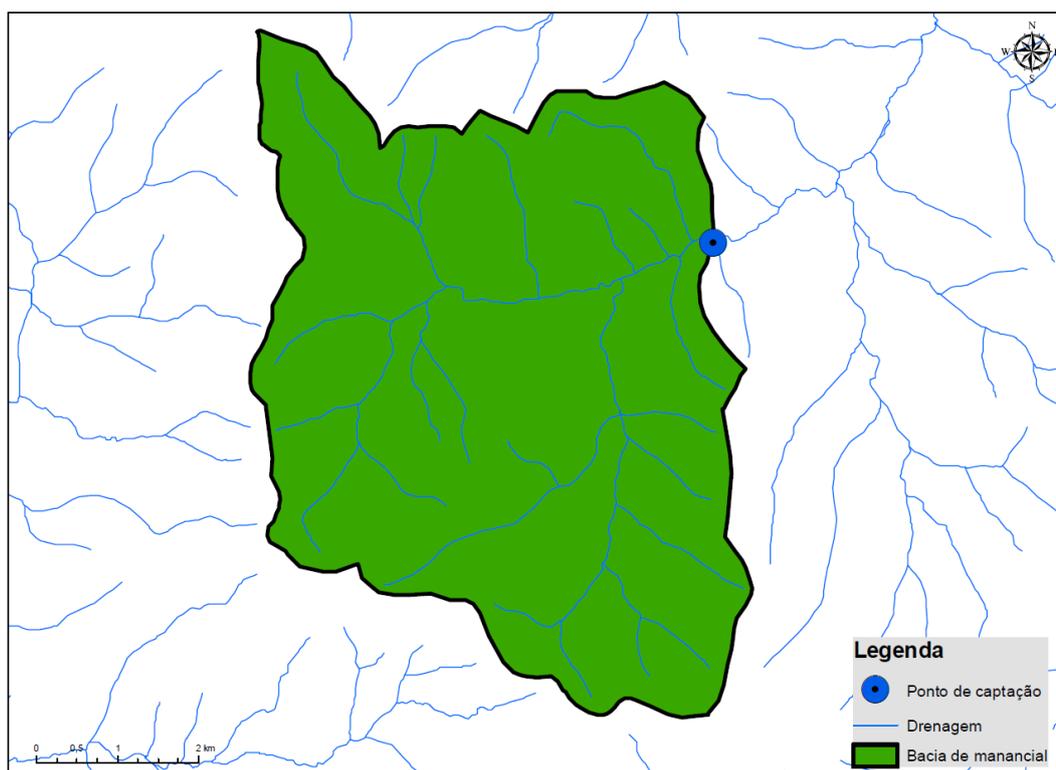


FIGURA 1 – BACIA DE MANANCIAL RIO PIAVA

FONTE: Adaptado de AGUASPARANÁ (2011)

Nas Figuras 2 à 5 são mostrados alguns exemplos de bombeamento de água em mananciais de abastecimento público.



FIGURA 2 – CAPTAÇÃO DO RIO JORDÃO
FONTE: SANEPAR CADASTRO (2002)



FIGURA 3 – CAPTAÇÃO DO RIO PIAVA
FONTE: SANEPAR CADASTRO (2002)



FIGURA 4 – CAPTAÇÃO DO RIO NATUREZA
FONTE: SANEPAR CADASTRO (2002)



FIGURA 5 – CAPTAÇÃO DO RIO PASSAÚNA
FONTE: SANEPAR CADASTRO (2002)

Nas Figuras 2 e 3 o bombeamento é feito diretamente no leito do rio. Na Figura 4 é construída uma pequena barragem para regularização da vazão e na Figura 5 a captação é feita a partir de um reservatório construído para acumulação de água.

Para o abastecimento com água tratada de grande parte da população do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR possui 260 pontos de captação, que definem, conseqüentemente, 260 bacias hidrográficas de manancial de abastecimento público. A distribuição espacial destas bacias pode ser verificada na Figura 6.

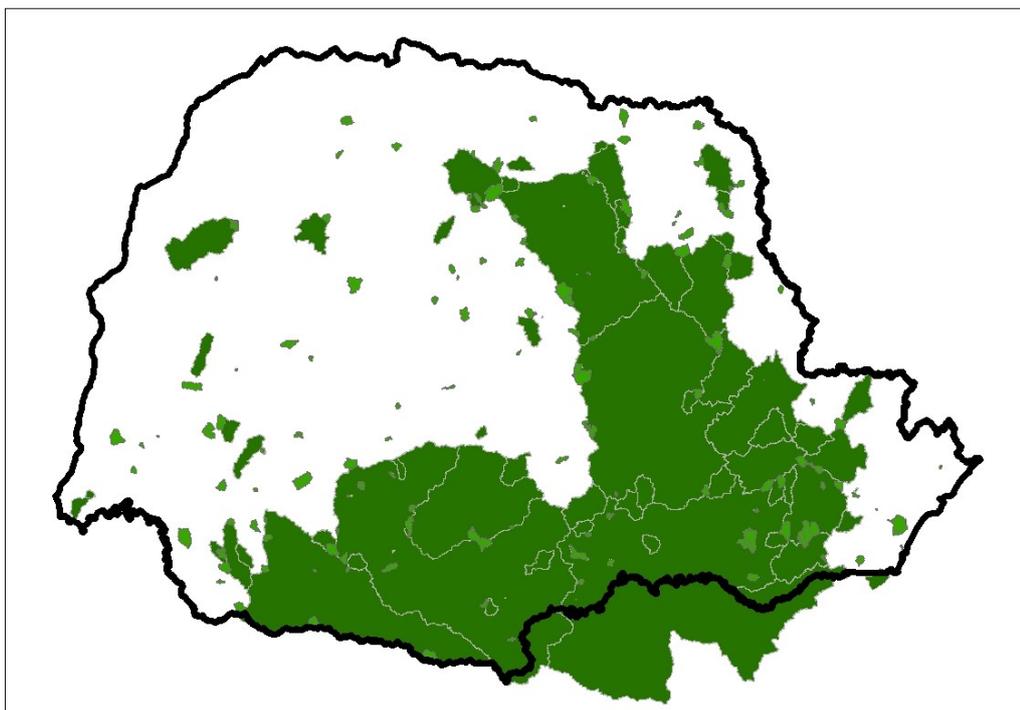


FIGURA 6 – BACIAS DE MANANCIAIS DO PARANÁ

FONTE: Adaptado de AGUASPARANÁ (2011)

Diversos fatores podem contribuir para a degradação ambiental de uma bacia de manancial e a conseqüente diminuição da disponibilidade e qualidade de suas águas. Podem-se citar as principais causas da degradação ambiental: o desmatamento, em especial a supressão da mata ciliar, o uso excessivo de agrotóxico nas lavouras, técnicas inadequadas de manejo do solo na agricultura, avanço desordenado da área urbana sobre a bacia, trazendo problemas de disposição de lixo em rios e córregos, impermeabilização do solo e o lançamento no meio ambiente de esgotos domésticos e industriais sem o devido tratamento (ANDREOLI, 2003).

A grande maioria das bacias de mananciais da SANEPAR está localizada em áreas rurais, este fato faz com que os principais problemas ambientais das bacias são os advindos do manejo inadequado do solo para a agricultura e a supressão da vegetação.

No Paraná a maior parte das áreas de agricultura motomecanizadas utiliza a semeadora direta como forma de plantio, que aliada à utilização de fertilizantes, possibilita uma alta concentração de nutrientes nas camadas superiores do solo.

Estes nutrientes, na presença da erosão hídrica, são transportados e podem vir a alcançar os mananciais, causando a sua contaminação. Em contra partida, a vegetação, em especial a mata ciliar, funciona como uma barreira à erosão, impedindo que o solo erodido alcance o corpo hídrico. Neste contexto, grande parte dos problemas relacionados à contaminação dos mananciais no Estado está ligada à erosão hídrica (BERTOL, 2005).

3.2 EROSÃO HÍDRICA

A contaminação de um manancial ou a diminuição da disponibilidade hídrica de sua bacia, por meio da erosão hídrica, pode levar ao aumento nos custos de tratamento da água, ou até mesmo a necessidade de um novo ponto de captação, seja por insuficiência de água ou aos elevados custos requeridos no tratamento. Um resumo dos problemas e das consequências da erosão hídrica é mostrado no fluxograma da Figura 7.

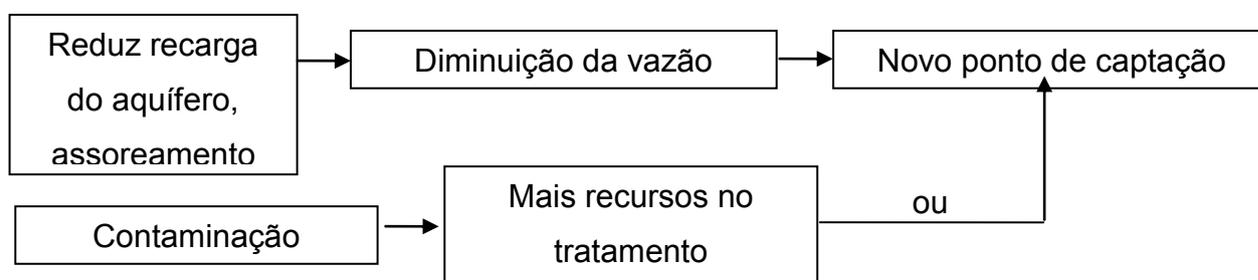


FIGURA 7 – PROBLEMAS E CONSEQUÊNCIAS PARA O ABASTECIMENTO PÚBLICO

A erosão hídrica pode causar a diminuição da vazão de um manancial de captação de água, seja pela redução da recarga do aquífero, através da diminuição da infiltração da água da chuva, ou pelo assoreamento do manancial, por meio do transporte de material particulado para o mesmo. Além da diminuição da vazão, a erosão também pode causar a contaminação do manancial, por meio da carga de

poluentes, que por ventura, podem estar presentes no solo carregado para o corpo hídrico.

A erosão hídrica consiste na remoção da camada superficial do solo, transporte e deposição do material erodido, causado pelo impacto das gotas de chuva sobre o solo e pelo escoamento superficial subsequente da água. Na figura 8 é apresentado um processo avançado de erosão numa área de pastagem, às margens da represa do Iraí, localizada na região metropolitana de Curitiba.

Na erosão hídrica os nutrientes presentes nos solos são transportados, juntamente com partículas de solo, pelo escoamento superficial e podem atingir os corpos d'água, causando assoreamento e degradação da qualidade da água. Neste processo são transportados, principalmente, materiais mais finos de baixa densidade, de alto teor de nutrientes encontrados nas camadas mais superiores do solo, sendo a matéria orgânica o principal componente (BARROWS e KILMER, 1963).



FIGURA 8 – PROCESSO AVANÇADO DE EROSIÃO ÀS MARGENS DA REPRESA DO IRAÍ

A erosão é um processo natural, com perdas de solo e transporte de sedimentos contínuos, que acontece de forma lenta ao longo do tempo. A perda de solo pode ser acelerada e aumentada por diversos fatores, mas vários autores, tais como Judson (1977), Bertoni e Lombardi Neto (1995), Tomazoni *et al.* (2005) e

Bertol (2005), concordam que a maior causa é o desmatamento e o uso intensivo da agricultura.

As perdas de solo por erosão podem chegar até níveis extremos, da ordem de várias toneladas de hectare por ano, definindo assim a classe da erosão. Na Tabela 1 são mostrados a classe, o nível da erosão e o seu respectivo potencial de perda de solo.

TABELA 1 - CLASSE E NÍVEL DA EROSÃO

CLASSE	NÍVEL DA EROSÃO	POTENCIAL DE PERDA DE SOLO (tonelada / hectare. ano).
1	Muito baixo	menor que 6
2	Baixo	6 a 11
3	Moderado	11 a 22
4	Alto	22 a 33
5	Severo	maior que 33

FONTE: PEREIRA (2006)

O tipo de uso e ocupação do solo é o fator que mais provoca variações significativas nas taxas de perda de solo por erosão. As perdas podem aumentar em várias vezes dependendo do tipo de ocupação, se comparadas com a floresta natural.

A água da chuva, que incide sobre uma determinada bacia hidrográfica, deve ser retida e infiltrada no solo, para evitar que a água escoe sobre a superfície e cause a desagregação e transporte de partículas do solo. Água da chuva também deve ser infiltrada no solo para que possa fazer a recarga de mananciais subterrâneos (PREVEDELLO, 1996).

Os principais fatores determinantes na erosão hídrica são: a erosividade da chuva, que é o potencial da chuva em provocar a erosão, a erodibilidade do solo, que é a suscetibilidade dos solos em serem erodidos, a topografia do terreno, as práticas de manejo e conservação e o uso e ocupação do solo. Dentre estes fatores, a erosividade da chuva é o fator mais preponderante, pois além de causar a desagregação de partículas do solo, pode causar o selamento superficial do solo, diminuindo a infiltração da água e aumentando o escoamento superficial. A intensidade da erosão depende da quantidade de material sujeito a desagregação e a capacidade de erosão dos agentes causadores (MEYER *et al.*, 1975).

A quantidade de água dos mananciais (redução do potencial hídrico) pode ser afetada pela diminuição da água de recarga ou pelo assoreamento de rios. A erosão também pode 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.

A eutrofização consiste na proliferação excessiva de organismos aquáticos, principalmente algas, devido à alta concentração de nutrientes na água. Após a morte destes organismos e posterior processo de decomposição, altas concentrações de oxigênio serão demandadas, resultando em um déficit de oxigênio no ambiente, ocasionando um empobrecimento da fauna e flora dos mananciais. As algas ainda podem liberar toxinas nocivas a diversos organismos inclusive aos seres humanos (ANDREOLI e CARNEIRO, 2005).

No fluxograma abaixo são mostrados os problemas causados pela erosão hídrica que levam a redução do potencial hídrico e a perda da qualidade da água.

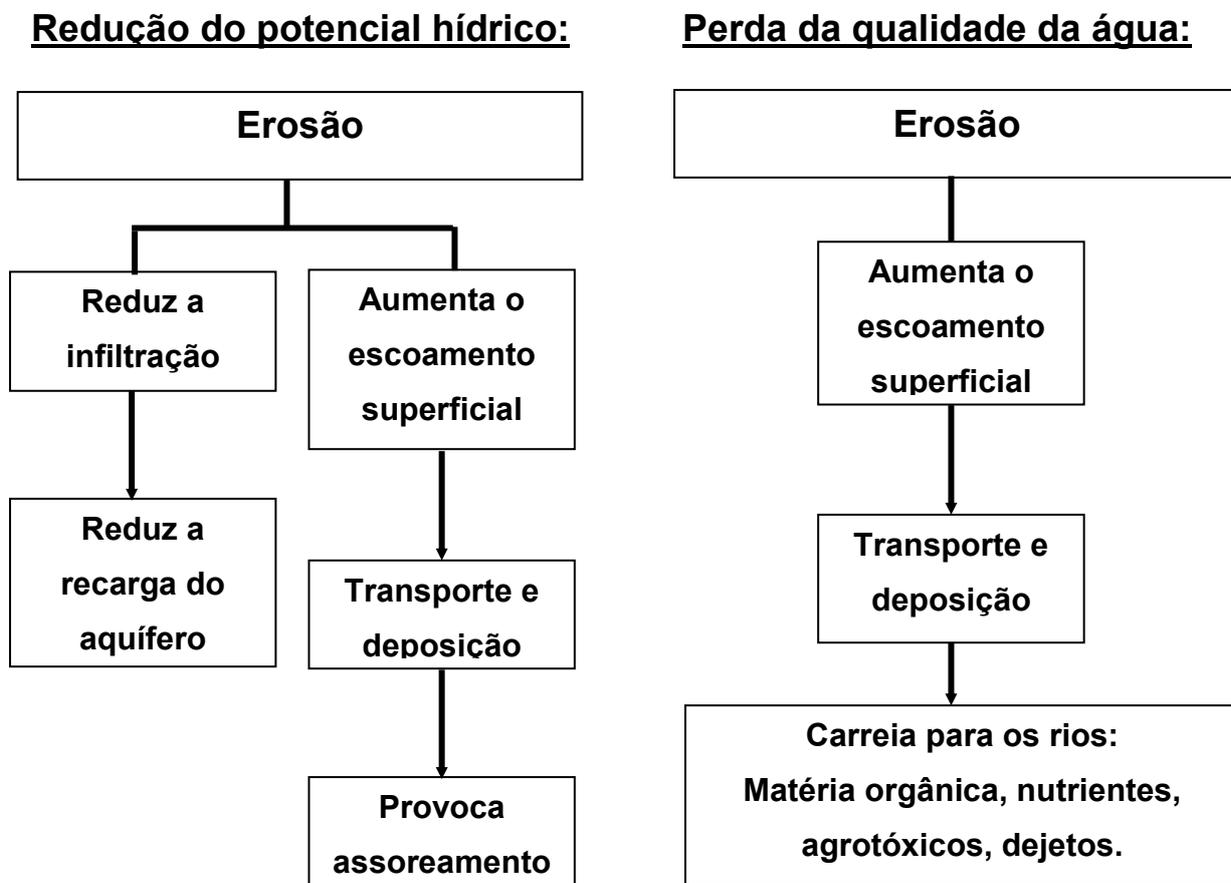


FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DOS PROBLEMAS CAUSADOS PELA EROÇÃO

A erosão hídrica pode ser dividida em três fases: fase de desagregação do solo, fase de transporte dos sedimentos desagregados e fase de deposição dos sedimentos transportados, que serão detalhadas a seguir.

3.2.1 Fase de desagregação do solo

A fase de desagregação do solo é iniciada pela incidência das gotas de chuva sobre a superfície do mesmo, que devido à energia cinética do impacto provoca o desprendimento de pequenas partículas. A desagregação, então, depende da combinação entre a capacidade da chuva em causar erosão e da capacidade do solo em resistir a ela (CARVALHO, 1986).

O impacto das gotas de chuva provoca a ruptura dos agregados menos estáveis do solo, provocando o salpicamento em todas as direções de pequenas partículas de solo, proporcionando o deslocamento de materiais mais finos. Parte deste material irá preencher os poros do solo, causando o seu selamento, reduzindo a infiltração e favorecendo o escoamento superficial. Outra parcela irá escoar junto com a água na direção do fluxo (MEYER *et al.*, 1975).

A capacidade da chuva em causar erosão é definida como erosividade e depende do tamanho das gotas, da intensidade e duração da chuva e da velocidade final do impacto. A capacidade do solo em resistir à erosão depende de características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas inerentes do solo como, teor de matéria orgânica, ligações eletroquímicas, grau de intemperismo, teor de umidade e textura. As condições da superfície do solo também influenciam a capacidade do solo em resistir à erosão, tais como, o tipo de cobertura do solo, a rugosidade, o desnível do terreno e a altura da lâmina d'água formada pela chuva (ALBUQUERQUE *et al.*, 2000).

Entre os fatores que influenciam o processo de erosão, a cobertura vegetal é reconhecidamente o mais significativo, pois protege o solo do impacto das gotas de chuva (FOSTER, 1982).

3.2.2 Fase de transporte do solo

Após a fase inicial de desagregação do solo e a consequente diminuição da infiltração, a água da chuva se infiltra até que a sua intensidade supere capacidade de infiltração do solo, o que acarreta no empoçamento da água em pequenas depressões do terreno. A continuidade da chuva desencadeia então o processo de escoamento superficial, no sentido do declive. O escoamento superficial transporta o material particulado do solo e sua capacidade de transporte é aumentada pela continuidade do impacto das gotas de chuva, que aumentam a turbulência do escoamento. O aumento da turbulência confere um potencial erosivo ao escoamento, que irá desagregar mais material, formando sulcos no solo. O aumento do fluxo concentrado também irá aumentar o potencial de desagregação, dando continuidade ao processo (CARVALHO, 1986).

Na erosão hídrica, o primeiro mecanismo de transporte do solo é observado então, no salpico provocado pelo impacto das gotas de chuva, seguido do transporte exercido pelo escoamento superficial.

3.2.3 Fase de deposição de sedimento

Após o transporte de sedimentos, ocorre a deposição do material, quando a quantidade de material desagregado excede a capacidade de transporte do fluxo. A capacidade de transporte depende da quantidade do fluxo de água, da sua turbulência e da declividade do terreno. Os materiais transportados irão se depositar de acordo com a sua densidade, ou seja, materiais mais pesados depositam primeiro e os materiais mais finos, como argila e matéria orgânica, por último (FENDRICH *et al.*, 1997).

Em certos casos, o escoamento superficial alcança os corpos hídricos e como consequência os sedimentos transportados passam a contaminar as águas superficiais e podem causar assoreamento de rios e barragens.

Na Figura 10 são mostradas as fases da erosão hídrica, sendo:

- A: impacto da gota de chuva
- B: fase de desagregação do solo
- C: fase de transporte do solo
- D: fase de deposição de sedimento

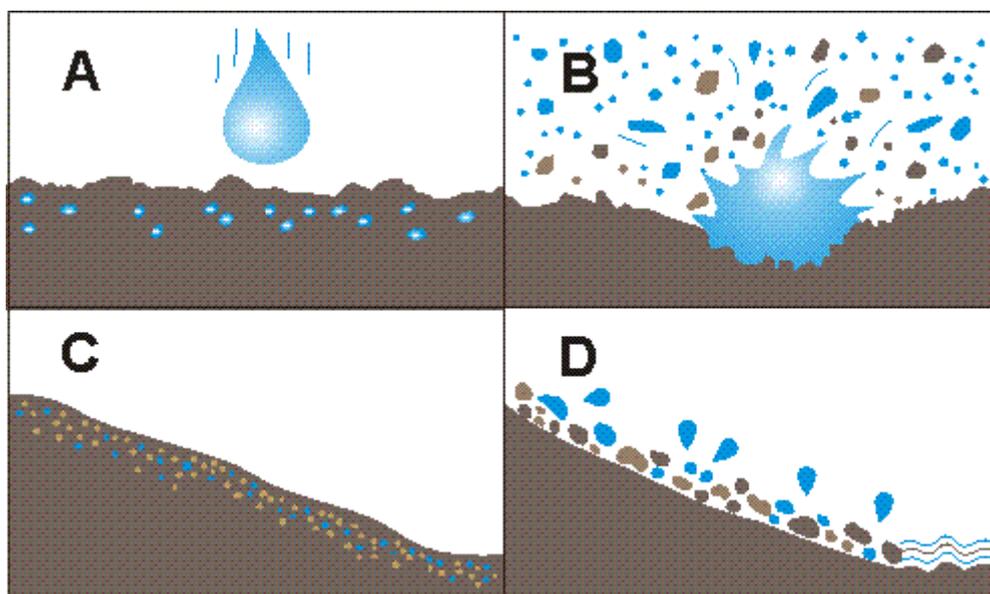


FIGURA 10 – FASES DA EROSIÃO HÍDRICA

FONTE: DERPSCH *et al.*, (1991).

3.3 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DO SOLO – USLE

A erosão do solo é um processo complexo e dinâmico, diversos fatores a influenciam e sua modelagem depende do conhecimento destes fatores. As propriedades do solo, o clima, a topografia, a cobertura vegetal e a prática de manejo do solo são os principais fatores, sendo que, o nível de conhecimento e a qualidade dos dados a respeito destes fatores são preponderantes para a construção da modelagem (GÓMEZ, 2012).

A modelagem matemática da erosão do solo teve a sua primeira formulação publicada por Zingg em 1940 e se propunha a calcular a perda do solo no campo. Desde então muito outros estudiosos foram aperfeiçoando a formulação, até que em 1959 Wischmeir e Smith, baseados em trabalhos anteriores, elaboraram uma equação que estimava a perda de solo combinando vários fatores: a erosividade da

chuva (R), a erodibilidade do solo (K), a topografia (LS), a cobertura vegetal (C) e as práticas de conservação agrícola (P). Com isso surgiu a primeira versão da Equação Universal de Perda do Solo (USLE). A forma definitiva da USLE foi proposta por WISCHMEIER e SMITH em 1978 (GÓMEZ, 2012).

A USLE é expressa pela multiplicação dos fatores que influenciam a perda de solo, segundo a equação (1):

$$PS = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Sendo:

PS (perda de solo): expresso em toneladas, por hectare, em um ano [t.ha⁻¹. ano⁻¹].

R (erosividade da chuva): expresso em Mega Joule por milímetros, por hectare, por hora em um ano [MJ.mm⁻¹.ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹].

K (erodibilidade do solo): expresso em toneladas por hora, por Mega Joule, por milímetros [t.h.MJ⁻¹. mm⁻¹]

LS (Comprimento e declividade da encosta): adimensional.

P (Fator de práticas conservacionistas): adimensional

Na Figura 11 são apresentados os fatores da USLE e suas correlações.

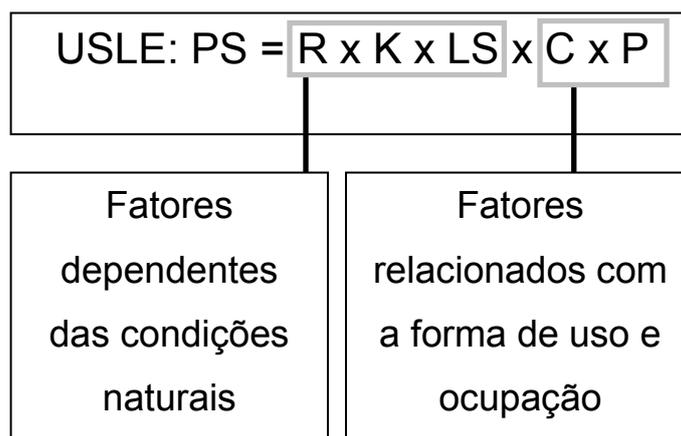


FIGURA 11 – FATORES DA USLE E SUAS CORRELAÇÕES

A USLE é amplamente difundida e utilizada por pesquisadores em todo o mundo para estimar a perda de solo no meio agrícola, permitindo a definição de

estratégias para controle e diminuição da erosão, evitando o empobrecimento do solo e contaminação dos recursos hídricos (FENDRICH *et al.*, 1997).

Os fatores que integram a USLE serão descritos nos itens subsequentes.

3.3.1 Fator de erosividade da chuva – R

O fator de erosividade da chuva, ou fator R, estima a energia cinética das gotas de chuva ao colidir com o solo nu, ou seja, o poder erosivo da chuva.

A energia cinética da chuva é determinada pela massa e velocidade de queda da gota de chuva, onde o tamanho da gota determina a área de solo que irá sofrer o impacto (EKERN, 1950).

Wischmeier e Smith (1958), após vários estudos, concluíram que o produto da energia cinética (E) pela intensidade máxima da chuva em trinta minutos (I30), é a melhor maneira de explicar a capacidade erosiva da chuva, definida como Índice de Erosividade da chuva (EI30). Para a determinação do fator R da USLE, é necessário determinar o EI30 para todas as chuvas individuais erosivas (eventos superiores a 12.5 mm) que ocorrem em cada mês do ano, definindo-se assim o EI30 mensal. A soma dos EI30 mensais definem o EI30 anual e a média anual deste índice, de todos os anos considerados, determina o fator R do local de estudo. O cálculo mais acurado do EI30 depende da quantidade e confiabilidade de dados disponíveis a respeito das chuvas (séries históricas), obtidos de pluviômetros ou pluviógrafos existentes na região de estudo. Com a informação da distribuição espacial das chuvas e sua variabilidade, é possível elaborar mapas de linhas isoerodentes, que definem linhas com o mesmo valor do EI30. Através de interpolação linear é possível estimar o valor do EI30 e conseqüentemente o fator R para locais onde não foram coletados dados, originando os chamados mapas isoerodentes (DIAS e SILVA, 2003).

No Quadro 1 são descritas, resumidamente, algumas variáveis que afetam o fator R, os efeitos da erosão e implicações sobre o manejo.

Variável	Descrição e função	Efeito da erosão	Implicações para o manejo
ENERGIA DA CHUVA	- O volume da queda d'água e o escoamento da água produzido durante a chuva. - Determina o potencial erosivo da chuva.	- Chuva leve e duradoura ou curta e intensa pode ter o mesmo impacto. - Pequenos volumes durante curtos períodos e largos intervalos entre as chuvas possuem baixo potencial erosivo. - Quando combinados com solo altamente erodível, até chuvas com baixa intensidade podem produzir erosão.	- Sistemas de manejo que fornecem adequada cobertura durante os períodos críticos podem reduzir as perdas de solo. Ex. durante a primavera (solos saturados, baixa cobertura) e o verão (chuvas com alta capacidade erosiva).
INTENSIDADE DA CHUVA	- Volume da queda d'água por unidade de tempo.	- Quanto maior a intensidade, maior o potencial para a desagregação e o carreamento de sedimentos.	
DISTRIBUIÇÃO ANUAL DE PRECIPITAÇÕES QUE CAUSAM A EROSÃO	- Volume da queda d'água e escoamento que ocorre durante as estações / meses do ano.	- O potencial erosivo das chuvas varia com as épocas do ano. - Geralmente as chuvas com maior potencial de erosão ocorrem no verão.	- Técnicas diferentes de controle da erosão devem ser usadas dependendo da época do ano.

QUADRO 1 - VARIÁVEIS QUE AFETAM O FATOR R, DESCRIÇÃO, EFEITO E IMPLICAÇÕES

FONTE: PEREIRA (2006)

3.3.2 Fator de erodibilidade do solo – K

O fator de erodibilidade do solo, também chamado de fator K, expressa a suscetibilidade do solo de ser erodido, ou seja, o grau de resistência natural do solo à erosão. Na definição da USLE por Wischmeier e Smith (1978), o fator K é relacionado com os efeitos integrados da chuva, da infiltração e do escoamento superficial nas perdas de um solo não protegido. A determinação do fator K depende das características físicas, químicas e mineralógicas do solo e pode ser determinado basicamente por três métodos (WISCHMEIER e MANNERING, 1969):

(1) Primeiro método: realizado experimentalmente, verificado em uma parcela de terra padrão, onde é relacionado as perdas de solo com a erosividade da chuva, em um período longo de tempo que englobe diversos eventos de chuva.

(2) O segundo método: também realizado experimentalmente, com a mesma técnica do primeiro método, com a diferença que as chuvas são simuladas.

(3) O terceiro método: consiste na determinação da erodibilidade por meio de equações matemáticas, ajustadas por meio de análises de regressão dos valores de erodibilidade determinados pelos métodos experimentais, em função de parâmetros físicos, químicos e mineralógicos do solo analisado.

Apesar do fator K ser considerado constante na USLE, diversos fatores como umidade do solo, conteúdo de carbono orgânico, a distribuição de solutos e o conteúdo de íons, entre outros, podem alterar a resistência do solo à desagregação. Este fato faz com que a predição da perda de solo somente seja satisfatória para estimativas médias, não sendo aconselhada a estimativa de perdas de solo para períodos menores que um ano ou para eventos individuais (DOMINGOS, 2006).

No quadro 2 são descritas, resumidamente, algumas variáveis que afetam o fator R, os efeitos da erosão e implicações sobre o manejo.

Variável	Descrição e função	Efeitos da erosão	Implicações para o manejo
TEXTURA DO SOLO	- Tamanho e distribuição das partículas do solo. - Partículas menores, uma vez desprendidas do solo, são facilmente transportadas.	- A erodibilidade aumenta com a presença de silte e de areia muito fina (partículas facilmente desagregáveis, que formam crostas que diminuem a infiltração e aumentam o escoamento superficial).	- Limita o uso do solo (tipo de cultura e sistema de manejo).
MATÉRIA ORGÂNICA	- Quantidade de húmus presente. - O material orgânico ajuda a manter as partículas unidas. - Afeta a capacidade de retenção de água do solo, influencia a infiltração e o volume de escoamento.	- Solo com alto nível de matéria orgânica possui maior resistência à erosão e possibilita uma melhor infiltração de água.	- A manutenção do nível adequado de matéria orgânica reduz o risco de erosão, aumentando a fertilidade, que por sua vez, pode aumentar a camada superficial de cobertura, aumentando a proteção do solo.
ESTRUTURA	- Arranjo de partículas de solo e agregados. - Proporciona uma indicação da força de atração entre as partículas para resistirem à erosão.	- Solos que não se quebram facilmente têm maior resistência à erosão.	- Manutenção do nível de estabilização da área, reduzindo as erosões.
PERMEABILIDADE	- Afeta a quantidade de água que irá infiltrar-se no solo.	- Quanto maior a infiltração menor o escoamento superficial e o risco de erosão.	- Práticas que lidam com o desenvolvimento de camadas impermeáveis, consolidadas ou com sulcos de aragem aumentam o risco de erosão.
ESTACIONALIDADE	- Características do solo que podem variar de acordo com a estação do ano e afetar a erodibilidade, o que inclui o volume de água, densidade, estrutura, permeabilidade, atividades biológicas e drenagem.	- Os solos tendem a ser mais susceptíveis na primavera, especialmente durante o período de condições severas.	- Melhor cobertura (serrapilheira e/ou resíduos) e superfícies regulares na primavera podem ajudar na estabilização do solo, reduzindo a erosão.

QUADRO 2 - VARIÁVEIS QUE AFETAM O FATOR K, DESCRIÇÃO, EFEITO E IMPLICAÇÕES
FONTE: PEREIRA (2006)

3.3.3 Fator topográfico – LS

A topografia do terreno influencia diretamente o desprendimento das partículas e o transporte de sedimentos. Quanto maior a distância e a inclinação

percorrida pela água no escoamento superficial, maior é o arraste da água sobre o solo e um maior número de partículas serão desprendidas (PEREIRA, 2006).

Na USLE o fator topográfico LS representa duas variáveis do relevo, sendo que o fator L avalia o comprimento da encosta e o fator S a sua declividade. O comprimento da encosta é definido como a distância entre a origem do escoamento superficial e a deposição final dos sedimentos, onde o declive decresce ou quando o escoamento superficial atinge uma rede de drenagem ou um corpo hídrico. A declividade é expressa em porcentagem, sendo metros de desnível por metros de comprimento.

O fator LS, no desenvolvimento da USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1978) foi definido por meio de medidas em campo em parcelas experimentais, com inclinação de 9% (S) e o comprimento da encosta de 22,1 m (L).

No Quadro 3 são descritas, resumidamente, algumas variáveis que afetam o fator LS, os efeitos da erosão e implicações sobre o manejo.

Variável	Descrição e função	Efeito da erosão	Implicações para o manejo
INCLINAÇÃO DO TALUDE	- O talude é medido pelo ângulo de inclinação ou porcentagem da inclinação em relação ao ângulo.	- A velocidade do escoamento aumenta com o aumento da inclinação do talude.	- Cobertura e práticas que promovem a infiltração e diminuem o escoamento superficial podem diminuir o efeito da inclinação na erosão.
EXTENSÃO DO TALUDE	- Medida do ponto onde começa o escoamento superficial até o ponto de deposição dos sedimentos.	- A erosão aumenta com o aumento do comprimento do talude.	- Taludes cujo comprimento tem grande impacto na erosão, geralmente possuem valores de C mais altos. - Taludes cujo comprimento possui pequeno impacto no potencial erosivo, geralmente possuem maior número de partículas resistentes à erosão.
TIPO DO TALUDE	Talude uniforme côncavo ou convexo.	- Taludes côncavos geralmente têm um grau mais baixo de erosão do que taludes uniformes. - Taludes convexos têm um grau mais alto de erosão do que taludes uniformes. - O potencial de erosão e a capacidade de transporte diminuem a partir do topo do talude.	A cobertura com biomantas evita a formação de sulcos erosivos e posteriores erosões.

QUADRO 3 - VARIÁVEIS QUE AFETAM O FATOR LS, DESCRIÇÃO, EFEITO E IMPLICAÇÕES

FONTE: PEREIRA (2006)

O fator LS pode ser obtido computacionalmente por meio dos chamados Modelos Digitais de Terreno – MDTs, que consistem em uma representação matemática digital das variações topográficas do terreno, assim é possível determinar a distância entre pontos (comprimento da encosta) e a sua declividade.

Os MDTs podem ser gerados a partir de curvas de nível, de radares ou *scanners* específicos para levantamento do relevo, embarcados em satélites ou aeronaves, ou por meio de restituição aerofotogramétrica.

3.3.4 Fator de cobertura do solo – C

O fator de cobertura do solo expressa a relação das diversas variáveis da cobertura e manejo de solo que podem interferir na erosão hídrica, desde a cobertura vegetal até o tipo de plantio e colheita. Este fator é determinado em função do potencial de proteção do solo devido a um determinado tipo de cobertura vegetal ou tipo de manejo. O fator C varia de zero, com cobertura vegetal nativa, até um, com solo sem cobertura (ARAUJO, 1997).

No Quadro 4 são descritas, resumidamente, algumas variáveis que afetam o fator C, os efeitos da erosão e implicações sobre o manejo.

Variável	Descrição e função	Efeito da erosão	Implicação para o manejo
PRODUÇÃO AGRÍCOLA	- Folhas e galhos da vegetação acima da superfície interceptam as gotas de chuva antes que atinjam o solo. - A infiltração é facilitada.	- As gotas de chuva que caem da cobertura vegetal não possuem a mesma força erosiva das gotas de chuva não interceptadas. - Quanto maior a extensão da cobertura, melhor a proteção contra erosão.	- A força erosiva da chuva é reduzida com a presença de cobertura vegetal.
COBERTURA DE SUPERFÍCIE	- Resíduos presentes na superfície do solo, como restos de produções anteriores e atuais, vegetação, fragmentos de rochas, musgo, líquens, etc. - Interceptação das gotas ao nível do solo.	- Quanto mais alto a proporção de área de superfície coberta por resíduos, maior o controle da erosão. - Redução da capacidade de desagregação, escoamento e transporte. - A efetividade diminui à medida que os resíduos se decompõem, em razão da chuva e da temperatura.	- Sistema correto de recobrimento ajuda no controle da erosão.
BIOMASSA PRESENTE NO SOLO	- Inclui toda a matéria vegetal do solo (ex. raízes vivas e mortas, resíduos queimados e cobertura vegetal). - A água flui mais facilmente no solo, seguindo canais e macroporos criados pelas raízes, talos e outros. - Resíduos ajudam a aumentar a capacidade de reter a água.	- O aumento da biomassa geralmente indica melhor resistência à erosão. - Facilita a infiltração. - Mantém a umidade do solo, facilitando o desenvolvimento dos vegetais.	- A produção agrícola redistribui a biomassa através da aragem. - As práticas agrícolas muito profundas, normalmente são muito agressivas e enterram os resíduos anulando os benefícios de controle da erosão.
RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	- Formada por pequenas depressões e elevações da superfície do solo. - Diminui a velocidade do escoamento.	- O potencial erosivo do escoamento é diminuído. - A rugosidade é reduzida a medida que as depressões são preenchidas.	- O recobrimento do solo produz o aumento de rugosidade. - A rugosidade aumenta com o aumento da biomassa.

QUADRO 4 - VARIÁVEIS QUE AFETAM O FATOR C, DESCRIÇÃO, EFEITO E IMPLICAÇÕES

FONTE: PEREIRA (2006)

Atualmente, é possível contar com imagens da superfície terrestre provenientes de diversos tipos de satélites e aeronaves e através da interpretação visual destas imagens, determina-se o uso e cobertura do solo.

Dependendo da resolução espacial da imagem, que pode ser entendido como o nível de detalhamento contido na imagem, pode-se identificar detalhes como: tipo de cobertura vegetal, alterações da paisagem, tipo de ocupação do terreno e outros (QUARTAROLI E BATISTELA, 2005).

3.3.5 Fator de práticas conservacionistas – P

Esse fator também é denominado de práticas de manejo e conservação do solo. Representa a relação entre a perda de solo e determinada prática conservacionista de plantio em áreas agricultáveis. Em áreas não agricultáveis este fator não é considerado (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1995).

Na Tabela 2 são mostrados alguns valores do fator P para algumas práticas conservacionistas de plantio.

TABELA 2: VALORES DE P PARA ALGUMAS CLASSES CONSERVACIONISTAS

PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS	VALOR DO FATOR P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

FONTE: BERTONI E LOMBARDI NETO (1995)

No Quadro 5 são descritas algumas variáveis que afetam o fator P, o efeito sobre a erosão e implicações para o manejo do solo.

Variável	Descrição e função	Efeitos da erosão	Implicações para o manejo
CORTE DO TALUDE PARA A AGRICULTURA	<p>Descrição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cultivo / plantio feito ao longo do talude. <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lavoura, faixa de produção agrícola apresentam estrias que agem como pequenos danos através do talude. - Estrias redirecionam o escoamento superficial, modificam o fluxo-padrão, reduzindo a capacidade erosiva dos escoamentos superficial. 	<p><u>Redução da erosão até 25%</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Proteção quase total contra chuvas com moderada intensidade. - Pouca ou quase nenhuma proteção contra chuvas severas (escoamento superficial intenso). - Efetividade influenciada pelo comprimento do talude, propriedades do solo, manejo da produção, tipos de lavouras e quedas d'água. - São requeridos canais estáveis para transportar o excesso do escoamento de áreas de depressão do talude sem causar sulcos. - Faixas de gramíneas são efetivas na redução ou até mesmo na prevenção de sedimentos no canal de drenagem. - Canais difusos ou aumento do fluxo de água, que reduzem a velocidade de escoamento, diminuem sua capacidade erosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lavouras na parte de cima e de baixo do talude promovem o escoamento superficial, desenvolvendo erosões. - Lavouras opostas a taludes geram barreiras no escoamento, aumentam a infiltração e diminuem o escoamento superficial e a erosão. - Solos com superfícies rugosas proporcionam melhor proteção que superfícies mais lisas.
PERFIL DA AGRICULTURA	<p>Descrição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cultivo / plantio é feito seguindo as curvas topográficas do talude. <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> - As estrias criadas ao longo das curvas de nível possuem gradiente zero. 	<p><u>Redução da erosão de 10% a 50%</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Proteção quase total de chuvas de baixa a moderada intensidade, maior efetividade do que em corte de talude para agricultura. - Pouca ou nenhuma proteção contra chuvas severas. - Maior efetividade em taludes de 3% a 8% de inclinação. 	
FAIXA DE PRODUÇÃO	<p>Descrição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - A produção agrícola se desenvolve em arranjos, em faixas ou linhas (através do talude ou no contorno). - Faixas alternadas de vegetação rasteira (grama ou forração) com faixas de produção agrícola. - A rotação de culturas entre as faixas em ordem sistemática (gramíneas ou leguminosas), cobre uma porção do talude todo o ano. <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Difusão e redução do escoamento superficial, aumento da infiltração nas faixas vegetada. 	<p><u>Redução da erosão de 10% a 75%</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da erosão nas faixas vegetadas com gramíneas ou leguminosas. - A infiltração aumenta e a capacidade de transporte diminui. 	<ul style="list-style-type: none"> - A largura das faixas depende da inclinação, do comprimento do talude, da capacidade de infiltração e de outras propriedades do solo, do manejo da produção e das características da precipitação local. - Taludes com maior inclinação e mais compridos devem incorporar faixas mais amplas de forração e faixas mais estreitas de produção.
TERRACEAMENTO	<p>Descrição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leiras largas no solo construídas através do talude, com intervalos regulares. <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dividir o talude em porções mais curtas. - Interrupção da descida de água e diminuição da velocidade de escoamento. - Barreiras que servem de depósito de sedimentos 	<p><u>Redução da erosão de 10% a 90%</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da erosão laminar e sulcos erosivos. - Perdas de solo variam com a inclinação. - O solo erodido é depositado próximo à origem. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente caro, mudanças permanentes na topografia do talude.

QUADRO 5 - VARIÁVEIS QUE AFETAM O FATOR P, DESCRIÇÃO, EFEITO E IMPLICAÇÕES

FONTE: PEREIRA (2006)

No fluxograma da Figura 12 é apresentado um resumo da base teórica da USLE, onde primeiramente, a partir dos parâmetros R, K e LS, é calculado o potencial de perda de solo, que considera a área analisada sem nem um tipo de uso e cobertura. Logo após, a partir dos parâmetros C e P, é calculado a estimativa de retenção de sedimentos. Subtraindo-se a estimativa de retenção de sedimentos do potencial de perda de solo, define-se a quantidade de sedimentos transportados.

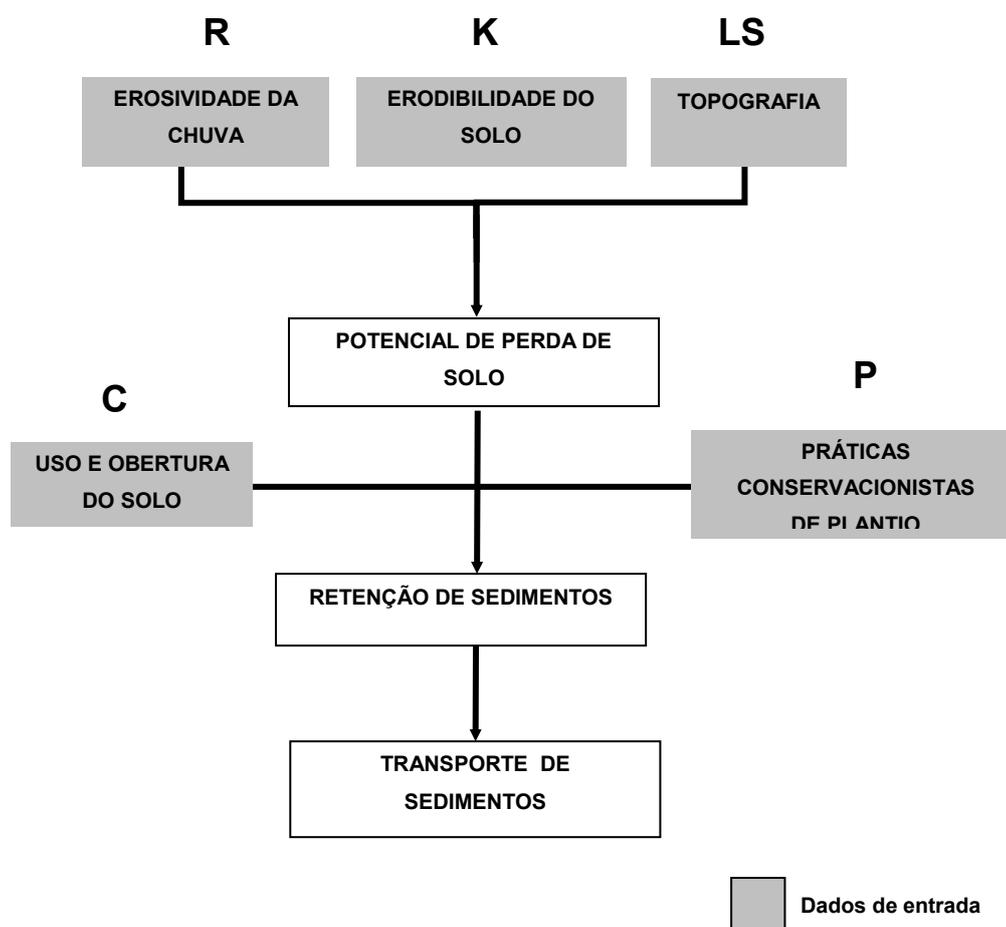


FIGURA 12 – BASE TEÓRICA DA USLE

3.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os Sistemas de Informações Geográficas, conhecidos popularmente como SIG são *softwares* utilizados para visualizar, analisar e manipular informações que possuam uma localização espacial na superfície terrestre. Esta localização é feita a partir de um sistema de coordenadas, como as coordenadas geográficas, onde a localização espacial é especificada pela latitude e longitude. Quando os dados são espacializados em um sistema de coordenadas, dizemos que o dado está georreferenciado (LONGLEY, 2013).

Dados georreferenciados como: imagens de satélite, imagens aéreas, arquivos vetoriais e dados alfanuméricos associados a uma localização espacial, podem ser inseridos e manipulados em um sistema de informações geográficas.

A coleta de informações pode ser feita, por exemplo, a partir de imagens de satélite, imagens aéreas, por sistema de posicionamento global por satélite (GPS), topografia e levantamentos de dados alfanuméricos.

O armazenamento destas informações é feito em um banco de dados próprio dos SIGs, que permite a manipulação dos dados alfanuméricos, das imagens e dos dados vetoriais e raster. A manipulação destes dados com a análise da interação entre eles, como proximidade, interseção, distâncias, áreas, similaridade, entre outras, é o que chamamos de geoprocessamento (TEIXEIRA e CHRISTOFOLETTI, 1997).

O objetivo da utilização de sistemas de informações geográficas é a obtenção de informações que possibilitam uma análise sobre uma determinada região ou objeto para o auxílio na tomada de decisões. As principais aplicações são (LONGLEY, 2013):

- **Gestão municipal** (Ex: planos diretores, zoneamento do território, segurança pública).
- **Serviços de utilidade pública** (Ex: telecomunicações, energia elétrica, saneamento).
- **Meio ambiente** (Ex: diagnósticos, monitoramento, gestão ambiental).

Dentre os *softwares* de SIG disponíveis no mercado, o ArcGis® foi o pioneiro do segmento e é atualmente o mais utilizado e vendido no mundo. Desenvolvido pela empresa americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Em 1968 os fundadores da empresa, Jack e Laura Dangermond, desenharam e desenvolveram as tecnologias de sistemas de informações geográficas que serviram como base para diversas outras ferramentas do gênero (ESRI, 2014).

A seguir serão explicados os principais arquivos de dados georreferenciados que podem ser manipulados em um SIG.

3.4.1 Imagens aéreas

Imagens obtidas por meio de câmera fotográfica específica para mapeamento embarcada em aeronaves (Figura 13).

3.4.2 Imagens de satélite

Imagens obtidas por meio de câmera fotográfica específica para mapeamento embarcada em satélites (Figura 14).



FIGURA 13 – IMAGEM AÉREA
FONTE: IPPUC (2008)

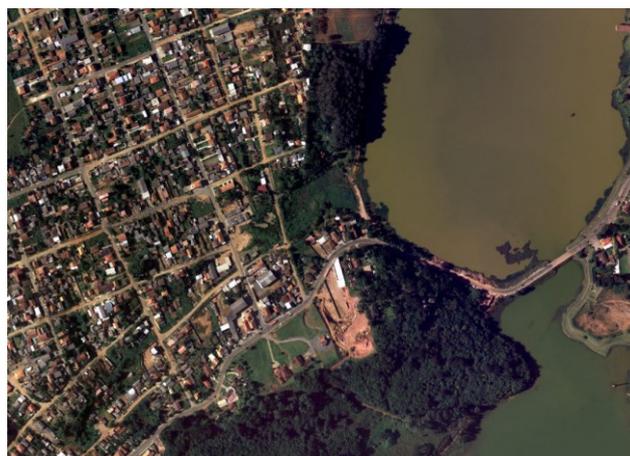


FIGURA 14 – IMAGEM DE SATÉLITE
FONTE: SEDU (2005)

3.4.3 Arquivos vetoriais

Arquivos com a representação gráfica (desenho) de objetos ou elementos da superfície terrestre, em forma de ponto, linha ou polígono. Na Figura 15 são mostradas uma imagem de satélite (a) e a sua correspondente representação em formato vetorial (b).

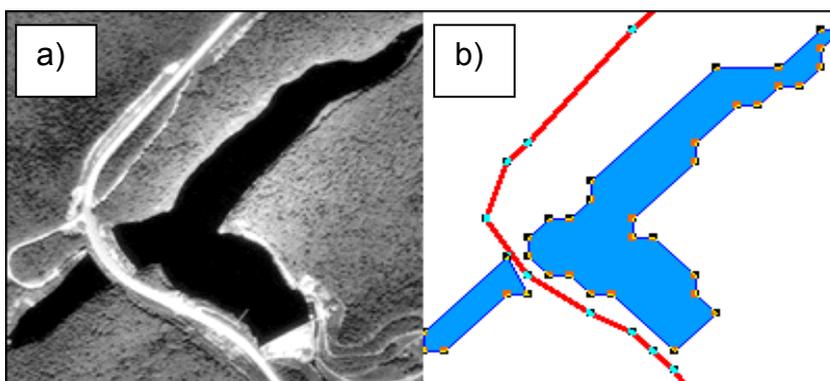


FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO EM FORMATO VETORIAL DE UMA IMAGEM
FONTE: EMS (2014)

3.4.4 Arquivos raster

Arquivos com a representação gráfica (desenho) de objetos ou elementos da superfície terrestre, em forma de quadrículas (células) regulares. Na Figura 16 são mostradas uma imagem de satélite (a) e a sua representação em formato raster (b).

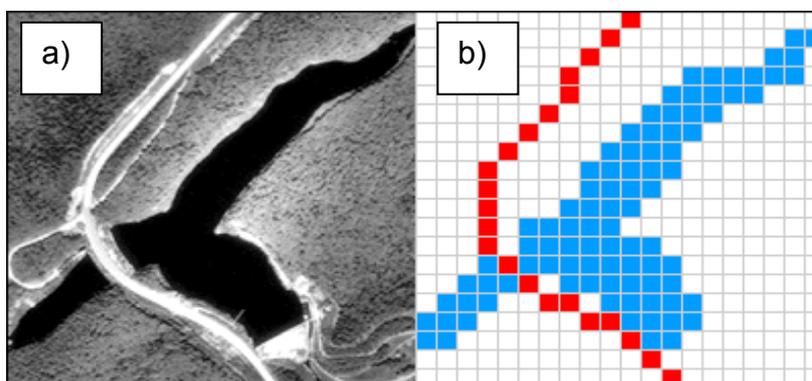


FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO EM FORMATO RASTER DE UMA IMAGEM
FONTE: EMS (2014)

3.5 A FERRAMENTA COMPUTACIONAL INVEST®

A ferramenta computacional InVEST® (*Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs*), traduzindo para o português: Avaliação Integrada de Serviços Ambientais e Compensações foi desenvolvida pelo Natural Capital Project, um programa da Universidade de Stanford (Califórnia / EUA), em parceria com as organizações ambientais The Nature Conservancy – TNC e World Wildlife Fund – WWF (TALLIS *et al.*, 2011).

Trata-se de um conjunto de ferramentas de modelagem matemática voltadas ao mapeamento, quantificação e valoração econômica de serviços ambientais. A ferramenta necessita trabalhar em conjunto com o ArcGis®, software de Sistema de Informações Geográficas. Atualmente o InVEST® dispõe de diversos módulos, tais como (TALLIS *et al.*, 2011):

- Retenção de Sedimentos
- Produção de Madeira Manejada
- Biodiversidade
- Polinização de Culturas
- Biodiversidade Terrestre
- Armazenamento e Sequestro de Carbono
- Hidrelétrica de Produção
- Energia Eólica
- Energia das Ondas
- Vulnerabilidade e Proteção Costeira

Neste estudo foi utilizado o modelo de retenção de sedimentos, que fornece ao usuário uma ferramenta para estimar o potencial de perda de solo e a capacidade de reter sedimentos de uma determinada bacia (TALLIS *et al.*, 2011).

O modelo de retenção de sedimentos é baseado na Equação Universal de Perda de Solo – USLE, desenvolvida por Wischmeier e Smith e será detalhado a seguir com base no guia do usuário do *software* InVEST® (TALLIS *et al.*, 2011).

3.5.1 Funcionamento do modelo de retenção de sedimentos

Inicialmente o modelo estima o potencial de perda de solo com base nas condições climáticas e geomorfológicas, baseado nos fatores erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K) e fator topográfico (LS). Esta parte do modelo é responsável por duas relações importantes. Em áreas onde a intensidade da chuva é elevada, há uma grande probabilidade de ocorrer o desprendimento e transporte de partículas de solo pela ação desta e, se este solo for constituído por grande teor de areia, por exemplo, aumentam as chances de ocorrer a erosão hídrica. O aumento da declividade do terreno e o comprimento da rampa também aumentam o risco erosão. O Potencial de Perda de Solo (PPS) é calculado, então, supondo-se que o solo não possui nenhum tipo de cobertura vegetal (solo nu). A estimativa do potencial de perda no solo é expressa pela equação (2):

$$\text{PPS} = R \times K \times \text{LS} \quad (2)$$

Após o cálculo do PPS, o modelo estima a Perda de Solo, considerando os fatores de cobertura do solo (C) e de práticas conservacionistas (P), a partir da multiplicação de todos os fatores da USLE (equação 1 – item 3.3):

$$\text{PS} = R * K * \text{LS} * C * P \quad (1)$$

A erosão evitada, ou a retenção de sedimentos é calculada pela subtração da equação 2 (PPS) pela equação 1 (PS).

3.5.2 Dados de entrada requeridos

Os dados de entrada requeridos para o modelo de retenção de sedimentos são descritos no Quadro 6.

DADO	DESCRIÇÃO
Bacias hidrográficas	Arquivo digital da delimitação da bacia hidrográfica de interesse e suas sub-bacias
Modelo Digital do Terreno (define o fator LS)	Arquivo digital com a representação matemática da variação do relevo do terreno
Uso e cobertura do solo	Arquivo digital com a informação do tipo de uso e cobertura do solo
Índice de erosividade da chuva – R	Arquivo digital com os valores do índice de erosividade da chuva
Erodibilidade do solo – K	Arquivo digital com valores de erodibilidade do solo
Valores dos fatores C e P	Tabela de dados contendo valores do fator de cobertura do solo (C) e valores do fator de práticas conservacionistas (P)

QUADRO 6 – DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO DE PERDA DE SOLO

FONTE: Adaptado de TALLIS *et al.* (2011)

3.5.3 Dados de saída

Os arquivos de saída do modelo de perda de solo e as denominações utilizadas pelo modelo são descritos no quadro 7.

DESCRIÇÃO	ARQUIVO
Total de Perda Potencial de Solo (PPS) por sub-bacia hidrográfica, em toneladas por hectare.	usle_sm
Tabela contendo os seguintes campos: <u>sed_export</u> : quantidade total de Sedimentos Exportados (SE) para o fluxo, na bacia hidrográfica , em toneladas por ano. <u>Sed_ret_dr</u> : quantidade total de Sedimentos Retidos (SR) pela paisagem na bacia hidrográfica , em toneladas por ano.	sediment_watershed.dbf
Arquivo contendo o total de sedimentos retidos em cada sub-bacia , em toneladas por ano.	sret_sm_wq
Arquivo contendo o total de sedimentos exportados em cada sub-bacia , em toneladas por ano.	sexp_sm

QUADRO 7– ARQUIVOS DE SAÍDA DO MODELO DE PERDA DE SOLO

FONTE: Adaptado de TALLIS *et al.* (2011)

O total de **Perda Potencial de Solo (PPS)** é calculado considerando-se o solo sem nenhum tipo de cobertura, a partir da multiplicação dos fatores R, K e LS (equação 2, pág. 34).

O total de **Sedimentos Exportados (SE)** é calculado pela multiplicação de todos os fatores da USLE (equação 1, pág. 34).

O total de **Sedimentos Retidos (SR)** corresponde à subtração da equação 2 pela equação 1.

A avaliação e comparação destes dados de saída permitem a identificação de sub-bacias mais aptas à produção e transporte de sedimentos e conseqüentemente prioritárias para redução da erosão hídrica.

3.5.4 Limitações do modelo

Como qualquer modelo matemático, a ferramenta InVEST® também possui suas limitações, tais como (TALLIS *et al.*, 2011):

- Prevê a erosão de planícies e encostas suaves; tendo sido verificado apenas em declividades de até 20%;
- Considera apenas o efeito individual de cada variável, entretanto, alguns fatores podem interagir, alterando a taxa de erosão. Por exemplo: um determinado solo pode ter a sua erodibilidade alterada devido à alta concentração de matéria orgânica, proveniente de vegetação morta. Ou a erosividade da chuva pode ser potencializada com a ação de ventos.
- Simula somente a erosão hídrica, não considerando outros tipos de remoção e transporte de sedimentos na bacia, como por exemplo, a erosão causada pela ação do vento, a erosão das margens dos rios, provocada pela própria ação das suas águas, ou por estradas;
- Calcula a perda de solo média anual de cada parcela de terra, não sendo válido para mensurar perda de solo em períodos menores.

Para uma avaliação mais precisa e um resultado mais próximo da realidade, o modelo permite e deve ter constante calibração, com a alimentação de dados que reflitam cada vez melhor a situação real, de preferência os medidos em campo na área de estudo, tais como: determinação da erodibilidade e da erosividade através

de experimentação em parcelas amostrais do terreno, validação em campo do uso e cobertura do solo e identificação do estado de conservação da vegetação.

3.5.5 Exemplos de aplicação do InVEST®

No estudo realizado por Landridge *et al.* (2014), foi utilizado o módulo de vulnerabilidade e proteção costeira para determinar o grau de proteção que certas infra-estruturas naturais, como dunas e zonas úmidas, podem oferecer em regiões costeiras. O uso do InVEST® possibilitou a simulação de diversos cenários em duas regiões costeiras do litoral da Califórnia, sujeitas à tempestades e, conseqüentemente, a erosão da costa e inundações. O trabalho determinou quais as melhores infra-estruturas naturais para proteção costeira dos casos estudados.

No trabalho de Thompson e Fidalgo (2013), foi utilizado o modelo de retenção de sedimentos para classificar as regiões da bacia do rio Guapi – Macacu / RJ, de acordo com as classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta perda de solo. O estudo conclui que a maior limitação encontrada estava na dificuldade de obtenção de dados de entrada necessários ao modelo.

Christo e Garrastazu (2012), também utilizaram o módulo de retenção de sedimentos para determinar a perda de solo na bacia do Alto Vale do Rio do Peixe no município de Caçador / SC. Os autores obtiveram os valores K e R específicos para a área de estudo, com coletas de amostras de solo e experimentos de laboratório. A obtenção de dados em escala local possibilitou uma confiabilidade maior dos resultados.

O módulo de armazenamento e sequestro de carbono do InVEST® foi utilizado para valorar os serviços ambientais na bacia do Alto Vale do Rio do Peixe, no município de Caçador/SC (CASTANHARI *et al.*, 2011). Os autores concluíram que determinados reflorestamentos e florestas nativas existentes na bacia apresentaram o maior valor no que se refere ao sequestro de carbono. Também concluíram que a espacialização dos resultados e a fácil simulação de cenários foi uma grande vantagem do *software*.

O InVEST® foi utilizado para uma avaliação preliminar do Sistema Cantareira, maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo, no que se refere

ao balanço hídrico da bacia e a produção de sedimentos (SAAD *et al.*, 2011). Foi estimada a quantidade de água disponível na bacia para a produção de energia elétrica e a quantidade de sedimentos que a cobertura mantém, evitando com que sejam depositados no reservatório. Também foram feitas simulação para diversos usos do solo. Os autores concluíram que o InVEST® constitui uma ótima ferramenta para apoio à tomada de decisões de cunho ambiental.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta consistiu no uso de um software de modelagem matemática associado a um software de sistema de informações geográficas e, por meio da Equação Universal de Perda de Solo, estimar o potencial de perda de solo e o transporte de sedimentos para o corpo hídrico, em uma bacia de manancial de abastecimento público, definindo assim áreas prioritárias para o controle e redução da erosão hídrica.

No fluxograma da Figura 17 são mostrados os passos metodológicos que serão explicados na sequência.

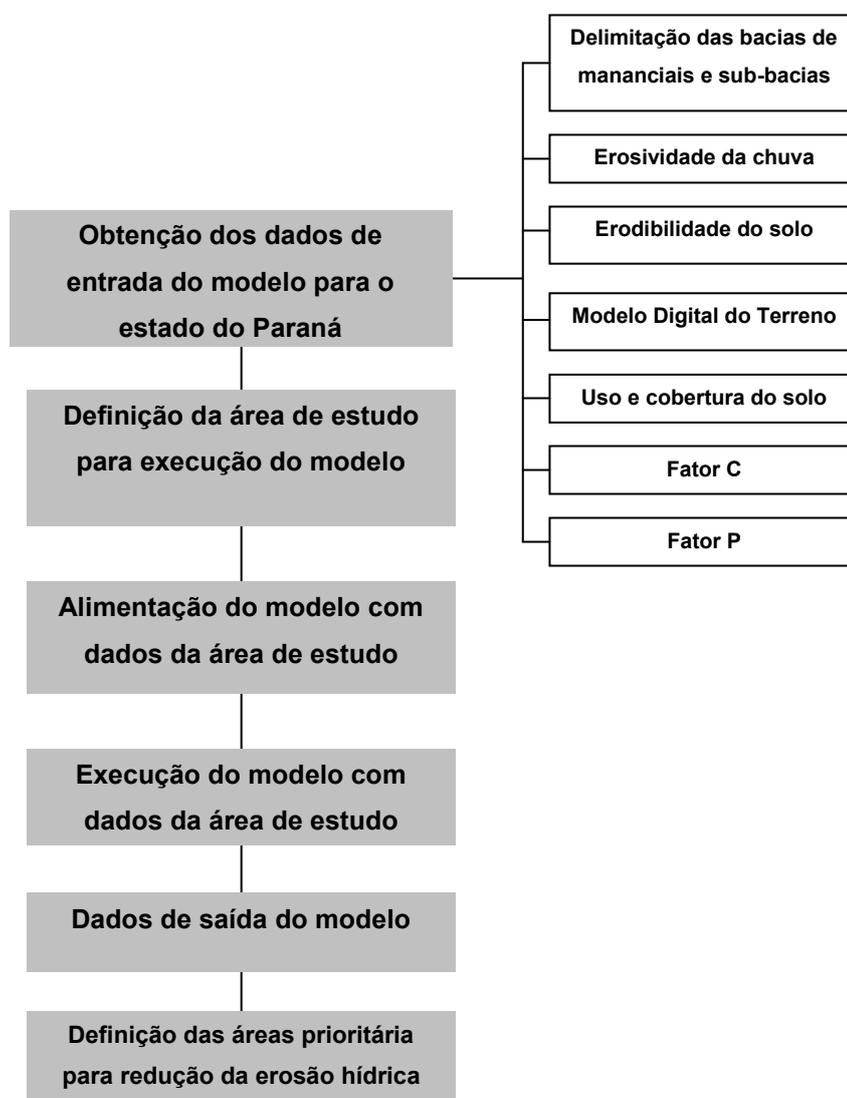


FIGURA 17 – PASSOS METODOLÓGICOS DO ESTUDO

Os dados de entrada necessários para executar o modelo de retenção de sedimentos foram obtidos para todo o Paraná, entretanto, a área para testar a metodologia proposta foi a Bacia de Manancial do Passaúna. O software InVEST® foi alimentado com os dados desta bacia e posteriormente procedido a execução do modelo. Os dados de saída fornecidos (potencial de perda de solo e estimativa do aporte de sedimento para o corpo hídrico) serviram para definir as áreas prioritárias para a redução da erosão hídrica.

4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO PARA O ESTADO DO PARANÁ

Para aplicação do modelo de perda de solo do *software* InVEST® foi necessária a delimitação da bacia hidrográfica de interesse, suas sub-bacias, fator de erosividade da chuva, fator de erodibilidade do solo, modelo digital do terreno, mapa de uso do solo, fator de cobertura do solo (Fator C) e o fator de práticas conservacionistas (Fator P). A forma de obtenção destes dados de entrada, para o estado do Paraná, será explicada a seguir.

4.1.1 Delimitação das bacias de mananciais e suas sub-bacias

Para delimitação das bacias de mananciais do Paraná sob responsabilidade da SANEPAR, primeiramente e necessária a localização espacial dos pontos de captação de água superficial. A localização dos pontos de captação de água da SANEPAR (260 pontos) foram fornecidos pela empresa em meio digital no formato *shapefile* (SANEPAR SIA, 2014), que consiste em um arquivo de dados georreferenciados em formato de vetor.

O traçado das bacias de mananciais e respectivas sub-bacias foi feito utilizando-se as Ottobacias¹ do Estado do Paraná, produto oriundo do projeto denominado de Base Hidrográfica do Estado do Paraná – 1:50.000 concluído em 2011 (AGUASPARANÁ, 2011).

Todos os dados referentes ao projeto Base Hidrográfica do Estado do Paraná foram obtidos por meio do Instituto das Águas do Paraná, autarquia vinculada a Secretaria Estadual do Meio Ambiente.

4.1.2 Erosividade da chuva – Fator R

A erosividade das chuvas para o estado do Paraná foi obtida de Waltrick (2010), o qual determinou a erosividade da chuva para 114 estações pluviométricas, que possuíam séries históricas completas no período de 1986 a 2008 e por interpolação foi gerado um mapa de erosividade da chuva (mapa Isoerodente) para todo o Paraná.

4.1.3 Erodibilidade do solo – Fator K

Para a determinação da erodibilidade do solo, primeiramente foi necessário identificar os tipos de solos presentes em cada bacia de manancial. A informação dos tipos de solo presente em cada bacia foi obtida do Mapa de Solos do Paraná (IAPAR, 2008), trabalho produzido em conjunto entre a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e Iapar (Instituto Agrônômico do Paraná), no ano de 2008.

A erodibilidade de cada tipo de solo foi obtida através de Gómez (2012), o qual compilou dados da literatura de diversos pesquisadores no cálculo do fator K,

¹ Ottobacias do Estado do Paraná: resultante da hierarquização das áreas de contribuição hídrica, definidas a partir da metodologia de Otto Pfstetter (ANA, 2007). É uma bacia relacionada à rede hídrica através de um código hierárquico sendo que para cada trecho da rede existe uma ottobacia.

para vários tipos de solos encontrados no Brasil e então definiu um valor médio para o fator K.

Os valores médios para o fator K dos principais solos são mostrados na tabela 3. Entretanto, um mesmo tipo de solo pode apresentar erodibilidade diferente, dependendo de fatores como a textura, teor de matéria orgânica e agregação.

TABELA 3 – VALORES MÉDIO DO FATOR K

TIPO DE SOLOS	VALOR MÉDIO DE K (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
Argissolos	0,04825
Cambissolos	0,05082
Chernossolos	0,03090
Espodossolos	0,05925
Gleissolos	0,03612
Latossolos	0,01625
Neossolos	0,03506
Nitossolos	0,02375
Organossolos	0,06097
Planossolos	0,00974

FONTE: GÓMEZ (2012)

4.1.4 Modelo Digital do Terreno – MDT

Modelo Digital do Terreno é um arquivo digital que representa a variação do relevo de uma determinada porção da superfície terrestre (Figura 18). Em um MDT cada coordenada de um mapa, de uma determinada região, possui um valor numérico da altitude do ponto em relação ao nível do mar. Por meio do MDT o *software* InVEST® calcula o fator LS (um dos parâmetros da USLE).

O MDT do estado do Paraná foi obtido do projeto denominado de Base Hidrográfica do Estado do Paraná – 1:50.000 concluído em 2011 (AGUASPARANÁ,

2011), que além das ottobacias (citadas no item 4.1.1), produziu Mapa de Relevo do Estado².

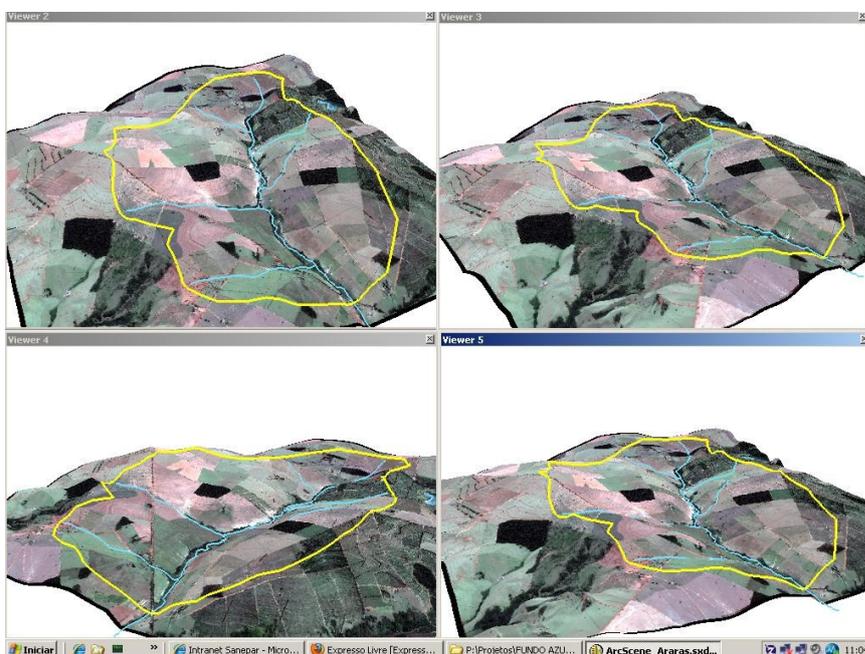


FIGURA 18 – VISUALIZAÇÃO DO MDT DE UMA BACIA DE MANANCIAL
FONTE: Adaptado de AGUASPARANÁ (2011)

Para a obtenção do MDT, referente a cada bacia de manancial, foi utilizado o Mapa de Relevo, um dos produtos do projeto Base Hidrográfica do Estado do Paraná – 1:50.000 (AGUASPARANÁ, 2011).

4.1.5 Uso e cobertura do solo

O uso e cobertura do solo das bacias de mananciais foi obtido por meio dos Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Estado do Paraná (SEDU, 2005). A

² Mapa de Relevo do Estado do Paraná: são curvas de nível de vinte em vinte metros e pontos cotados com as devidas coordenadas e o valor da altitude do ponto, que geraram o respectivo Modelo Digital de Terreno. Teve como base as carta topográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na escala 1:50.000.

confeccção destes mapas foi realizada por empresa contratada pela Secretaria do Desenvolvimento Urbano (SEDU) no ano de 2005. Foram gerados a partir de imagens de satélite (SPOT-5) que abrangem todo o estado. A técnica utilizada para elaboração dos mapas, pela empresa contratada, foi a fotointerpretação das imagens de satélite, que consiste na análise da imagem, observando-se objetos, feições naturais ou alterações, conduzindo à análise da paisagem.

Como exemplo, na Figura 19 é mostrado o recorte de uma imagem proveniente do satélite SPOT-5 e o seu respectivo mapa de uso e cobertura da terra da região de Cascavel. Cada cor no mapa foi utilizada para diferenciar o tipo de classe de uso do solo.

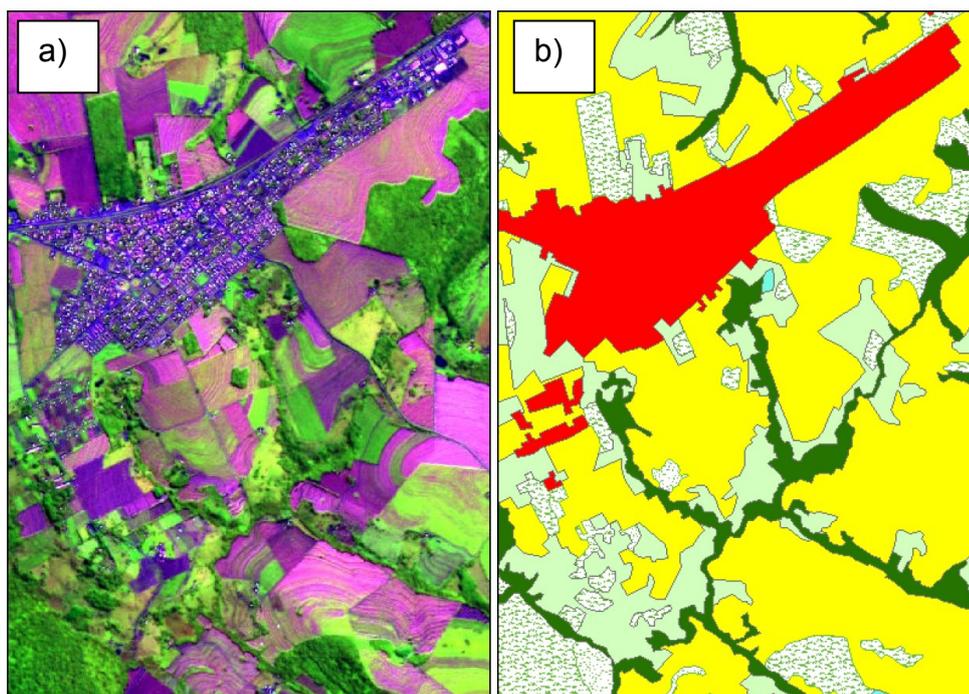


FIGURA 19 - IMAGEM DE SATÉLITE SPOT-5 (a) E SEU RESPECTIVO USO DO SOLO (b)
FONTE: ADAPTADO DE SEDU (2005)

As especificações das classes de uso e ocupação do solo que estão identificadas na Figura 19 (b) são mostradas na Figura 20.

USO DO SOLO	
CLASSES:	
	PASTAGENS E CAMPOS
	AGRICULTURA ANUAL
	FLORESTA ESTAGIO INICIAL
	REFLORESTAMENTOS
	AGRICULTURA ANUAL
	AREA DE MINERACAO
	AREA URBANIZADA E CONSTRUIDA
	CORPOS DAGUA
	FLORESTA ESTAGIO INICIAL
	FLORESTA ESTAGIO MEDIO OU AVANÇADO
	FLORESTA ESTAGIO MEDIO OU AVANÇADO
	MATA CILIAR OU MATA DE GALERIA
	PASTAGENS E CAMPOS
	REFLORESTAMENTOS
	SOLO EXPOSTO
	VEGETACAO DE VARZEA

FIGURA 20 – CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

FONTE: Adaptado de SEDU (2005)

4.1.6 Fator de cobertura do solo – Fator C

O Fator C para cada classe de uso do solo é definido no InVEST® como um valor numérico entre 1 e 100, que se refere ao potencial de proteção do solo devido ao seu uso e cobertura. Para este trabalho foram utilizados os valores padrão do software. Conforme mostra a Tabela 4, que atribui para cada classe de uso do solo um valor para o Fator C. Quanto maior o valor, menor o potencial de proteção do solo.

TABELA 4 – VALORES UTILIZADOS PARA O FATOR C

CLASSE DE USO DO SOLO	FATOR C
Solo exposto	100
Área de mineração	100
Área urbanizada e construída	90
Agricultura anual	60
Pastagens e campo	40
Floresta em estágio inicial	20
Reflorestamento	20
Mata ciliar ou mata de galeria	1
Vegetação de várzea	1
Floresta em estágio médio ou avançado	1

FONTE: UNIVERSIDADE STANFORD (2013)

4.1.7 Fator de práticas conservacionistas – Fator P

Para o presente trabalho não foram definidos os valores do Fator P para cada área agricultável do Paraná, pois o mesmo depende da determinação dos métodos e técnicas de plantio utilizadas. Pode ser obtido através de averiguações em campo ou por fotointerpretação de imagens de satélite ou aéreas, associadas a mapas de declividade do terreno e deve ser feito por técnicos habilitados.

4.2 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAÇÃO DO MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS DO InVEST®

Como área de estudo para execução do modelo foi escolhida a Bacia do Passaúna, devido à importância do reservatório no abastecimento público da cidade de Curitiba, Araucária e Campo Magro e por apresentar características típicas da maioria das bacias de mananciais do Estado, com áreas preservadas e degradadas, uso agrícola e áreas urbanizadas.

4.2.1 Localização

A Bacia de Manancial do Passaúna possui área de drenagem de aproximadamente 151 km² que abrange parte dos municípios de Almirante Tamandaré, Curitiba, Araucária, Campo Largo e Campo Magro. Na Figura 21 é mostrado o mapa de localização da Bacia do Passaúna. O mapa foi elaborado para este trabalho no ArcGis®, a partir dos arquivos *shapefiles* de delimitação dos municípios do Paraná, fornecido pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG, 2007) e das Ottobacias do Estado, fornecido pelo Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANA, 2011).

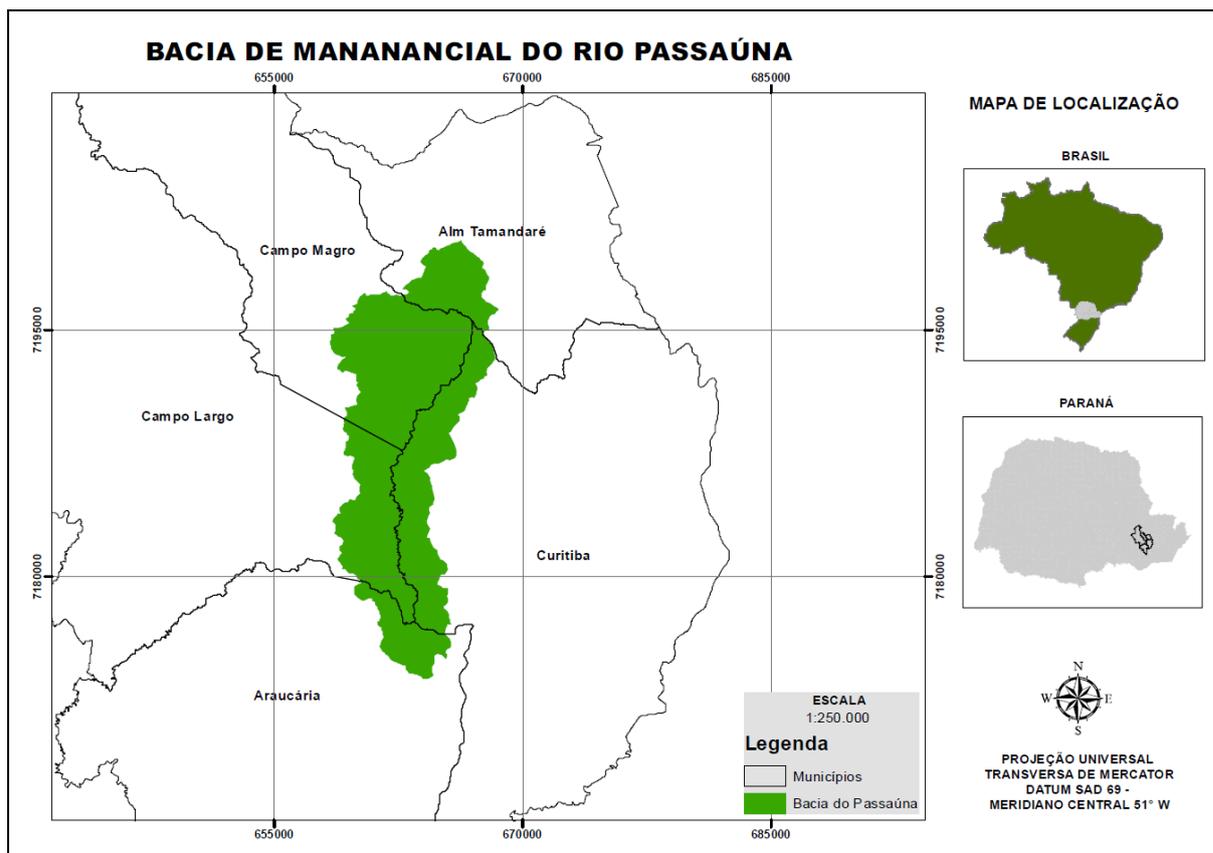


FIGURA 21 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PASSAÚNA

4.2.2 Caracterização

A represa do rio Passaúna teve o seu enchimento concluído em 09/1990 e com isso a região em que ela está inserida passou por transformações significativas. A implantação do sistema público de abastecimento de água na região, a ocupação da bacia pela expansão urbana dos municípios do entorno, o desmatamento e o crescimento de áreas de agricultura, causaram impactos diretos na qualidade da água do reservatório, seja pelo aumento de cargas difusas e esgotos clandestinos, ou pelo aumento da produção de sedimentos, que são transportados para o reservatório (SAUNITTI, 2003).

Nos estudos realizados por Saunitti (2003), o transporte de sedimentos para o reservatório está relacionado, principalmente, à erosão superficial do solo, devido ao plantio próximo as margens, desmatamento de fundos de vales e zonas ribeirinhas e plantio e pastagens em solos com alta declividade.

Com o intuito de preservar a bacia do Rio Passaúna em 1991 foi instituída, por meio do Decreto Estadual nº 458, a APA – Área de Proteção Ambiental do Passaúna e em 1995 foi elaborado o seu primeiro Zoneamento Ecológico Econômico – ZEE, através do Decreto Estadual nº 832. Mesmo sendo um local que possui prioridade para preservação, a APA tem enfrentado problemas de poluição dos rios e ocorrência de ocupações irregulares que acabam por influenciar para uma queda da qualidade ambiental da bacia hidrográfica como um todo (SAUNITTI, 2003).

Segundo Xavier (2005), a Bacia do Passaúna apresenta boa aptidão agrícola, fazendo com que exista uma grande quantidade de propriedades rurais, dedicadas principalmente ao cultivo de alimentos, mas na maioria delas não são adotadas práticas agrícolas conservacionistas. A região é ocupada, além das áreas de agricultura, por chácaras de lazer, núcleos urbanos de classes baixa e média e áreas industriais.

De acordo com os levantamentos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2000) a geologia da região é formada por diferentes unidades litoestratigráficas de períodos distintos, compreendendo: Complexo Atuba (período: Proterozóico Inferior), Grupo Açungui (período: Proterozóico Superior), diques de rochas básicas (período: Mesozóico), Formação Guabirota e sedimentos inconsolidados (período: Cenozóico).

A bacia possui altitudes variando de 875 m a 1050 m (EMBRAPA, 1984) e o clima da região é mesotérmico úmido, sem estação seca, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C e verões frescos. A vegetação da bacia é composta por campos naturais (campos secos e várzeas), Floresta Ombrófila Mista e vegetação secundária (BIGARELLA, 1985).

4.3 ALIMENTAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

Após ter sido instalado o *software* InVEST®, os dados referentes à área de estudo foram inseridos por meio do ArcGis®, na seguinte sequência e formato:

- Modelo Digital do Terreno – Arquivo digital em formato *raster*.
- Fator de erosividade da chuva – Arquivo digital em formato *raster*.
- Fator de erodibilidade do solo – Tabela com informação do tipo de solo e respectivo valor de erodibilidade
- Mapa de uso do solo – Arquivo digital em formato *shapefile* com polígonos classificados de acordo com a classe de uso e ocupação do solo.
- Delimitação da bacia de manancial - Arquivo digital em formato *shapefile* com a delimitação da bacia de manancial da área de estudo.
- Delimitação das sub-bacias - Arquivo digital em formato *shapefile* com a delimitação das sub-bacias da bacia de manancial da área de estudo.
- Fator C e Fator P – Tabela com o valor de P e C para cada classe de uso do solo.

4.4 EXECUÇÃO DO MODELO DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO

Após a preparação dos dados de entrada, instalação do *software* InVEST® e alimentação dos dados o modelo de retenção de sedimentos foi executado para a área de estudo (Bacia do Passaúna).

Cabe salientar que o modelo de retenção de sedimentos foi executado a partir de dados que refletem uma determinada época, como por exemplo, o uso e cobertura do solo. Como este dado foi gerado a partir de imagens de satélite do ano de 2005, pode não refletir exatamente a situação atual. Os demais dados foram obtidos por meio de estudos executados em épocas diferentes, entretanto, não devem apresentar variações significativas.

4.5 DADOS DE SAÍDA DO MODELO

Os dados de saída gerados pelo InVEST® foram os seguintes:

- Potencial de perda de solo de cada sub-bacia;

- Sedimentos exportados para o reservatório (total da bacia e em cada sub-bacia);
- Sedimentos retidos pela paisagem (total da bacia e em cada sub-bacia).

4.6 DEFINIÇÃO DAS ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA REDUÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA NA ÁREA DE ESTUDO

A partir da análise dos dados de saída foi possível identificar qual a sub-bacia que apresentou a estimativa de maior transporte de sedimentos para o reservatório e, conseqüentemente, a que deve ser a prioritária para elaboração e execução de projetos que visem o controle e diminuição da erosão hídrica.

5. RESULTADOS

A metodologia para identificação de áreas prioritárias para controle e redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná, apresentada neste trabalho, está descrita como um manual de utilização do *software* InVEST®, a partir do estudo de caso na Bacia do Passaúna. Os resultados apresentados referem-se à obtenção dos dados de entrada do modelo para todo o estado do Paraná e a modelagem foi executada somente para a Bacia do Passaúna.

O roteiro para instalação do *software* InVEST®, contendo a explicação para *download* do programa, instalação e configuração, se encontra no Apêndice 1.

5.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA PARA O ESTUDO DE CASO

Os dados de entrada, apresentados no item 4.1, necessitam ser preparados para alimentação do *software* InVEST®, conforme segue:

5.1.1 Bacia de manancial e sub-bacias

O traçado da bacia a ser analisada deve estar em formato *shapefile*, com uma coluna na sua tabela de atributos denominada de “ws_id”, com atributo em formato numeral inteiro para a bacia (apenas para identificação da bacia). Na Figura 22 é mostrada a tabela de atributos do *shapefile* referente à bacia de manancial do Passaúna.

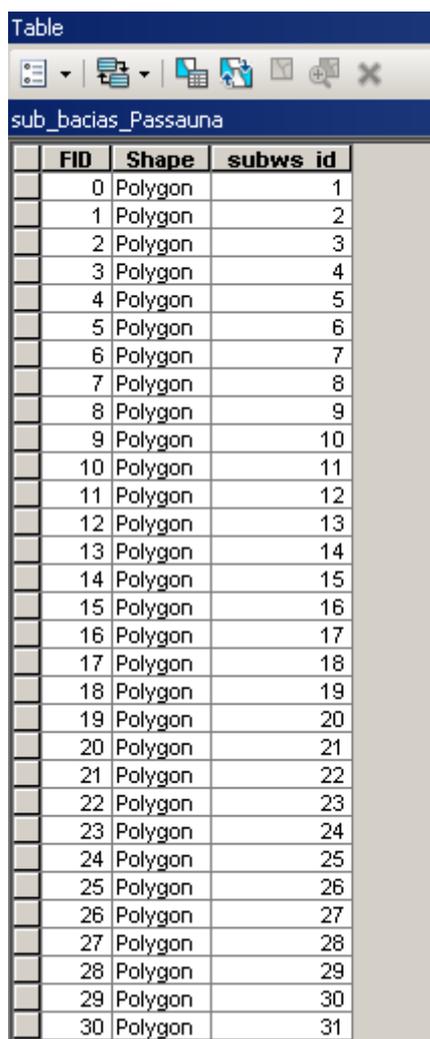


FID	Shape	ws_id
0	Polygon	1

FIGURA 22 – TABELA DE ATRIBUTOS DA BACIA

FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

O traçado das sub-bacias deve estar em formato *shapefile*, com uma coluna na tabela de atributos denominada “subws_id”, com atributo em formato numeral inteiro para cada sub-bacia (apenas para identificar cada sub-bacia), conforme mostra a Figura 23.



FID	Shape	subws_id
0	Polygon	1
1	Polygon	2
2	Polygon	3
3	Polygon	4
4	Polygon	5
5	Polygon	6
6	Polygon	7
7	Polygon	8
8	Polygon	9
9	Polygon	10
10	Polygon	11
11	Polygon	12
12	Polygon	13
13	Polygon	14
14	Polygon	15
15	Polygon	16
16	Polygon	17
17	Polygon	18
18	Polygon	19
19	Polygon	20
20	Polygon	21
21	Polygon	22
22	Polygon	23
23	Polygon	24
24	Polygon	25
25	Polygon	26
26	Polygon	27
27	Polygon	28
28	Polygon	29
29	Polygon	30
30	Polygon	31

FIGURA 23– TABELA DE ATRIBUTOS DAS SUB-BACIAS

FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

O traçado da Bacia do Passaúna e suas sub-bacias são mostrados na Figura 24. O mapa da Figura 29 foi elaborado no ArcGis® a partir do arquivo *shapefile* das Ottobacias do estado do Paraná.

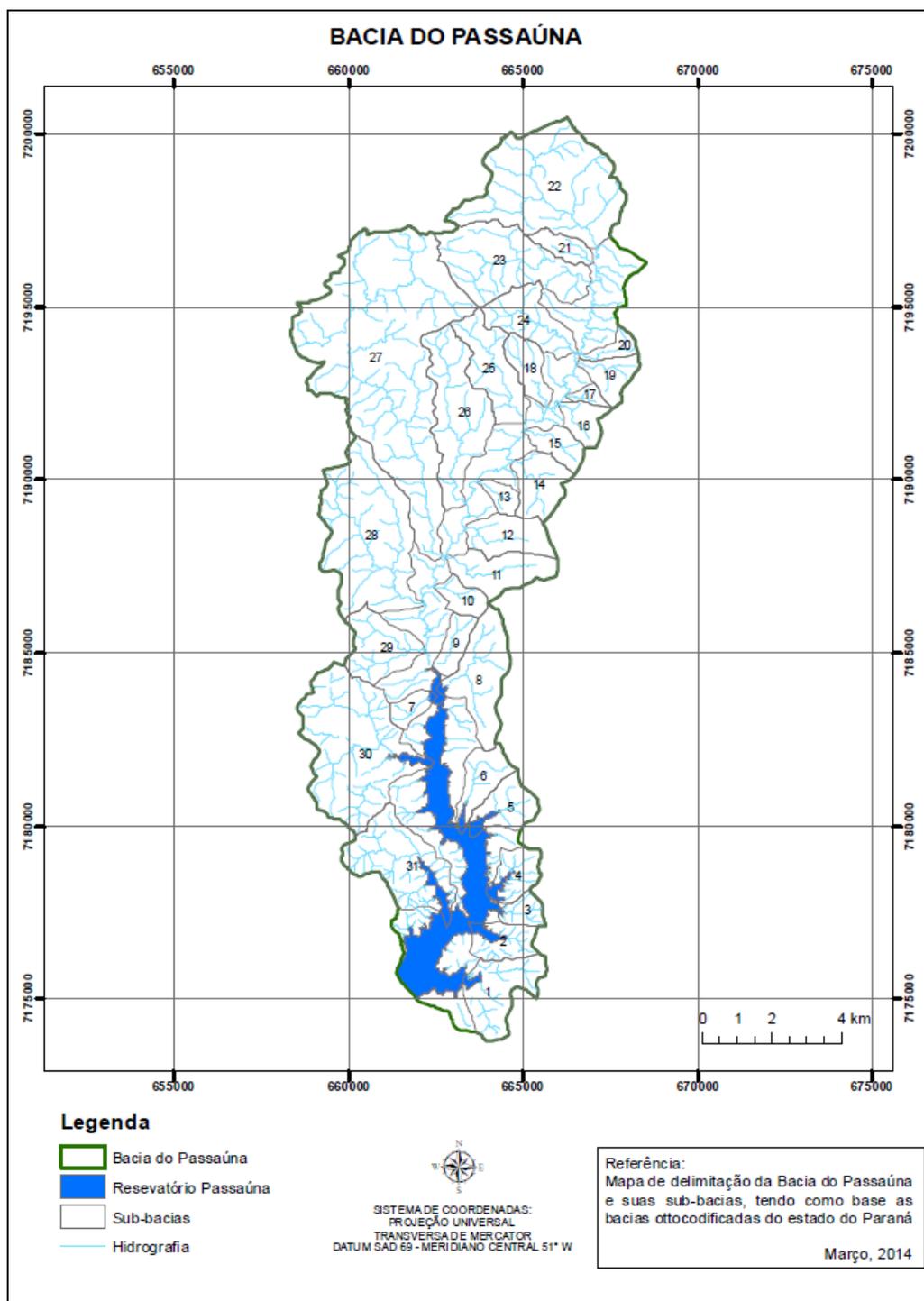


FIGURA 24 – MAPA DA BACIA DO PASSAÚNA E SUAS SUB-BACIAS

5.1.2 Erosividade da chuva – fator R

O mapa de erosividade da chuva deve estar em formato *raster*, com valor do fator R para cada célula. O mapa de erosividade do Paraná é mostrado na Figura 25 e foi elaborado no ArcGis® a partir da interpolação dos valores de erosividade da chuva de 114 estações meteorológicas, da rede meteorológica do Instituto Agrônomo do Parana – IAPAR, do Instituto Tecnológico SIMEPAR e do Instituto das Águas do Paraná – AGUASPARANÁ.

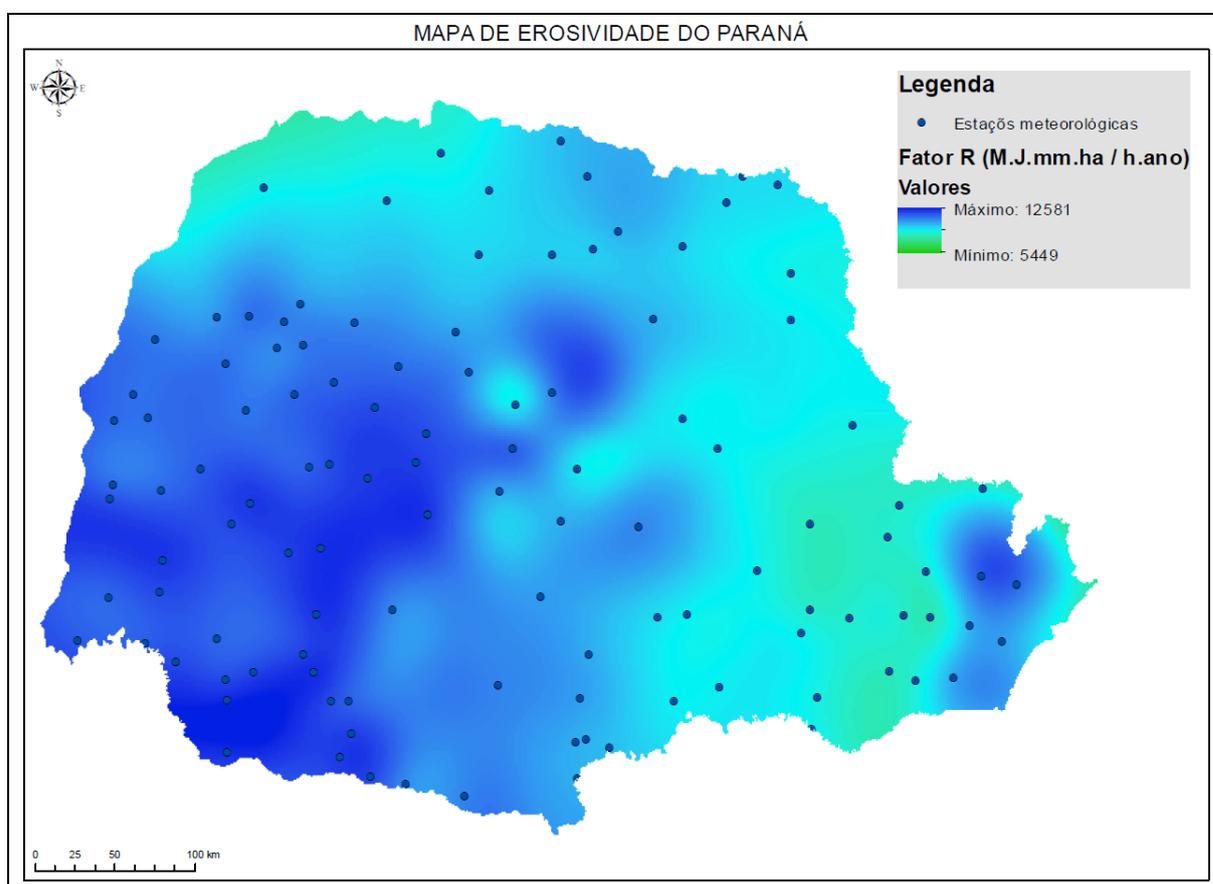


FIGURA 25 – MAPA DE EROSIVIDADE DO PARANÁ

O mapa de erosividade da Bacia do Passaúna (Figura 26) foi feito a partir do recorte da bacia sobre o mapa de erosividade do Estado.

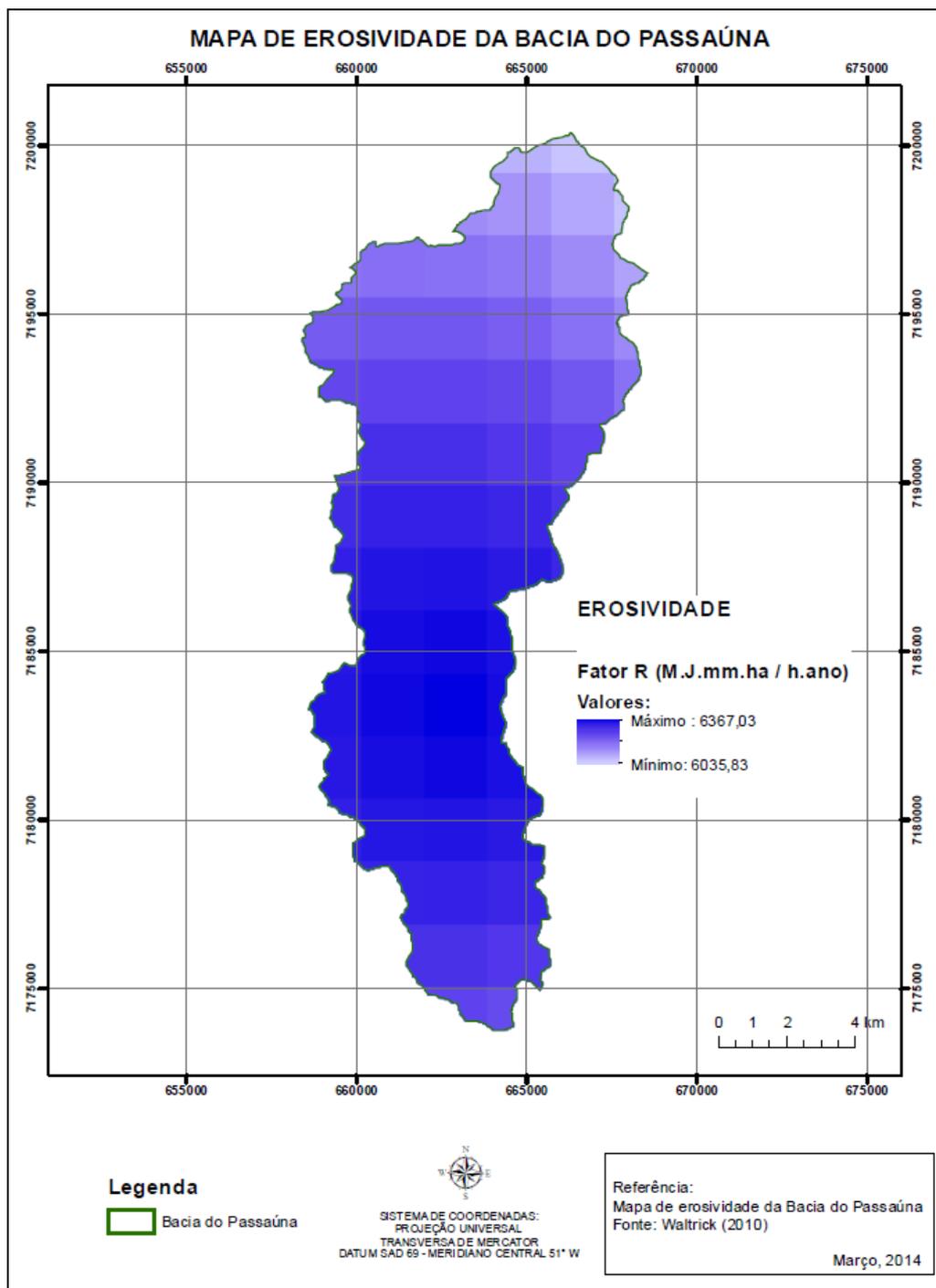


FIGURA 26 – MAPA DE EROSIVIDADE DA BACIA DO PASSAÚNA

Como pode ser observado no mapa da Figura 26, a erosividade da Bacia do Passaúna possui valores entre 6035,83 à 6367,03 M.J.mm.ha /h.ano, predominando valores mais elevados no meio da bacia e menos elevados na extremidade superior.

5.1.3 Erodibilidade do solo – fator K

O fator de erodibilidade do solo deve estar atrelado aos tipos de solos existentes na bacia, onde cada tipo deve ter atribuído o seu respectivo valor de K. Na Figura 27 é mostrado o mapa de solos do Paraná, elaborado no ArcGis® a partir do arquivo *shapefile* fornecido pelo Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR, 2008).

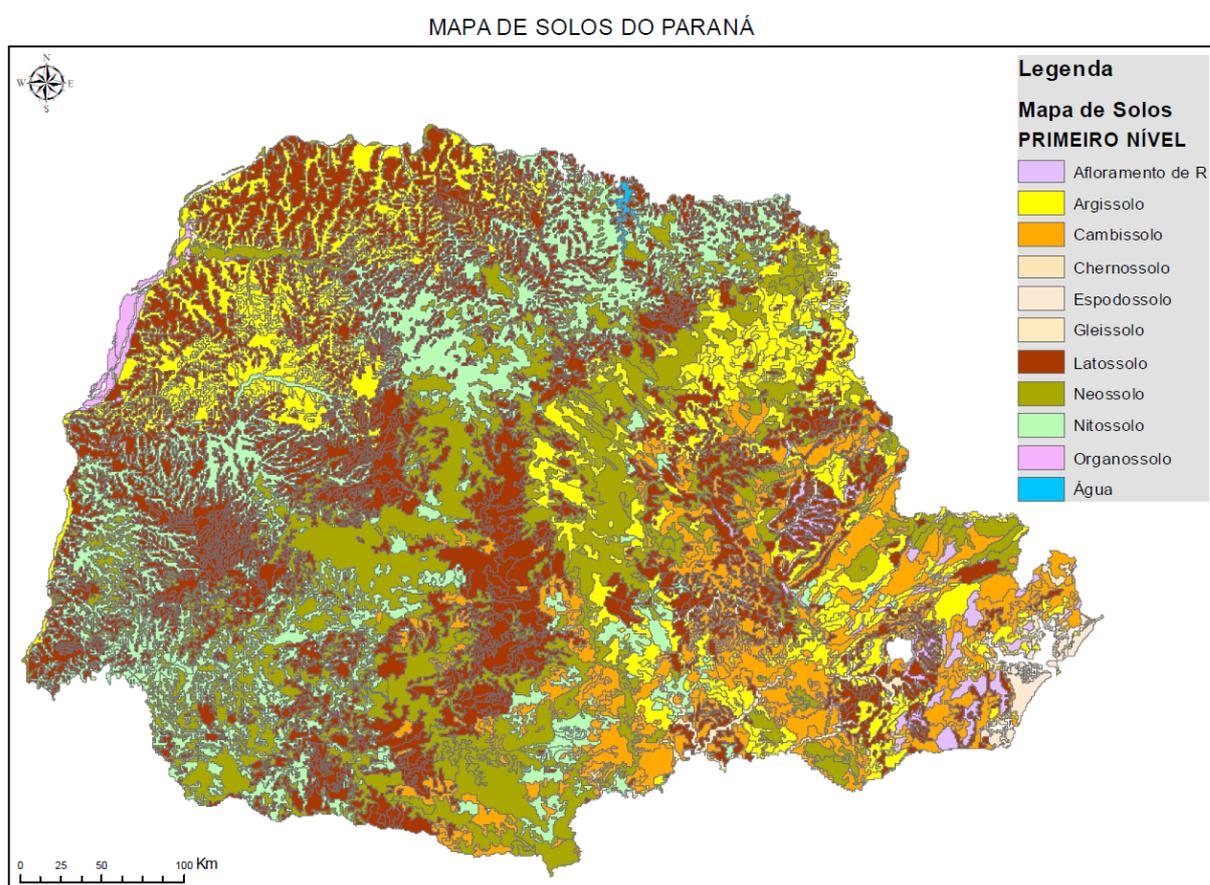


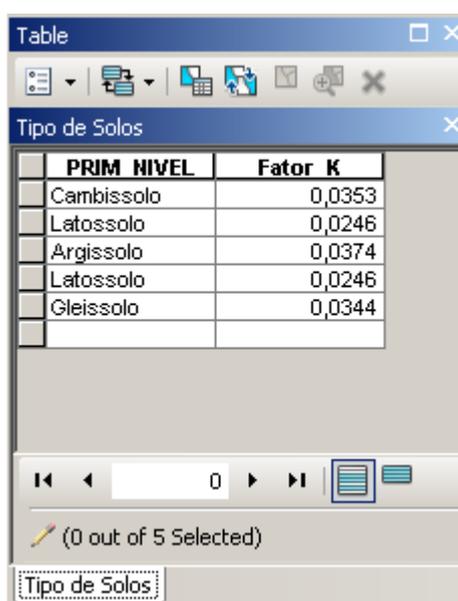
FIGURA 27 - MAPA DE SOLOS DO PARANÁ

Na Tabela 5 é mostrado os tipos de solos presentes na Bacia do Passaúna com o seu respectivo valor do fator K, de acordo com Gomez (1995).

TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DO FATOR K

TIPO DE SOLO	VALOR MÉDIO DE K (t.h.MJ)
Argissolo	K= 0,0374
Cambissolo	K= 0,0353
Gleissolo	K= 0,0344
Latossolo	K = 0,0246

Na tabela de atributos do *shape* do tipo de solos deve conter uma coluna com o valor do fator K (de acordo com a Tabela 5), conforme mostra a Figura 28.



The screenshot shows a window titled 'Table' with a sub-window titled 'Tipo de Solos'. The table contains the following data:

PRIM NIVEL	Fator K
Cambissolo	0,0353
Latossolo	0,0246
Argissolo	0,0374
Latossolo	0,0246
Gleissolo	0,0344

Below the table, there is a navigation bar with a progress indicator showing '0' and a status bar indicating '(0 out of 5 Selected)'. The window title at the bottom is 'Tipo de Solos'.

FIGURA 28 – TABELA DE ATRIBUTOS DO *SHAPEFILE* TIPO DE SOLO
 FONTE: IAPAR, 2008

Na Figura 29 é apresentado o mapa de solos da Bacia do Passaúna, elaborado no ArcGis® a partir do arquivo *shapefile* fornecido pelo Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR, 2008).

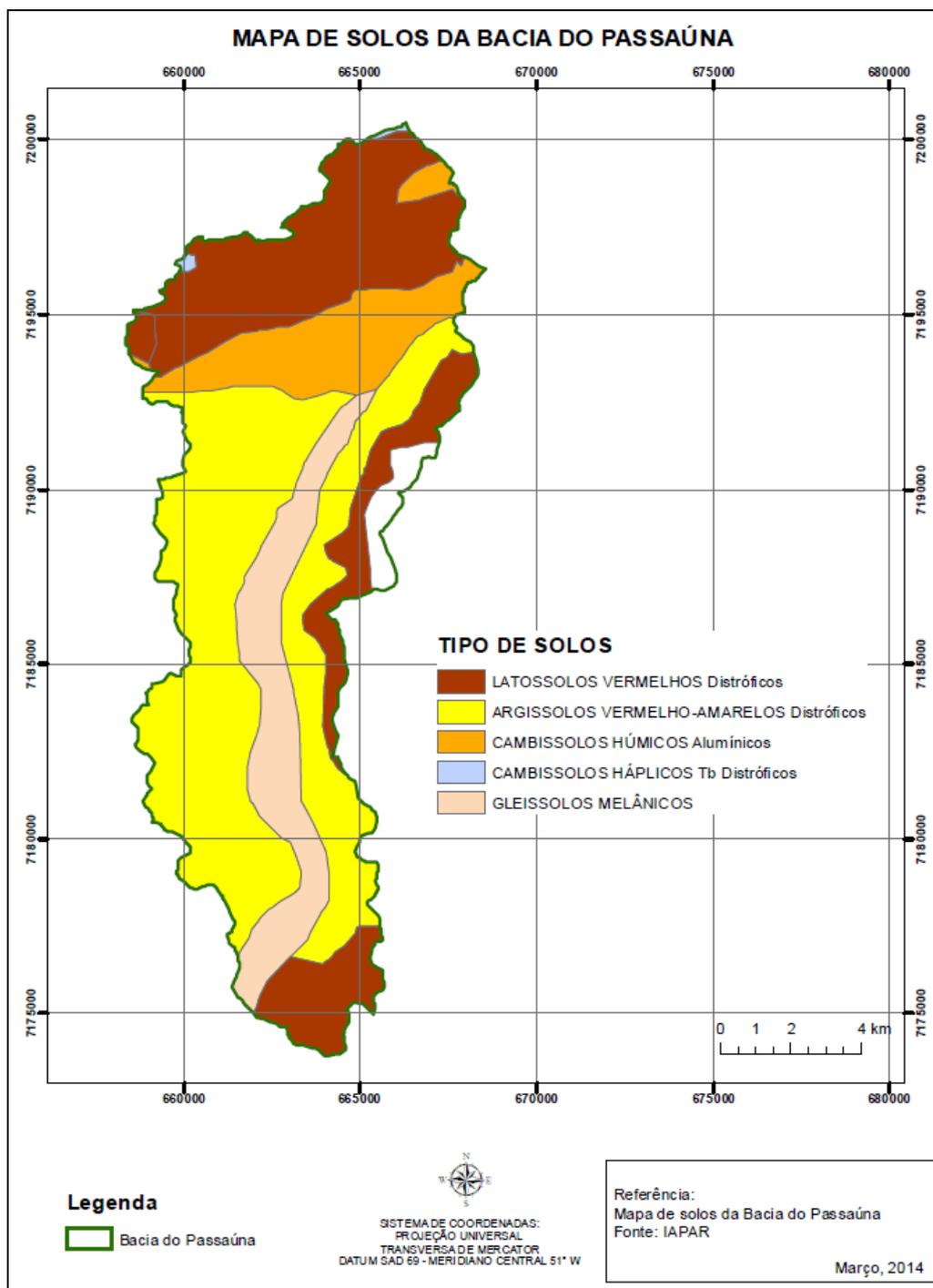


FIGURA 29 – MAPA DE SOLOS DA BACIA DO PASSAÚNA

Como pode ser observado no mapa da Figura 29, o Argissolo é o solo predominante na Bacia do Passaúna, ocupando 43,2 % da área da bacia.

5.1.4 Modelo Digital do Terreno – MDT

O Modelo Digital do Terreno deve estar em formato *raster*, com valor de altitude (em metros) para cada célula. O MDT referente à bacia do Passaúna é apresentado na Figura 30. O mapa foi elaborado no ArcGis® por meio do arquivo *raster* fornecido pelo Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANA, 2011).

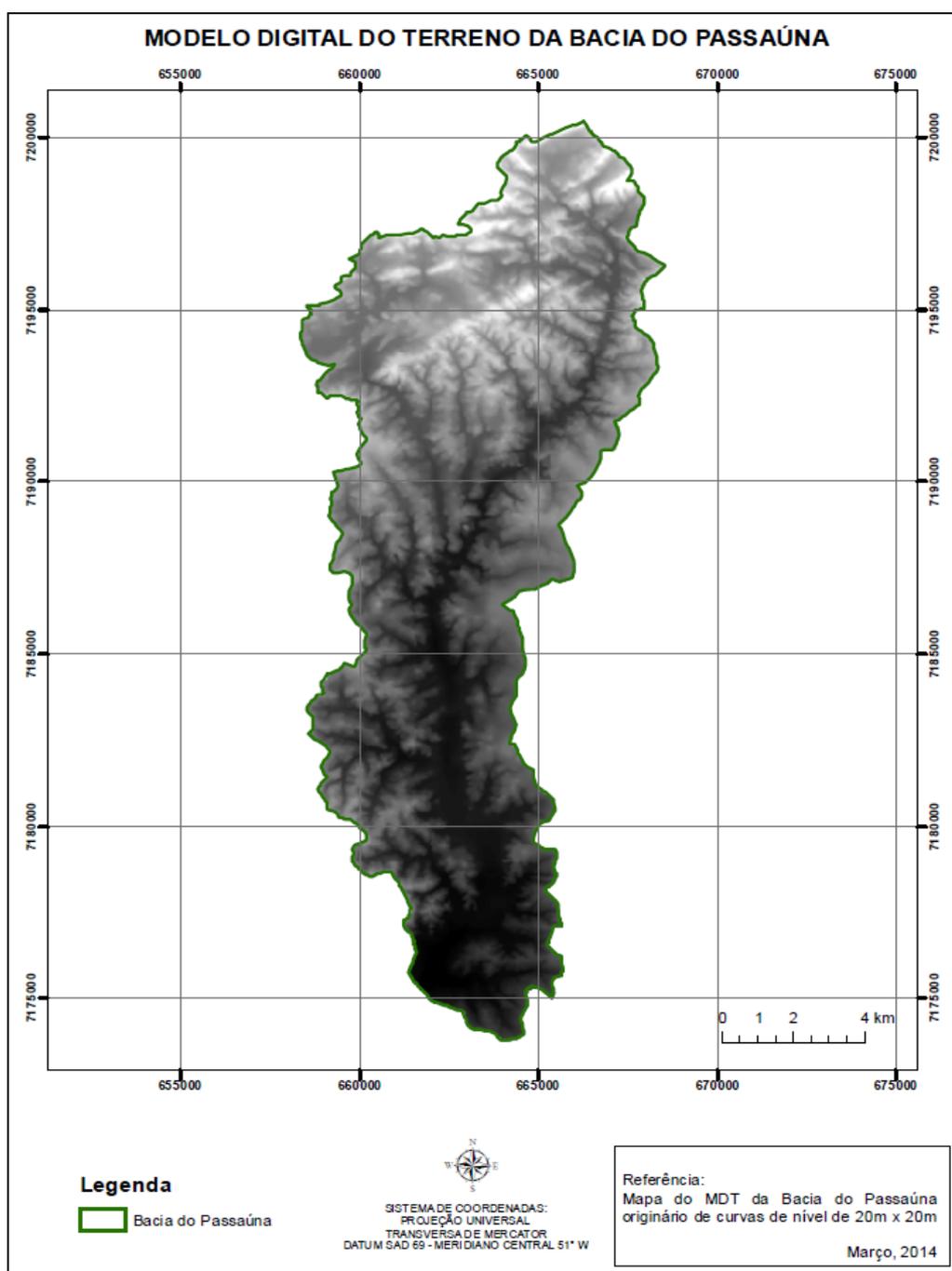


FIGURA 30 – MDT DA BACIA DO PASSAÚNA

As áreas mais escuras no MDT da Figura 30 representam áreas com altitude mais baixa, fundos de vale e corpos hídricos. As áreas mais claras representam altitudes mais elevadas. Na Bacia do Passaúna observa-se uma variação de altitude de 874 m à 1100m.

5.1.5 Mapa de uso do solo

O mapa de uso do solo deve estar em formato *raster*, com um código numérico inteiro para cada classe de solo na sua tabela de atributos (coluna denominada LUCODE), conforme Figura 31.



The screenshot shows a software window titled "Table" with a toolbar at the top. Below the toolbar, the window title is "uso_solo1". The main content is a table with two columns: "CLASSE" and "LUCODE". The table contains 12 rows of data. Below the table, there is a navigation bar with a "0" in the center, and a status bar indicating "(0 out of 12 Selected)".

CLASSE	LUCODE
AREA URBANIZADA E CONSTRUIDA	1
CORPOS D'AGUA	2
MATA CILIAR OU MATA DE GALERIA	3
AREA DE MINERACAO	4
REFLORESTAMENTOS	5
SOLO EXPOSTO	6
VEGETACAO DE VARZEA	7
AGRICULTURA ANUAL	8
FLORESTA ESTAGIO MEDIO OU AVANÇADO	9
FLORESTA ESTAGIO INICIAL	10
PASTAGENS E CAMPOS	11
REFLORESTAMENTOS	12

FIGURA 31 – TABELA COM CÓDIGO NUMÉRICO PARA CLASSE DE SOLO
FONTE: SEDU, 2005

Na Figura 32 é mostrado o mapa de uso do solo da Bacia do Passaúna, elaborado a partir do arquivo *shapefile* fornecido pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano (SEDU, 2005)

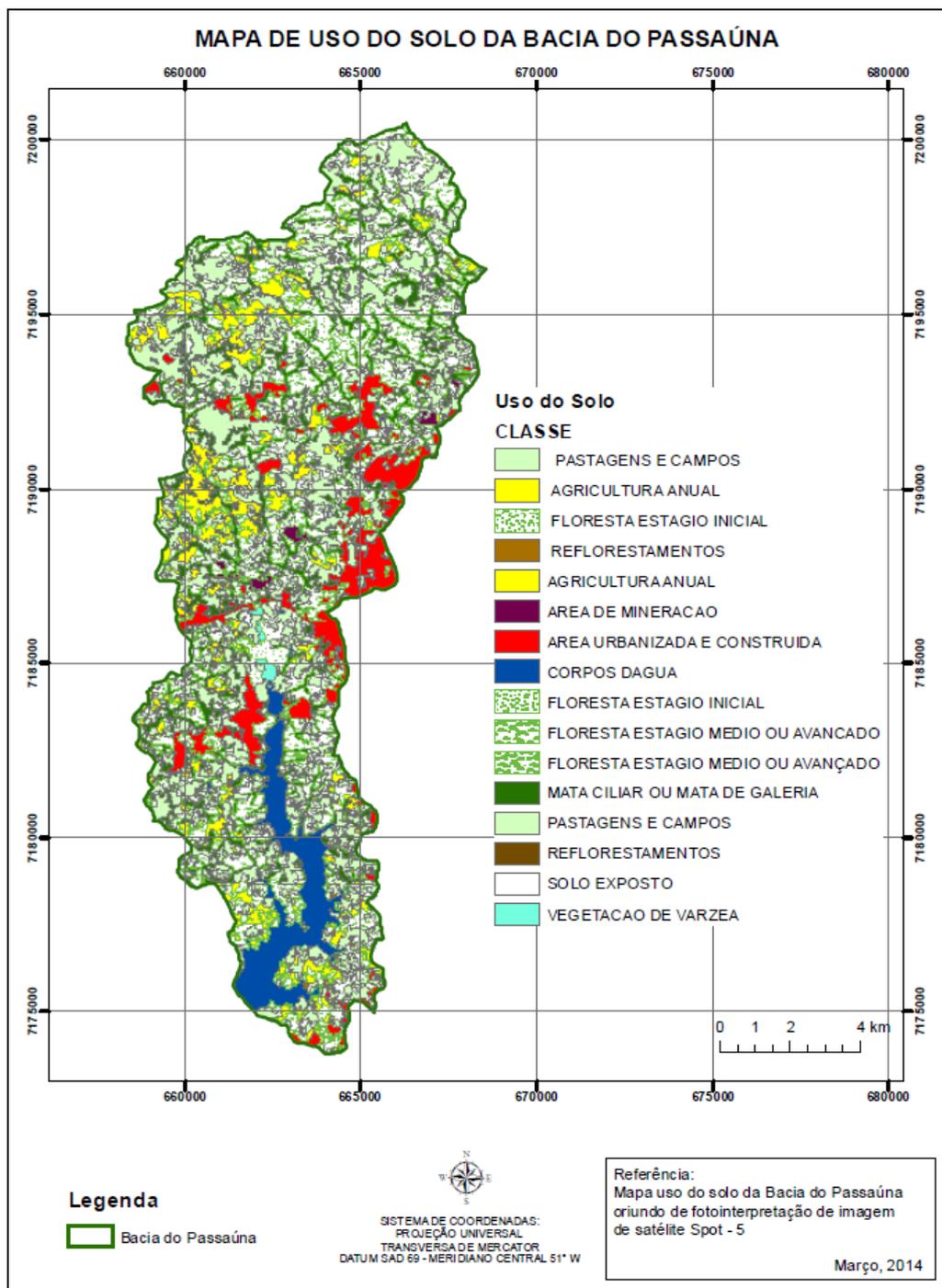


FIGURA 32 – MAPA DE USO DO SOLO DA BACIA DO PASSAÚNA

A partir do mapa de uso do solo da Bacia do Passaúna (Figura 32), foram gerados os quantitativos das classes de uso (Tabela 6).

TABELA 6 – QUANTITATIVO DAS CLASSES DE USO DO SOLO

Uso do solo	Área (km²)
Floresta Estágio Médio ou Avançado	45,56
Pastagens e Campos	44,51
Mata Ciliar	18,93
Agricultura Anual	13,78
Área Urbanizada e Construída	12,77
Corpos d'água	8,7
Floresta em Estágio Inicial	5,62
Área de Mineração	0,7
Vegetação de Varzea	0,39
Reflorestamento	0,28
Solo Exposto	0,03
Total	151,27

5.1.6 Fatores C e P

A entrada dos dados referentes aos fatores C e P da USLE para a Bacia do Passaúna está apresentada na Tabela 7. Esta tabela vem pré-definida pelo *software* (nomeada de tabela biofísica) e contém as seguintes colunas:

TABELA 7 – TABELA BIOFÍSICA REQUERIDA PELO INVEST® ESPECÍFICA PARA A BACIA DO PASSAÚNA

LULC	lucode	usle_c	usle_p	sedret_eff
Área urbanizada e construída	1	90	0	5
Corpos d'água	2	1	0	100
Mata ciliar ou mata de galeria	3	1	0	80
Área de mineração	4	100	0	5
Reflorestamento	5	20	0	20
Solo exposto	6	100	0	1
Vegetação de várzea	7	1	0	80
Agricultura anual	8	60	100	30
Floresta em estágio médio ou avançado	9	1	0	80
Floresta em estágio inicial	10	20	0	70
Pastagens e campo	11	40	100	50

- **LULC**: nome da classe de uso do solo (deve ser preenchida de acordo com a coluna CLASSE da tabela 7.
- **lucode**: código numérico para cada classe solo (deve ser preenchida de acordo com a coluna LUCODE da tabela 7.
- **usle_c**: valor numérico entre 1 e 100 que expressa o fator C para cada classe de uso do solo, refere-se ao potencial de proteção do solo devido ao seu tipo de uso e cobertura. Quanto maior o valor, menor o potencial de proteção.
- **usle_p**: valor numérico entre 1 e 100 que expressa o fator P para cada classe de uso do solo. Refere-se ao potencial de perda de solo relacionado com a prática conservacionista utilizada no plantio. Quanto maior o valor, maior o potencial de perda de solo.
- **sedret_eff**: valor numérico entre 1 e 100 que se refere ao potencial de retenção de sedimentos para cada classe de uso do solo. Este campo identifica a capacidade da vegetação para reter sedimentos. Quanto maior o valor, maior a capacidade de reter sedimentos.

Para o preenchimento das colunas **usle_c** e **sedret_eff**, foram utilizados os valores padrão fornecido pelo *software*.

Para o preenchimento da coluna **usle_p**, optou-se escolher o valor do fator P como 100 para todas as áreas agricultáveis, pastagens e campos, pois neste trabalho não foi determinado o tipo de plantio e manejo do solo utilizado em cada área de agricultura da bacia. Para outras classes de uso do solo que não se referem a áreas agricultáveis, pastagens ou campos o valor de P foi estipulado como zero.

A partir da determinação em campo ou por imagem de satélite do tipo de plantio e manejo do solo da propriedade rural, o valor do fator P pode ser obtido de tabelas com valores para as práticas conservacionistas utilizadas, como a tabela mostrada no item 3.3.5.

5.3 EXECUÇÃO DO MODELO

Após a preparação dos dados de entrada o modelo de perda de solo foi executado para a Bacia do Passaúna seguindo as etapas que serão demonstradas a

seguir. Estas etapas podem ser replicadas para qualquer bacia de manancial do Paraná, desde que os dados sejam preparados para cada área de interesse.

Etapa 1: Abrir o ArcGis® e inserir todos os dados de entrada (descritos no item 4.3).

Etapa 2: No *ArcToolbox*, selecionar a ferramenta InVEST® 2.6.0 e iniciar o modelo de perda de solo (1 Soil less), conforme mostra a Figura 33.

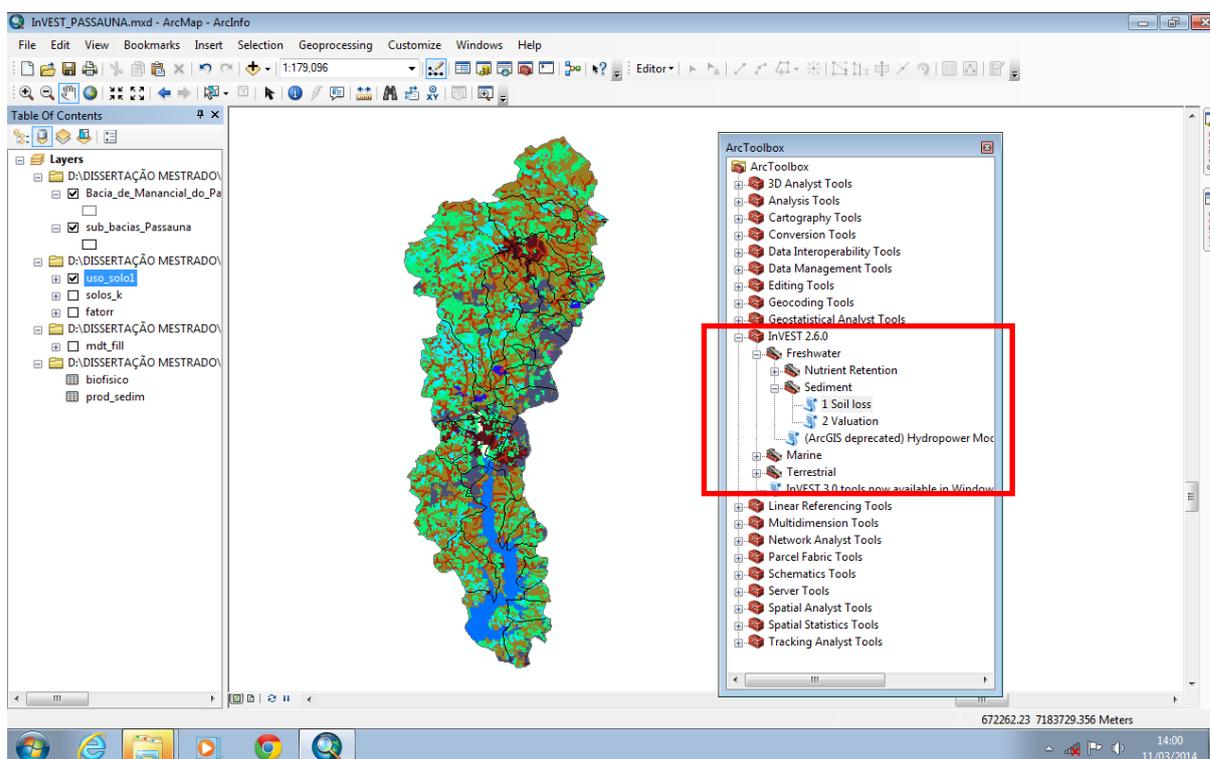


FIGURA 33 – VISUALIZAÇÃO DA SELEÇÃO DO MODELO DE PERDA DE SOLO
 FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

Etapa 3: Preencher os dados da janela que aparecerá na tela (Figura 34), especificando o caminho de cada dado de entrada, a seguir selecionar a tecla Ok (no inferior da janela).

O primeiro campo (A) refere-se ao local onde deverão ser salvos os dados de saída do modelo, os demais, o local onde estão armazenados os dados de entrada, nesta sequência: Modelo Digital do Terreno (B), mapa de erosividade (C), mapa de

erodibilidade (D), mapa de uso do solo (E), delimitação da bacia (F), delimitação das sub-bacias (G), tabela biofísica (H) e tabela de produção de sedimentos (I).

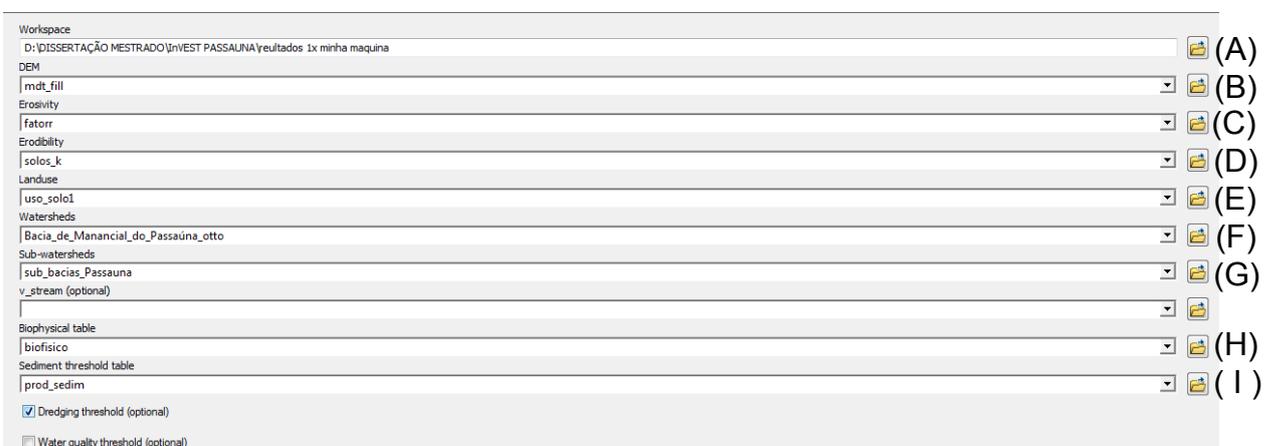


FIGURA 34 – INSERÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO

FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

O modelo irá iniciar e, se não ocorrer nenhum erro, apresentará ao final do processo a mensagem: “*Completed*”. Caso ocorra algum erro, o programa interrompe a execução e mostra em qual dado de entrada encontrou o erro.

5.4 DADOS DE SAÍDA

Os dados de saída resultantes da modelagem de perda de solo, executada na Bacia do Passaúna, referem-se ao potencial de perda de solo, sedimentos exportados para corpo hídrico e sedimentos retidos pela paisagem. Estes dados são salvos pelo InVEST® em pasta e nome padrão, da seguinte maneira:

- **Output\usle_sm:** arquivo no formato *raster* contendo o potencial de perda de solo por sub-bacia, em toneladas por ano.
- **Output\sedimento_subwatershe.dbf:** tabela contendo valores biofísicos para cada sub-bacia, como os campos da seguinte forma:
 - **sed_export:** quantidade total de sedimentos exportados para o corpo hídrico, em toneladas por ano.

- **sed_ret_dr:** quantidade total de sedimentos retidos pela paisagem, em toneladas por ano.

A partir dos dados de saída foram gerados os mapas do potencial de perda de solo da Bacia do Passaúna e o mapa de exportação de sedimentos para o corpo hídrico (rio Passaúna).

Como pode ser observado na tabela da Figura 35 (tabela com o potencial de perda de solo), a sub-bacia de número 27 tem o maior potencial de perda de solo por ano (2.421,17 toneladas), sendo que as bacias 28 e 31 têm o maior potencial de perda de solo por hectare (47,55 toneladas/ha e 36,23 toneladas/há).

subws_id	Area	Perda solo ano (toneladas)	Perda solo ha/ano (toneladas)
1	349,8021	2785,13	8,05
2	182,4638	3531,86	19,35
3	94,3102	1744,67	18,5
4	176,3369	4591,96	26,04
5	210,572	3651,73	17,34
6	200,0329	2294,47	11,47
7	87,7944	608,78	6,93
8	418,4799	2208,85	5,28
9	124,4277	1654,17	13,29
10	110,2345	751,69	6,82
11	287,0585	1837,25	6,4
12	245,8029	2369,95	9,64
13	70,2555	1348,82	19,2
14	237,2119	936,29	3,95
15	131,8354	614,88	4,66
16	126,6551	2604,25	20,56
17	43,3813	639,41	14,74
18	158,2843	1526,03	9,64
19	142,9286	1282,8	8,97
20	76,8645	1340,47	17,44
21	105,2043	2864,83	27,23
22	1113,2798	18143,98	16,3
23	673,7182	13354,57	19,82
24	303,2798	3092,83	10,2
25	355,6346	2587,62	7,28
26	604,1985	13599,19	22,51
27	2421,1759	66360,44	27,41
28	1018,0036	48411,47	47,55
29	311,5407	8017,49	25,73
30	1048,2025	28812,4	27,49
31	556,1787	20149,15	36,23

FIGURA 35 – TABELA COM O POTENCIAL DE PERDA DE SOLO DE CADA SUB-BACIA
 FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

Na Tabela 8 são mostrados os níveis de erosão e o potencial de perda de solo (colunas 1 e 2), de acordo com Pereira (2006) e o resultado da modelagem por sub-bacia e respectivo percentual (colunas 3 e 4).

TABELA 8 – PERCENTUAL DO POTENCIAL DE PERDA DE SOLO POR SUB-BACIA

Nível da erosão	Potencial de perda de solo (tonelada/ha.ano)	sub-bacias (ws_id)	Percentual (%)
Muito baixo	< 6	8,14 e15	9,7
Baixo	6 a 11	1, 7, 10, 11, 12, 18, 19,24 e 25.	29,0
Moderado	11 a 22	2, 3, 5, 6, 9, 13, 16, 17, 20,22 e 23.	35,5
Alto	22 a 33	4, 21, 26, 27,29 e 30.	19,4
Severo	>33	28 e 31	6,4

FONTE: ADAPTADO DE PEREIRA (2006)

A partir do arquivo de saída **sedimento_subwatershe.dbf**, foi gerado um mapa do potencial de perda de solo da Bacia do Passaúna (Figura 36) e o mapa da estimativa da exportação de sedimentos (Figura 37).

As áreas em branco nos mapas das Figuras 36 e 37 são consideradas áreas de contribuição direta do corpo hídrico principal (rio Passaúna).

O resultado da modelagem estimou um total de sedimentos exportados para o rio Passaúna da ordem de 30.340 toneladas por ano. Apesar das sub-bacias 28 e 31 possuírem o maior potencial de perda de solo por hectare, a sub-bacia 27 é a que apresenta a maior estimativa de exportação de sedimentos (8.407 toneladas por ano). Para controle da qualidade da água, a análise da exportação de sedimentos total de cada sub-bacia é a que deve ser levada em consideração para priorizar ações. Por esta razão a sub-bacia 27 foi considerada a prioritária para ações de controle da erosão hídrica e a conseqüente diminuição do aporte de sedimentos e contaminação do manancial.

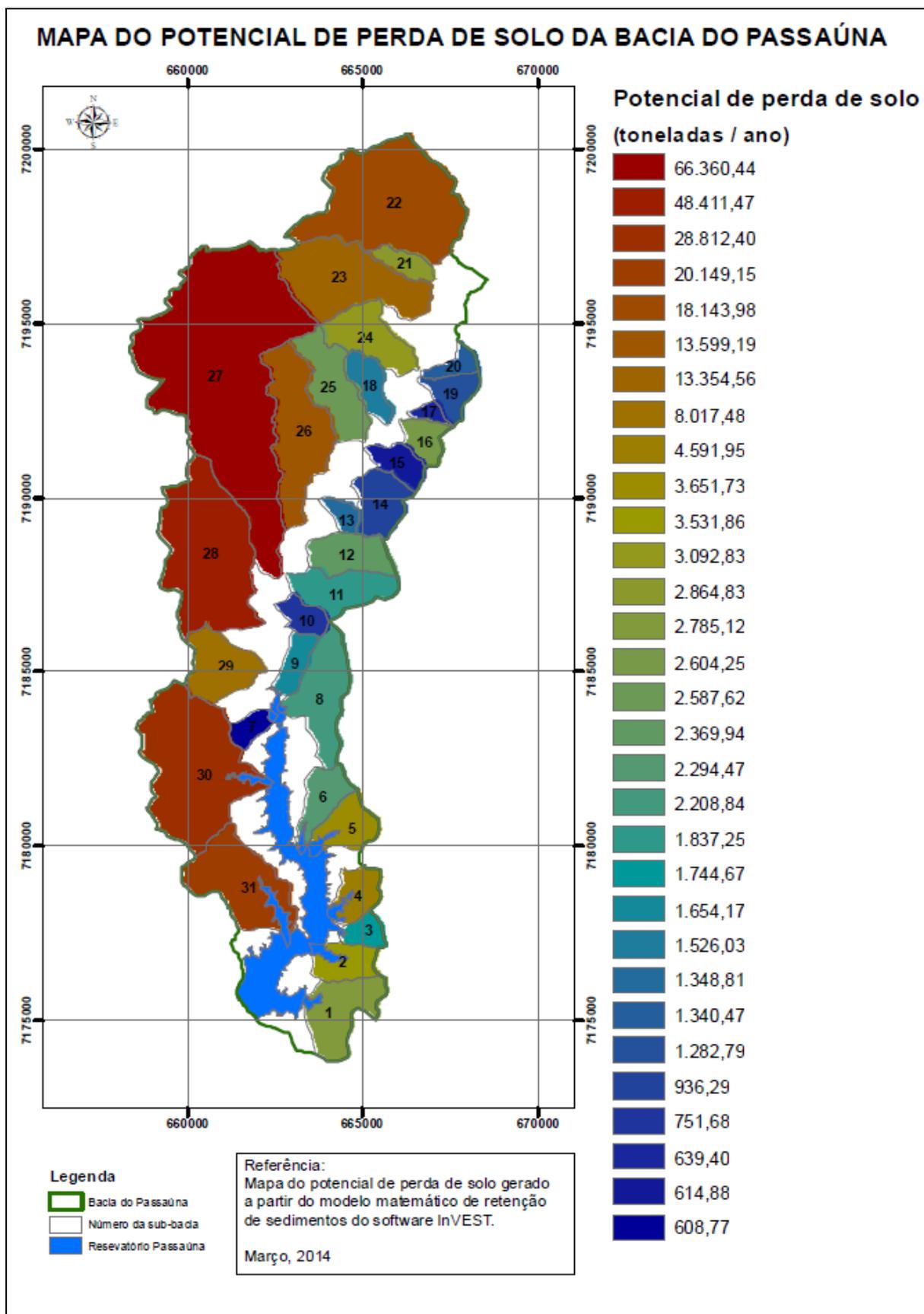


FIGURA 36 – MAPA DO POTENCIAL DE PERDA DE SOLO DA BACIA DO PASSAÚNA

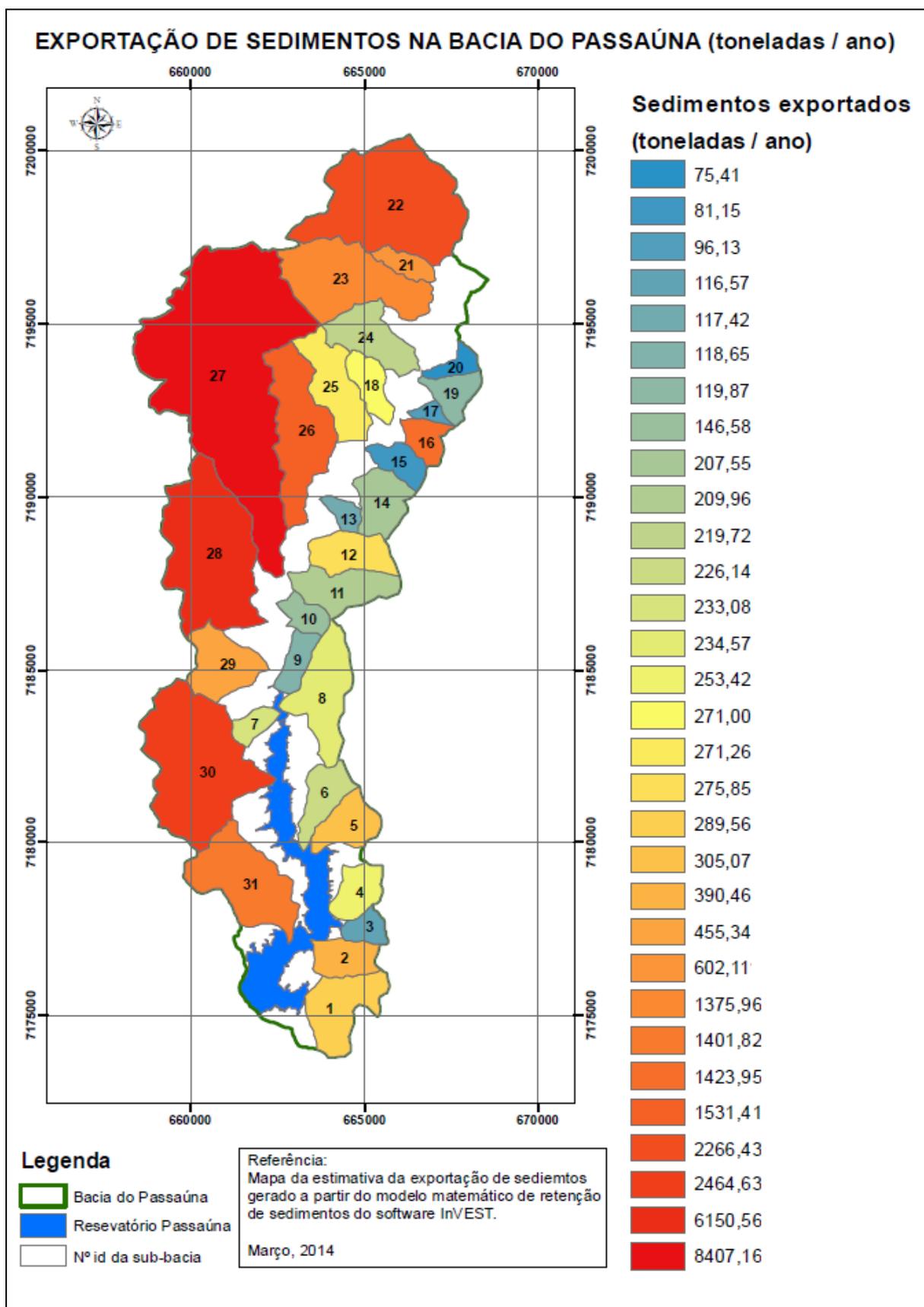


FIGURA 37 – MAPA DA ESTIMATIVA DA EXPORTAÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA DO PASSAÚNA

Por meio dos Mapas de Uso e Cobertura da Terra (SEDU, 2005), observou-se que a sub-bacia nº 27 (Figura 38), possui a maior parte ocupada por pastagens e campos (41%) e uma razoável porção (17%) por agricultura anual (Figura 39), o que pode explicar, em parte, a sua estimativa de exportação de sedimentos.

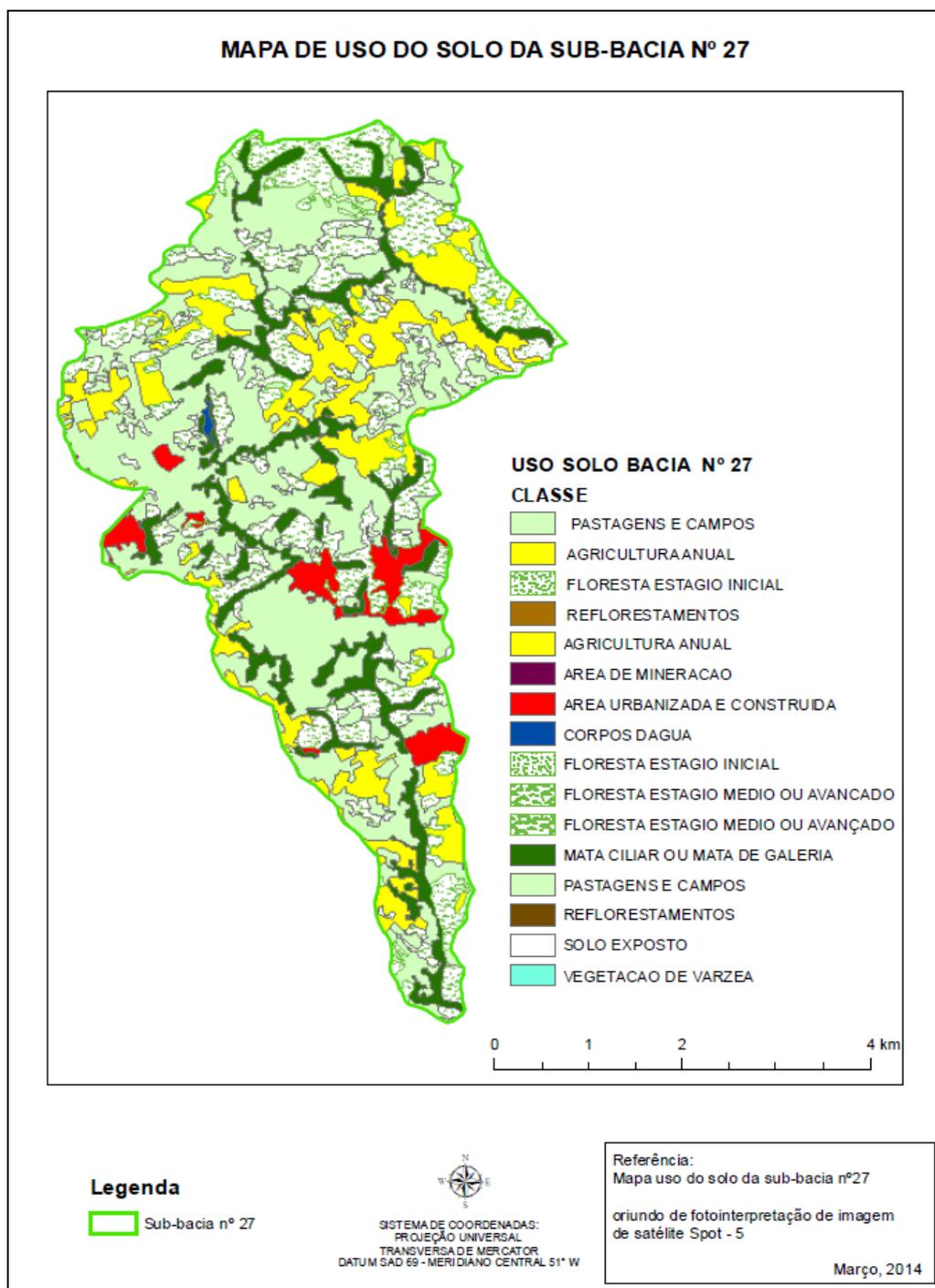


FIGURA 38 – MAPA DE USO DO SOLO DA SUB-BACIA Nº 27 DA BACIA DO PASSAÚNA

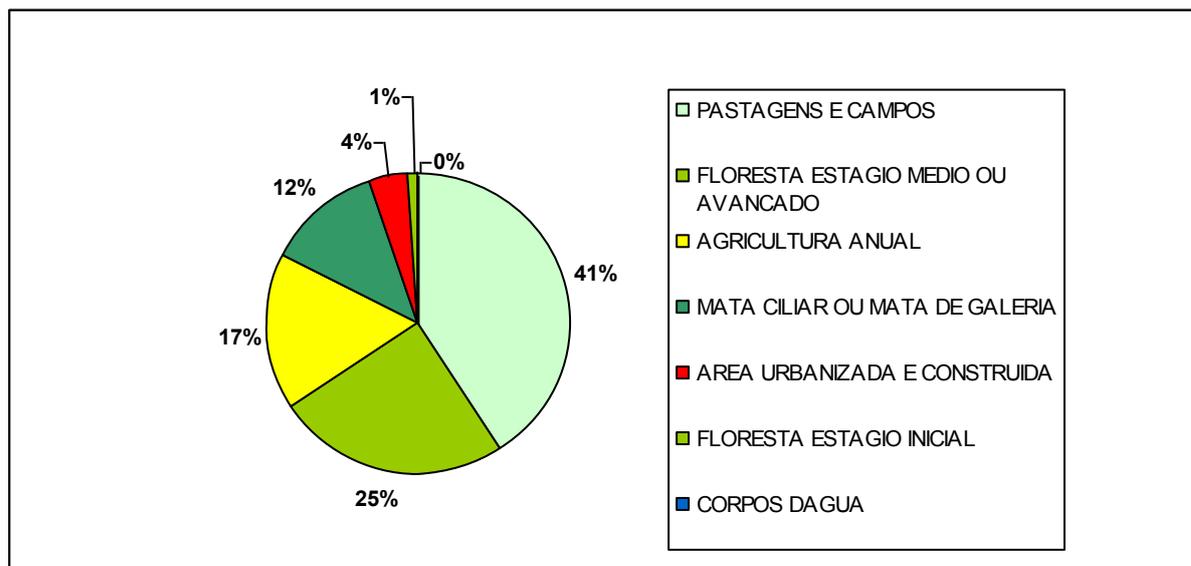


FIGURA 39 – PORCENTAGENS DO USO DO SOLO NA SUB-BACIA Nº 27

6. DISCUSSÕES

A utilização da Equação Universal de Perda de Solo para estimar a erosão hídrica no meio rural é utilizada há várias décadas. Ainda possui limitações, mas é considerado o modelo empírico mais adequado para tal. O avanço da informática facilitou a utilização da USLE, permitindo que diversas análises fossem feitas de forma bastante simples e rápida, servindo de suporte para a tomada de decisões. O uso de Sistemas de Informações Geográficas com a utilização de dados espacializados melhora consideravelmente o conhecimento do território a ser analisado. Contudo, ainda temos como grande desafio a obtenção de informações e dados a respeito do meio físico.

A obtenção dos dados de entrada do modelo para o estado do Paraná foi possível devido ao grande número de informações a respeito do território atualmente disponível. Cabe salientar que o Paraná é um dos estados mais avançados no que diz respeito ao mapeamento e levantamento de dados fisiográficos, o que possibilitou o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho.

O projeto denominado Base Hidrográfica do Estado do Paraná, que codificou e delimitou todas as bacias hidrográficas, unificou a hidrografia e gerou os Modelos Digitais de Terreno - MDT, para todo o Estado, é pioneiro no país.

O imageamento por satélite, realizado no ano de 2005, de todo o território do Paraná, que resultou nos mapas de uso e ocupação do solo, foi e continua sendo o maior imageamento em termos de área já realizado no Brasil. Entretanto, estas informações nem sempre são de conhecimento geral de pesquisadores, técnicos e especialistas que poderiam utilizar tais dados em suas pesquisas e projetos.

O MDT da bacia do Passaúna, utilizado neste trabalho, foi gerado a partir de curvas de nível de vinte em vinte metros. Para regiões com pouca variação de altitude, isto pode representar um fator de erro na determinação do Fator LS da USLE, pois pequenas variações do relevo não são representadas neste tipo curvas de nível. Para a determinação mais acurada e precisa do relevo, pode-se optar por realizar um levantamento por topografia, por restituição aerofotogramétrica ou por imageamento por laser aerotransportado (tecnologia Laser Scanner).

O uso e cobertura do solo da bacia do Passaúna refletem a realidade da época do imageamento por satélite (ano de 2005) e pode não representar a situação atual de algumas regiões. Atualmente, encontram-se disponíveis imagens aéreas e orbitais recentes de inúmeras regiões do país, o que pode possibilitar a determinação do uso e ocupação mais fidedigna da realidade atual.

A erodibilidade dos solos pode variar bastante em um mesmo tipo de solo, dependendo da região e das condições físico químicas deste solo. Entretanto, como as áreas das bacias de mananciais da SANEPAR, em sua maioria, são áreas pequenas (70% são menores que 10.000 ha), espera-se que um mesmo tipo de solo na bacia não tenha variação significativa na sua erodibilidade. Para áreas maiores, sugere-se a determinação da erodibilidade dos solos por meio de experimentos com solos específicos da região estudada.

A erosividade da chuva também é um fator que, em se tratando de áreas pequenas, não costuma variar muito, pois a chuva em geral será uniforme em toda a bacia.

Para este trabalho não foi obtido o Fator C para a realidade do Paraná ou do País. Foram utilizados os valores padrão do *software*, definidos em função da situação nos Estados Unidos. Contudo, como não se pretende, com a metodologia apresentada, a obtenção de valores quantitativos para a estimativa da exportação de sedimentos e sim uma comparação entre sub-bacias, o erro foi atenuado, pois os mesmos valores foram considerados para toda a bacia. Para refinamento dos resultados, sugere-se a obtenção destes valores para a realidade brasileira e mais especificamente para o Paraná.

O Fator P não foi determinado devido à inexistência de dados referentes às práticas conservacionistas utilizadas em todas as propriedades rurais da bacia. Estes dados podem ser obtidos de levantamentos em campo ou por meio de imagens de satélite atuais. Estas análises somente podem ser feitas por técnicos capacitados para tal.

A modelagem de perda de solo, executada na bacia do Passaúna, identificou a sub-bacia de número 27 como a de maior estimativa de exportação de sedimentos. Esta bacia possui 58% da sua área ocupada por pastagens, campos e agricultura anual. Este fato, aliada ao tamanho da sub-bacia 27, explica o resultado (estimativa de exportação de sedimentos de 8407,16 toneladas por ano). Contudo, o resultado

poderá ser alterado se for constatada a utilização de práticas conservacionistas nestas áreas, em detrimento de outras áreas da bacia. O levantamento das práticas conservacionistas, em toda a bacia a ser analisada, é de extrema importância para a melhora da análise e priorização da sub-bacia.

A modelagem da bacia do Passaúna, neste primeiro momento, serviu apenas para validar a metodologia proposta neste trabalho. A obtenção de dados mais atuais e averiguações em campo deverão ser executadas quando da aplicação efetiva da metodologia na bacia com a finalidade de priorizar investimentos.

Outra vantagem da modelagem proposta foi a possibilidade de estudar cenários hipotéticos na bacia, alterando-se parâmetros de uso e ocupação do solo ou das práticas conservacionistas, para analisar cenários futuros.

Práticas conservacionistas de manejo do solo como: plantio em curvas de nível, adequação de estradas rurais, recuperação e proteção de áreas de preservação permanente, uso de plantio direto, entre outras, poderão ser usadas para evitar ou diminuir a erosão hídrica no meio rural.

Por fim, a calibração deste modelo pode ser realizada através da análise sedimentológica de diversos pontos do corpo hídrico ou por meio da análise de turbidez e vazão dos tributários de cada sub-bacia.

7. CONCLUSÕES

A obtenção dos dados de entrada da Equação Universal de Perda de Solo para todo o estado do Paraná foi o grande mérito deste trabalho, pois possibilitou que metodologia proposta possa ser utilizada em qualquer bacia de manancial de abastecimento público do Paraná, não se restringindo ao estudo de caso.

Por ser a erosão hídrica a principal causa de contaminação dos mananciais no estado do Paraná, o controle e diminuição deste fenômeno devem ser os principais objetivos de projetos ambientais que visem manter ou melhorar a qualidade e quantidade das águas superficiais destinadas ao abastecimento público.

Os recursos financeiros destinados para conservação, proteção ou recuperação de bacias de mananciais, normalmente não são suficientes para resolver todos os problemas ambientais da bacia. Isto faz com que procuremos ferramentas que auxiliem na tomada de decisões, com definição de áreas prioritárias, para uma melhor eficácia dos projetos.

Muitos projetos de recuperação, conservação e proteção ambiental de bacias de mananciais elaborados pela SANEPAR, não levam em conta a questão da erosão, mesmo esta sendo um dos maiores causadores da contaminação de mananciais. Pretende-se que a metodologia apresentada neste estudo seja utilizada para direcionar e priorizar projetos desta natureza na companhia e com isso melhorar a disponibilidade e qualidade da água nas captações.

A ferramenta computacional InVEST se mostrou bastante simples e acessível para simular a erosão hídrica em bacias hidrográficas. Entretanto a grande dificuldade foi a obtenção dos dados de entrada do modelo matemático, ou seja, os parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo.

O estado do Paraná possui um grande número de informações a respeito do seu território, o que possibilitou a realização deste estudo, mas estes dados nem sempre estão disponíveis para a maioria da população. Este trabalho reuniu informações territoriais de diversas instituições que, em geral, podem ser solicitadas para os órgãos competentes.

A aplicação da metodologia na área de estudo apresentou resultados satisfatórios e coerentes, mas os mesmos não pretendem quantificar numericamente

a perda de solo em cada sub-bacia, mas sim comparar o potencial de perda de cada uma, classificando-as em mais ou menos propensa à erosão hídrica.

A modelagem matemática, utilizada para estimar a perda de solo e aporte de sedimentos para os corpos hídricos por meio da Equação Universal de Perda de Solo, é amplamente difundida e aceita pela comunidade científica. Entretanto toda modelagem ambiental requer certos cuidados na análise dos resultados, pois muitos fatores podem influenciar a dinâmica ambiental do processo e que podem não estar sendo considerados. Apesar deste fato, a modelagem apresentada neste estudo possibilitou uma primeira aproximação do processo de transporte de sedimentos para um corpo hídrico, permitindo uma visão geral da realidade, a realização de simulações e previsões futuras.

A metodologia desenvolvida também poderá ser utilizada por outros setores da sociedade e instituições que visem a melhoria da qualidade e disponibilidade da água em bacias hidrográficas do Paraná, bem como diminuição da perda de solo no meio rural.

Após a identificação da área prioritária para controle da erosão hídrica dentro de uma bacia de manancial, os diversos atores envolvidos como: os proprietários de terras, EMATER, IAP, prefeituras e SANEPAR, deverão atuar em conjunto para identificar as causas do problema, buscar soluções e captar recursos para solucionar ou minimizar o problema.

REFERÊNCIAS

AGUASPARANÁ (Instituto das Águas do Paraná). Base Hidrográfica do Estado do Paraná – *shapefile*, 2011.

ALBUQUERQUE, J.; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. **Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v24, 2000.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Manual de Construção da Base Hidrográfica Ottocodificada: fase 1 – construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter**. Brasília, 2007.

ANDREOLI, C.; CARNEIRO, C. **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados**. Curitiba: Finep, 2005.

ARAUJO JR. G. J. L. D. **Aplicação dos modelos EUPS e MEUPS na bacia do Ribeirão Bonito (SP) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 1997.

BARROWS, S.G.; KILMER. V.J. **Plant nutrient losses from soils by water erosion**. Adv. Agron, 1963.

BERTOL, O. J. **Contaminação da água de escoamento superficial e da água percolada pelo efeito de adubação mineral e adubação orgânica em sistemas de semeadura direta**. 179 f. Tese (Doutorado em ciências florestais) – Setor de ciências agrárias, Curitiba, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 1995.

BIGARELLA, J. J. **Visão integrada da problemática da erosão**. Curitiba: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985.

CARVALHO, F.L.C. **Relação da erosão hídrica do solo com doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo**. Porto Alegre: UFRGS, 1986.

CASTANHARI, L. C. M.; GARRASTAZU, M. C., ROSOT, M. A. D. **Modelagem de carbono utilizando a ferramenta InVEST®**. Anais do X evento de iniciação científica da Embrapa Florestas, Colombo, 2011.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). **Levantamentos geológicos básicos do Brasil. Carta geológica compilada Curitiba**. Curitiba, 2000.

CHRISTO, D. R.; GARRASTAZU, M. C. **Elaboração de planos de informação para modelagem de retenção e sedimento**. Anais do XI evento de iniciação científica da Embrapa Florestas, Colombo, 2012.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N. & KOPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. GTZ, Eschborn, Germany, 1991.

DIAS, A. S.; SILVA, J. R. C. **A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v27, 2003.

DOMINGOS, J. L. **Estimativa de perda de solo por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica**. 66 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

EKERN, P. C. **Raindrop impact as the force initiating soil erosion**. Soil Science Society of América Proceeding.,Madison, 1950.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária). **Levantamentos de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: EMBRAPA/ IAPAR, 1984.

EMS, College of Earth and Mineral Sciences. Disponível em: <https://www.education.psu.edu/natureofgeoinfo/c1_p9.html>. Acesso em: 10/05/2014.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. Página de internet. Disponível em: < <http://www.esri.com/> >. Acesso em: 15/05/2014.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. Ferramenta computacional. *Software ArcGis* versão 9.3, Readlands, CA. 2014. *Home page*.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 1997.

FOSTER, G.R. Modelling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.D.; BRAKENSIEK, D.L., eds. **Hydrologic modelling of small watersheds**. St. Joseph, ASAE, 1982.

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.

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. **Tipo de solos Paraná**. Curitiba, 2008. Mapa em formato *shapefile*. 1 arquivo digital. Arquivo digital armazenado no servidor Corumbataí da SANEPAR.

IPPUC. Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Urbano de Curitiba. **Imagem aérea de Curitiba**. Curitiba, 2008. 1 imagem aérea. Arquivo digital armazenado no servidor Corumbataí da SANEPAR.

ITCG. Instituto de Terras, Cartografia e Geociências. **Limites municipais**. Curitiba, 2007. Mapa em formato *shapefile*. 1 arquivo digital. Arquivo digital armazenado no servidor Corumbataí da SANEPAR.

JACOBS, A. G. **Erodibilidade de dois latossolos vermelho-escuro em relação à erosividade.** 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

JONH, L.; MARCONDES, P. **O valor da água.** Campinas: Camirim Editorial, 2010.

JUDSON, S. **Analysis of landforms.** Earth-Science Reviews, Amsterdam, v. 13, 1977.

LANGRIDGE, S. M.; HARTGE, E. H.; CLARK, R.; ARKEMA, K.; VERUTES, G. M.; PRAHLER, E. E.; DUNCAN, S. S.; REVELL, D. L. I; CALDWELL, M. R.; GUERRY, A. D.; RUCKELSHAUS, M.; ABELES, A.; COBURN, C.; O'CONNOR, K. **Key lessons for incorporating natural infrastructure into regional climate adaptation planning.** Ocean & Coastal Management, Vol. 95. DOI: 10.1016, j.ocecoaman, 2014.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e ciência de informações geográficas.** São Paulo: Bookman, 2013.

MENDENHALL, C. D.; KARP, D. S.; MEYER, C. F. J.; HADLY, E. A.; DAILY, G. C. **Predicting biodiversity change and averting collapse in agricultural landscapes.** Macmillan Publishers. DOI 10.1038, 2014.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; RÖMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources.** Washington, USDA-Agricultural Research, 1975.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, 2012.**

Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/pt/brasil/natural-sciences/water-resources/information-on-wwdr-4>>. Acesso em: 10/12/2013.

PARRY, R. **Agricultural phosphorus and water quality: a U.S. environmental protection agency perspective**. J. Environ. Qual., 1998.

PEREIRA, A. R.; **Determinação da perda de solo**. Boletim técnico nº 001. Belo Horizonte: FAPI, 2006.

PLANTIO DIRETO (Revista). Disponível em:
<http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=953>. Acesso em: 10/05/2014.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo**. Curitiba: Embrapa, 1996.

QUARTAROLI, C. F.; BATISTELA, M. **Processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Embrapa, 2005.

SAAD, S. I.; DA ROCHA, R. H.; GUIMARÃES, J.; DA SILVA, J. M. **Avaliação do modleo InVEST® para o sistema Cantareira: módulos de hidrologia e de perda de sedimentos**. Anais do XIX simpósio brasileiro de recursos hídricos, Maceió, 2011.

SANEPAR. CADASTRO. **Acervo fotográfico dos pontos de captação de água**. Curitiba, 2002. Fotografias digitais do servidor Corumbataí.

SANEPAR. SisWeb. **Sistema de Informações e Gestão SANEPAR**. Disponível em: <http://sis2.SANEPAR.com.br/gerais/Inicio.aspx>. Acesso em: 10/07/2014.

SANEPAR. SIA (Sistema de Informações Ambientais). Pontos de captação de águas superficiais - *Shapefile*. Curitiba, 2013. Arquivo digital armazenado no servidores Corumbataí da SANEPAR.

SAUNITI, R. M. **Estudos sobre a erosão na bacia e assoreamento do reservatório do rio Passaúna**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SEDU. SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO URBANO (SEDU). **Imagem de Satélite SPOT 5 – recorte município de Cascavel**. Curitiba, 2005. 1 imagem de satélite. Spot 5 - 2005. Arquivo digital armazenado no servidor Corumbataí da SANEPAR.

SEDU. SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO URBANO (SEDU). **Mapa de Uso e Cobertura da Terra do Estado do Paraná**. Curitiba, 2005. Mapa em formato *shapefile*. 1 arquivo digital. Arquivo digital armazenado no servidor Corumbataí da SANEPAR.

UNIVERSIDADE STANFORD. Ferramenta computacional. *Software* InVEST® versão 2.6.0, Stanford, CA. 2013. *Home page*.

Disponível em: < <http://naturalcapitalproject.org/download.html> >>. Acesso em: 05/09/2013.

TALLIS, H.T.; RICKETTS, T.; GUERRY, A.D.; WOOD, S.A.; SHARP, 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.; and BERNHARDT, J. **InVEST® - User's Guide**. The Natural Capital Project, Stanford-CA, 2011.

Disponível em: < <http://naturalcapitalproject.org/download.html> >>. Acesso em: 05/09/2013.

TEIXEIRA e CHRISTOFOLETTI. **Sistemas de Informações Geográficas**. São Paulo: Hucitec, 1997.

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**. Anais do XX simpósio brasileiro de recursos hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

TOMAZONI, J.C.; MANTOVANI, L.E.; BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E.F. **A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Anta Gorda (PR)**. Estudos Geográficos, Rio Claro, v.3, 2005.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: Rima, 2003.

TUNDISI, J. G. **A água**. São Paulo: Publifolha, 2005.

WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no Paraná: Atualização, influência do “El Niño e La Niña” e estimativa para cenários climáticos futuros**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. **Relations of soil properties to its erodibility**. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1969.

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

XAVIER C. F. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e das características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba - Paraná**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

APÊNDICE 1

1. INSTALAÇÃO DO SOFTWARE InVEST

O InVEST® é um *software* distribuído gratuitamente e foi obtido através da página de internet da TNC – *The Nature Conservancy*. Para utilizar o programa é necessário possuir o sistema operacional Windows Vista ou versões superiores e o *software* ArcGis® 9.3 ou 10.0 previamente instalados. Neste trabalho foi utilizado o ArcGis® versão 9.3.

1.1 Download

O *download* do InVEST® é feito por meio da página de internet <<http://naturalcapitalproject.org/download.html>>, clicando-se no ícone “*Download InVEST® 2.6.0*” (Figura 01).

natural capital PROJECT

ABOUT NEWS TOOLBOX OUR WORK PEOPLE PUBLICATIONS EVENTS

Home >> Toolbox >> InVEST

Download InVEST

InVEST is family of models to explore ecosystem service benefits and tradeoffs between spatial planning scenarios at a regional scale.

System Requirements

The InVEST tool suite mostly consists of open source platform independent models, although some models require an ArcGIS computing platform. Part of ongoing InVEST software development focuses on transitioning all models off the ArcGIS platform. The following table is a guide to show which models are supported on each platform.

Model	Windows	Standalone	ArcGIS 9.3/10.0
Crop Pollination		x	
Managed Timber Production		x	
Sediment Retention	x (unstable)		x
Nutrient Retention	x (unstable)		x
Water Yield	x		
Carbon Storage and Sequestration	x		
Habitat Quality	x		
Marine Water Quality	x		
Habitat Risk Assessment	x (beta)		x
Overlap Analysis	x		
Aesthetic Quality			x
Marine Fish Aquaculture	x		
Coastal Erosion Protection			x
Coastal Vulnerability	x		
Wave Energy	x		
Wind Energy	x		

The ArcGIS based tools have additional software requirements

- ArcGIS 9.3 (service pack 1 or higher) or ArcGIS 10 (service pack 1 or higher)
- ArcGIS Spatial Analyst extension
- Marine Python Extensions for ArcGIS 9.3/Python 2.5 *Only required for ArcGIS marine models.*
- Marine Python Extensions for ArcGIS 10/Python 2.6 *Only required for ArcGIS marine models.*
- Marine Python Extensions for ArcGIS 10.1/Python 2.7 *Only required for ArcGIS marine models.*

© Stanford Woods Institute for the Environment, University of Minnesota's Institute on the Environment, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund.

FIGURA 01 – VISUALIZAÇÃO DA PÁGINA DE INTERNET PARA *DOWNLOAD* DO SOFTWARE InVEST®

FONTE: UNIVERSIDADE STANFORD (2013)

1.2 Instalação do InVEST®

Executar o *download* na seguinte página de internet:

<http://naturalcapitalproject.org/download.html>

Após o *download* do arquivo “InVEST®_2_6_0_x86_Setup (32bits).exe”, abrir o arquivo e seguir as instruções na tela conforme Figura 02.



FIGURA 02 – VISUALIZAÇÃO TELA DE INSTALAÇÃO DO INVEST®

FONTE: UNIVERSIDADE STANFORD (2013)

1.3 Configuração

Ao término da instalação é necessário inserir o InVEST® no *ArcToolbox* do ArcGis®, por meio do comando “*Add Toolbox*” (Figura 03). Insira o arquivo “InVEST®_260.tbx”, como mostra a Figura 04. Após a inserção no ArcGis®, o InVEST® aparecerá como uma ferramenta no *ArcToolbox* (Figura 05).

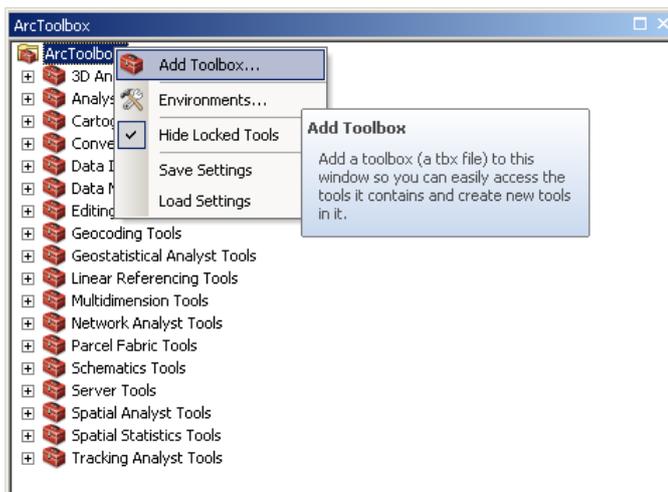


FIGURA 03 – VISUALIZAÇÃO DO ARCTOOLBOX NO ARCGIS®
FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

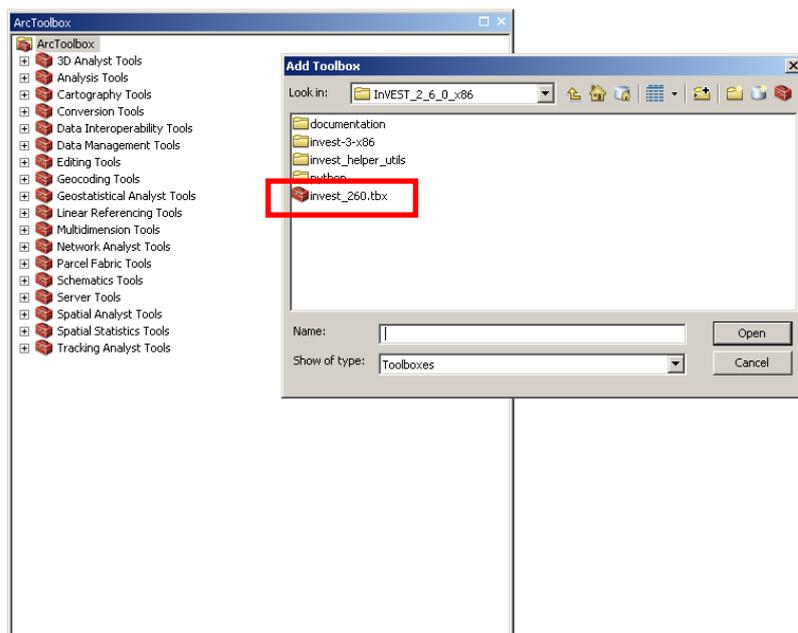


FIGURA 04 – INSERÇÃO DO INVEST® NO ARCTOOLBOX
FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)

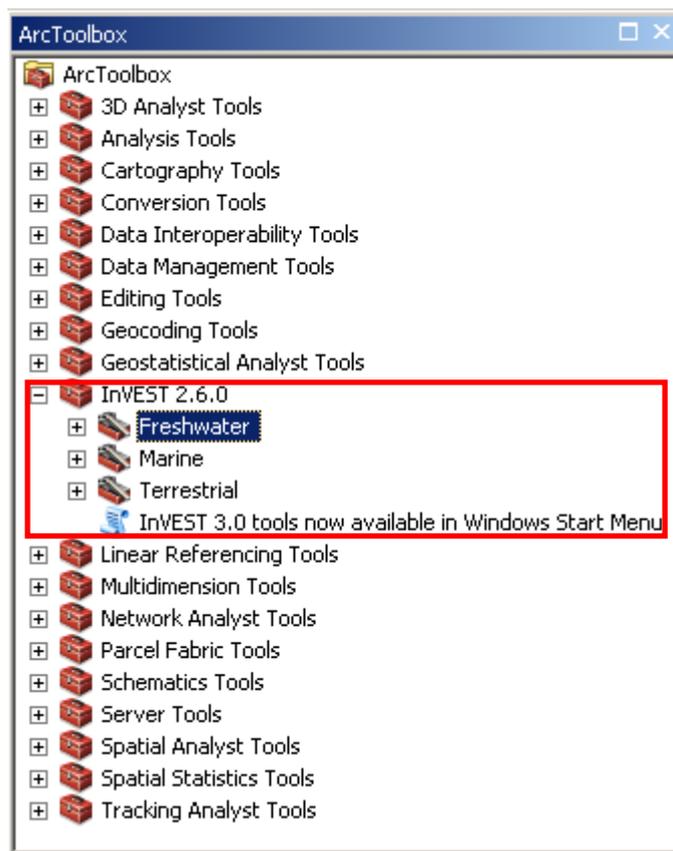


FIGURA 05 – VISUALIZAÇÃO DO INVEST® NO ARCTOOLBOX
FONTE: ESRI - ARCGIS® (2014)