

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FABIOLA GEOVANNA PIGA

**Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com  
vista ao planejamento ambiental—São Pedro e Santa Maria da Serra/SP**

São Carlos  
2017

FABIOLA GEOVANNA PIGA

**Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com  
vista ao planejamento ambiental–São Pedro e Santa Maria da Serra/SP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Marcilene Dantas Ferreira

São Carlos  
2017

Piga, Fabíola Geovanna

Modelagem ambiental de áreas degradadas por processos erosivos, com  
vista ao planejamento ambiental–São Pedro e Santa Maria da Serra/SP /  
Fabíola Geovanna Piga. -- 2017.

125 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São  
Carlos, São Carlos

Orientador: Marcilene Dantas Ferreira

Banca examinadora: Edson Augusto Melanda, Manuel Enrique Gamero

Guandique

Bibliografia

1. Modelagem ambiental. 2. Erosão. 3. Planejamento ambiental. I.  
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais


---

Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de dissertação de mestrado da candidata Fabíola Geovanna Piga, realizada em 07/07/2017:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Marcilene Dantas Ferreira  
UFSCar

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edson Augusto Melanda  
UFSCar

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique  
UNESP

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância do membro Manuel Enrique Gamero Guandique e, depois das arguições e deliberações realizadas, o participante à distância está de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa da aluna Fabíola Geovanna Piga.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Marcilene Dantas Ferreira  
Presidente da Comissão Examinadora  
UFSCar

*"Tentaram nos enterrar,  
mas não sabiam que éramos sementes."*

(Proverbio mexicano)

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são destinados às pessoas que muito contribuíram e marcaram nossas vidas, por isso hoje estou aqui para agradecer a todos que fazem parte da minha vida, em especial

A Deus pelo dom da vida.

À minha família, minha mãe Helena, meu pai Darci e a minha irmã Priscila, que mesmo distantes sempre me deram suporte no decorrer do mestrado.

Aos meus grandes amigos de ontem, hoje e sempre: Lucas por ter me recebido em São Carlos, por todo o suporte para minha residência na cidade, Vanessa e Thaisa pela amizade, cumplicidade e por estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida, mesmo que a distância.

À Yara Bragatto e Mariah Di Stasi, por terem sido a minha família em São Carlos, por todos os momentos, pela amizade, companheirismo, lágrimas e risadas compartilhadas.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marcilene Dantas Ferreira, pela orientação, pela acolhida e pelos conhecimentos e experiências que adquiri nesses dois anos.

Aos Professores Dr. Reinaldo Lorandi, Dr. Jose Augusto de Lollo e Dr. Luiz Eduardo Moschini, pelos ensinamentos, pela amizade, pela confiança e pela contribuição no meu desenvolvimento dentro da pós-graduação.

Aos Professores, Dr. Luiz Eduardo Moschini, Dr. Vandoir Bourscheidt e Dr.<sup>a</sup> Érica Pugliesi, por participarem da minha banca de qualificação da aula pública, e por suas avaliações.

Aos Professores, Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique, Dr. Eduardo Goulart Collares e Dr. Reinaldo Lorandi por participarem da banca de qualificação, e por todas as suas valiosas contribuições, que ajudaram no aprimoramento desse trabalho.

Aos Professores, Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique e Dr. Edson Melanda, por comporem a minha banca de defesa.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa.

À todos do LabGeo, em especial Mayara, Erica, Geisy, Wilmer, Vagner, Jose Olímpio e Darlan, pela amizade, companheirismo e conhecimento compartilhado.

Ao Vinicius Freitas, pela ajuda, suporte, disposição e colaboração nas burocracias e por ser o melhor servidor público que já conheci.

E a todos que direta, ou indiretamente colaboraram no decorrer do Mestrado.



## RESUMO

As mudanças ambientais globais e locais estão quase sempre associadas ao aumento das atividades humanas, cujos impactos provocam significativas transformações do meio ambiente. Estas alterações estão vinculadas a diversos fatores socioeconômicos e socioambientais, como adensamento populacional, expansão urbana, expansão agropecuária, desmatamento, industrialização e a crescente produção de resíduos sólidos, comprometendo a disponibilidade dos recursos naturais e a qualidade do meio ambiente. Diante dessas considerações, este trabalho teve como objetivo elaborar um diagnóstico ambiental, frente aos processos erosivos, por meio da utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado aos modelos de predição de perdas de solo, analisando a dinâmica do uso e cobertura do solo ao longo dos anos, e integrando os variados fatores físicos e ambientais para determinação do grau de suscetibilidade do ambiente, através da fragilidade ambiental. Para isso foi selecionada uma área caracterizada por intensos processos erosivos, compreendida pelos municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra, perfazendo uma área com cerca de 550 km<sup>2</sup>, a qual tem contribuição direta na carga de sedimentos no Reservatório de Barra Bonita. Além disso, tal área está inserida na APA Corumbataí, que por lei a preservação e conservação da sua paisagem deveria estar assegurada. Os resultados mostraram que a área sofre com o problema de erosão há mais de 60 anos e que pouco foi feito para reverter tal situação. Em relação a perda de solo, o ano de 2015 foi o que apresentou maior valor, e a expansão da mancha urbana e de áreas agrícolas acarretaram em uma alta fragilidade da área de estudo. Esse panorama demonstra que a função da APA não está sendo contemplada, uma vez que sua finalidade é proporcionar o equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico local e a sustentabilidade dos recursos ambientais. Tal estudo proporcionou a delimitação de áreas restritas a intervenções antrópicas, e que requerem maiores cuidados, e áreas com maior aptidão a urbanização, contribuindo no estudo do planejamento urbano e ambiental.

**Palavras-chave: modelagem ambiental, erosão, SIG, planejamento ambiental.**



## **ABSTRACT**

Global and local environmental changes are almost always associated with the increase of human activities, whose impacts cause significant transformations of the environment. These changes are linked to several socioeconomic and socioenvironmental factors, such as population density, urban expansion, agricultural expansion, deforestation, industrialization and the increasing production of solid waste, compromising the availability of natural resources and the quality of the environment. In view of these considerations, this work had the objective of elaborating an environmental diagnosis, in the face of erosive processes, through the use of the Geographic Information System (GIS) associated with soil loss prediction models, analyzing the dynamics of land use and land cover Over the years, and integrating the various physical and environmental factors to determine the degree of susceptibility of the environment through environmental fragility. For this purpose, an area characterized by intense erosion processes was selected, comprising the municipalities of São Pedro and Santa Maria da Serra, which has a direct contribution to the sediment load in the Barra Bonita Reservoir. In addition, such an area is part of the Corumbataí APA, that by law the preservation and conservation of its landscape should be ensured. The results showed that the area has suffered from the problem of erosion for more than 60 years and little has been done to reverse this situation. The year of 2015 was the one that presented the greatest loss of soil, and the expansion of the urban spot and agricultural areas caused a high fragility of the study area. This scenario demonstrates that the role of APA is not being addressed since its purpose is to balance local socioeconomic development with the sustainability of environmental resources. This study allowed the delimitation of areas restricted to anthropic interventions, which require greater care, and areas with greater aptitude for urbanization, contributing to the study of urban and environmental planning.

**Key words: Environmental modeling, erosion, GIS, environmental planning**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	10
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
2.1    Objetivos específicos .....	15
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	16
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	22
<b>CAPITULO 1 - MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL EM ÁREAS DEGRADADAS POR PROCESSOS EROSIVOS - SÃO PEDRO E SANTA MARIA/SP</b> .....	26
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	28
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
2.1.    Caracterização da Área de Estudo .....	30
2.2.    Materiais .....	31
2.3.    Metodologia.....	32
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	51
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	52
<b>CAPITULO 2 - MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NAS BACIAS RIBEIRAO SAMAMBAIA E RIBEIRAO DO MEIO - SÃO PEDRO/SP</b> .....	57
<b>1. INTRODUCAO</b> .....	59
<b>2. MATERIAIS E METODOS</b> .....	61
2.1    Caracterização da área de Estudo .....	61
2.2    Elaboração do Banco de Dados .....	64
2.3    Dados de entrada no ArcSWAT .....	66
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	68
3.1    Calibração e Validação.....	68
3.2    Produção de sedimentos.....	71
<b>4. CONSIDERACÕES FINAIS</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81
<b>CAPITULO 3 - GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE E GESTÃO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA APA CORUMBATAÍ/ SP-BRASIL</b> .....	86

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	87
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	90
2.1 Caracterização da Área de estudo .....	90
2.2 Metodologia.....	94
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	100
3.1 Análise da Fragilidade Utilizando Pedologia .....	100
3.2 Análise da Fragilidade em escala 1:100.000 .....	109
3.3 Análise da Fragilidade Utilizando Materiais Inconsolidados .....	111
3.4 Análise da Fragilidade por bacia hidrográfica.....	114
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	117
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	118
<b>3. CONCLUSÕES</b> .....	124



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A ocupação desordenada e inadequada do meio físico e a expansão das atividades antrópicas, aliadas ao contínuo crescimento da população, aumentam a demanda por recursos naturais. A exploração das terras e o crescimento econômico do meio rural de grande parte das regiões brasileiras têm sido constantemente prejudicados pela falta de um planejamento adequado, que tenha como base o conhecimento dos recursos naturais e socioeconômicos disponíveis.

Quanto aos níveis de interferência humana no meio ecológico, uma das referências empregadas é da metodologia ecodinâmica de Tricart (1977), que classifica o meio ambiente como estável, integrado e fortemente instável. Tal metodologia, considera o equilíbrio dinâmico das paisagens de acordo com os componentes físicos, bióticos e abióticos de cada ambiente.

Para que o planejamento ambiental seja efetivo, é necessário um estudo integrado dos elementos do meio ambiente, incorporando a análise das suas fragilidades, objetivando definir as áreas que requerem maior proteção ou que apresentam maiores restrições e, sobretudo, que necessitam de ações diferenciadas para a gestão por parte dos órgãos públicos (TROMBETA et al., 2014).

O mau uso dos recursos naturais causam degradação do ambiente, tendo como efeitos os processos de erosão, as inundações, os assoreamentos desenfreados de reservatórios e cursos d'água. Estes impactos, por sua vez, comprometem não somente os recursos naturais, mas também a esfera econômica e social.

As produções globais de algumas regiões estão ligadas a modificação dos recursos da terra e da água, comprometendo a qualidade dos solos, a biodiversidade e os recursos hídricos. Além disso, em uma escala global, 25% dos solos estão altamente degradados, 8% moderadamente degradados e 36% levemente degradados, segundo o estudo da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (2011) e, apenas 31% estão preservados.

A principal consequência da degradação das terras agrícolas é a erosão dos solos, sendo a erosão hídrica a forma mais importante de erosão e é considerada como o principal fator de empobrecimento do solo, pois, quando associada ao uso e ao manejo inadequado do solo, seus efeitos são potencializados, por promoverem o carreamento das camadas superficiais mais férteis do solo, em direção aos rios (LESSA, 2011).

Os solos constituem-se como o meio de preservação e promoção da vida na Terra, fornecendo água e nutrientes para as plantas e são compostos por milhões de organismos vivos, úteis na biodegradação, reciclagem de resíduos e conservação de minerais e nutrientes, salvo a interatividade com a hidrosfera sendo meio de absorção, purificação, transporte e liberação de água (FAO, 2013).

Estima-se que, se não forem tomadas medidas apropriadas para proteger e conservar o solo, a crescente demanda por recursos, principalmente relacionados a agricultura intensiva, irá acelerar as perdas de solo e de água por fatores erosivos (ZIADAT; TAIMEH, 2013).

Deste modo, os estudos de processos erosivos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, com as mais diferentes finalidades, considerando os diversos componentes do meio ambiente. Estes estudos possuem a finalidade de avaliar e evitar perdas econômicas, sociais e ambientais decorrentes desses processos.

Por meio de uma pesquisa bibliográfica, foi possível observar o aumento dos estudos que tratam sobre a temática a partir da década de 70. Utilizando as palavras chave Erosão e Modelagem, foram identificados 38.041 artigos e revisões publicados em periódicos, entre os anos de 1950 a 2016 (Figura 1).

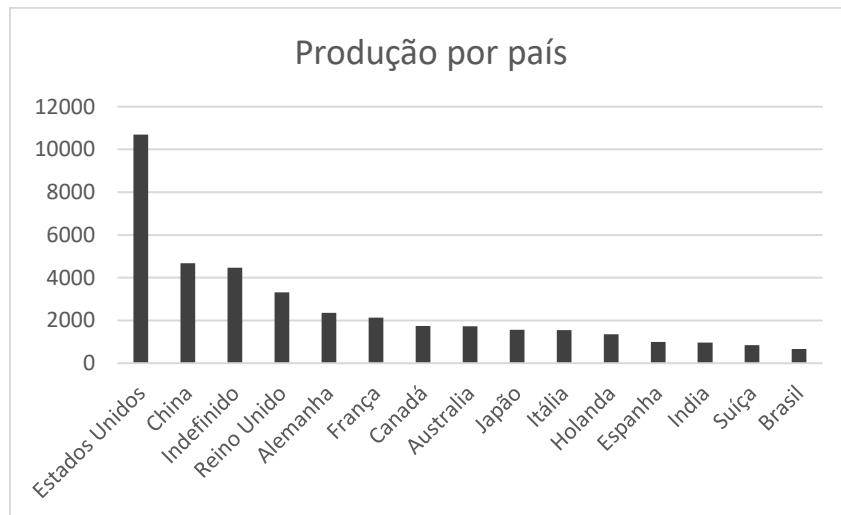
**Figura 1. Evolução da produção científica sobre Erosão e Modelagem.**



Esse crescimento exponencial das publicações, referentes a tal temática, demonstra a sua importância e tendência no cenário científico, quando se trata de estudos de processos erosivos por meio de modelagens.

Em uma perspectiva de produção científica global, o país que mais publicou artigos referentes à análise de erosão foram os Estados Unidos (10.695 artigos), enquanto que o Brasil foi o 15º país com mais publicações, totalizando 669 artigos (Figura 2).

**Figura 2. Quantitativo de produção científica por país.**



Tal panorama, implica que o Brasil ainda carece de estudos relacionados a essa temática. Uma das prováveis razões é a falta de dados geotécnicos e cartográficos em algumas regiões brasileiras em escalas compatíveis para realização desse tipo de estudo.

Para a análise ambiental voltada ao planejamento, é de suma importância estudos detalhados, em escalas regionais e locais, a fim de adequar ações à potencialidade, vocação local e capacidade de suporte do ambiente, com o propósito de conciliar o desenvolvimento da região e a manutenção da qualidade do ambiente físico, biológico e social, trabalhando sob a lógica da potencialidade e fragilidade do meio (SANTOS, 2004).

Segundo Furegatti (2012), diferentes objetivos são considerados para os estudos dos processos erosivos, dentre eles: a avaliação dos impactos ambientais, voltados à pesquisa científica, desenvolvimento de tecnologias de controle, elaboração de políticas de conservação e principalmente no sentido de previsão de erosão para implantação de medidas preventivas.

Em relação à previsão de erosão, os estudos são mais voltados à geração de sedimentos com base em diferentes modelos matemático/computacionais. Tais modelos permitem a quantificação desses sedimentos gerados, contemplando processos erosivos distintos e suas feições, assim como os fatores que os influenciam. Por isso, para um resultado mais completo e aprofundado, recomenda-se a aplicação de mais de um modelo e levantamento de dados detalhados da área estudada.

Os procedimentos para a montagem de um modelo matemático que represente um sistema real são citados por Hassuda (2000), por meio dos seguintes passos: desenvolvimento do modelo conceitual, envolvendo todo o levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real; seleção do programa computacional a ser utilizado segundo as necessidades e os dados existentes; tradução do modelo conceitual, para linguagem matemática, construindo-se os diversos bancos de dados para a entrada das informações no programa selecionado; e a calibração do modelo matemático construído de forma a minimizar dúvidas inerentes a uma representação simplificada (modelo matemático) de um sistema real, devido à complexidade da realidade.



Diversos autores ressaltam que a principal vantagem da aplicação de modelos, tanto em nível de planejamento, como no controle da erosão, consiste na possibilidade do estudo de diferentes cenários (tais como o pior cenário possível e diferentes tipos de manejo e práticas conservacionistas), com baixo custo e de forma rápida. No entanto, todo modelo tem limites de aplicação.

A maior limitação ao uso desses modelos é a dificuldade de trabalhar uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais, por isso os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são empregados na criação do banco de dados para tais modelos.

Os SIG's são destinados à aquisição e ao tratamento de dados georreferenciados (referenciados espacialmente), permitindo a manipulação de dados de diversas fontes, recuperando e combinando informações e efetuando vários tipos de análises. A informação, necessária aos processos decisórios, é o resultado da modelagem destes dados georreferenciados, que buscam representar uma realidade geográfica, e das operações possíveis sobre estas representações (ALVES, 1990; FELGUEIRAS, 1999; MACHADO e VETTORAZZI, 2003).

Estima-se que só no Estado de São Paulo há ocorrência de mais de 35.000 feições erosivas (FUREGATTI, 2012) e aproximadamente 10.000 voçorocas de grande porte, segundo levantamentos realizados pelo IPT (1986, 1988, 1990 e 1992). Dentre essas áreas degradadas, a região que compreende os municípios de São Pedro e de Santa Maria da Serra é bastante representativa, sendo intensamente afetada pelos diferentes tipos de erosão. Além disso, a área foi escolhida por apresentar diversos estudos que contribuirão para a aplicação dos modelos em função dos parâmetros que serão considerados.

A importância desse tipo de estudo está na viabilização do emprego de práticas fundamentais para sustentabilidade ambiental, fazendo-se necessária a orientação do uso e da ocupação do território de forma adequada à sua aptidão natural, possibilitando uma expansão da malha urbana e aproveitamento de recursos existentes de forma a satisfazer as necessidades econômicas e sociais, sem comprometer o ambiental e as futuras gerações.

Diante desse cenário, fazem-se necessários estudos pautados na ocorrência e intensidade dos processos erosivos, visando auxiliar no planejamento territorial e hídrico, principalmente na escala de bacias hidrográficas.

## **2. OBJETIVOS**

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi, por meio da modelagem ambiental, diagnosticar e analisar a interferência dos processos erosivos no ordenamento territorial e em recursos hídricos na APA Corumbataí. Esta análise visa contribuir para o desenvolvimento de diretrizes de controle ambiental e de manejos alternativos na região.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Realizar a análise multitemporal do uso e cobertura do solo e estimar as perdas de solo através da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (no inglês, USLE);
- Estimar a geração de sedimentos das bacias Samambaia e Ribeirão do Meio por meio do modelo hidrossedimentológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT);
- Analisar a fragilidade ambiental, identificando as áreas mais susceptíveis as erosões e por atividades antrópicas, e suas interferências na qualidade ambiental.

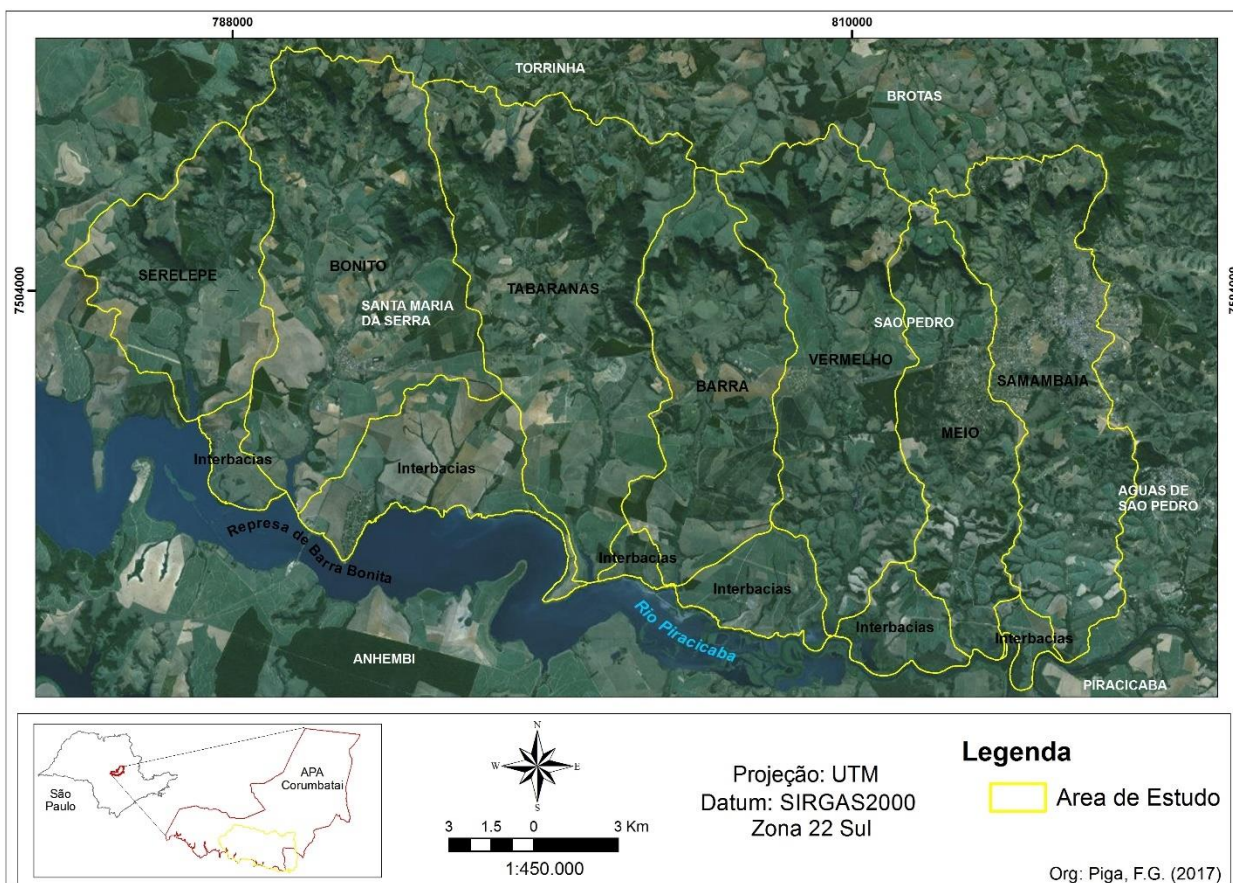
### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área do presente estudo está situada na região centro-leste do Estado de São Paulo, abrangendo os municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra, distando cerca de 200 km da cidade de São Paulo. Está compreendida entre as coordenadas UTM 782016 m E e 7490616 m S do fuso 22 e UTM 202263 m E e 7490317 m N do fuso 23, totalizando uma área aproximada de 550 Km<sup>2</sup>.

Tem como limites os municípios de Brotas e Torrinha (ao norte); Charqueada (a leste); Dois Córregos (a oeste) e Piracicaba (ao sul), tendo como principais acessos as rodovias Washington Luiz (SP-310) e a Irineu Penteadó (SP-191). O local de estudo engloba 7 (sete) bacias (Serelepe, Bonito, Tabaranas, Barra, Vermelho, Meio e Samambaia, além das interbacias (Figura 3).

A região está inserida na APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá, no Perímetro Corumbataí. Foi criada pelo Decreto Estadual nº. 20.960, de 8 de junho de 1983, na qual visa à proteção das Cuestas Basálticas, Morros Testemunhos das formações geomorfológicas locais, Aquífero Guarani e o patrimônio arqueológico, representado pelo Abrigo Barandi, com registros pré-históricos de cerca de 6.000 anos, além da vegetação natural e sua fauna associada. Conta também com inúmeros morros testemunhos que, assim como as escarpas, foram esculpidos por erosão diferencial entre o Arenito e o Basalto, camadas do embasamento geológico local (SÃO PAULO, 2017).

Figura 3. Mapa de localização da área de estudo.



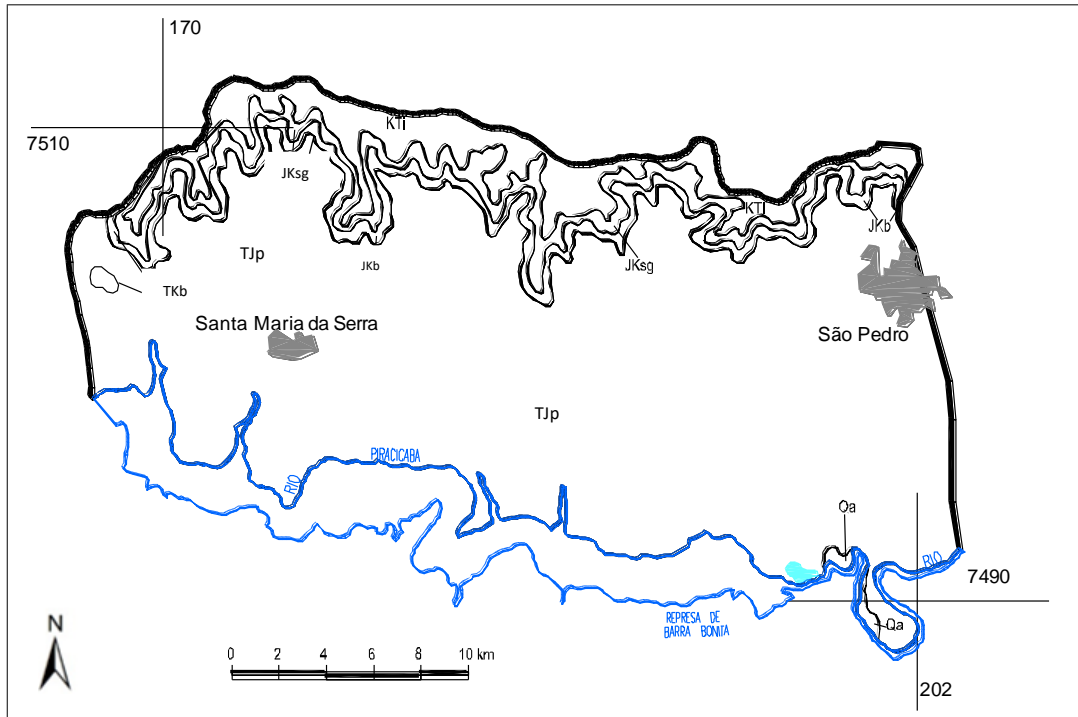
Em relação às formações geológicas, segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000, publicado pelo IPT (1981), a região de estudo é representada por quatro formações geológicas, conforme apresentado na Tabela 1 e Figura 4.

Tabela 1. Descrição das Formações Geológicas (IPT 1981).

Simbologia		Descrição
Kti		<i>Formação Itaqueri</i> – Predominantemente arenitos de cimento argiloso com lentes alongadas de folhelhos e conglomerados polimíticos.
Grupo Bauru	JKsg	<i>Formação Serra Geral</i> - Rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos de coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, de estratificação cruzada tangencial e esparsos níveis vitrofíricos não individualizados.
	JKb	<i>Formação Botucatu</i> - Arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média com estratificações cruzadas de médio a grande porte;

	depósitos fluviais restritos de natureza areno-conglomerática e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres
TJp	<i>Formação Pirambóia</i> - Depósitos fluviais e de planícies de inundação incluindo arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, de estratificação cruzada ou plano-paralela; níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza areno-conglomerática.

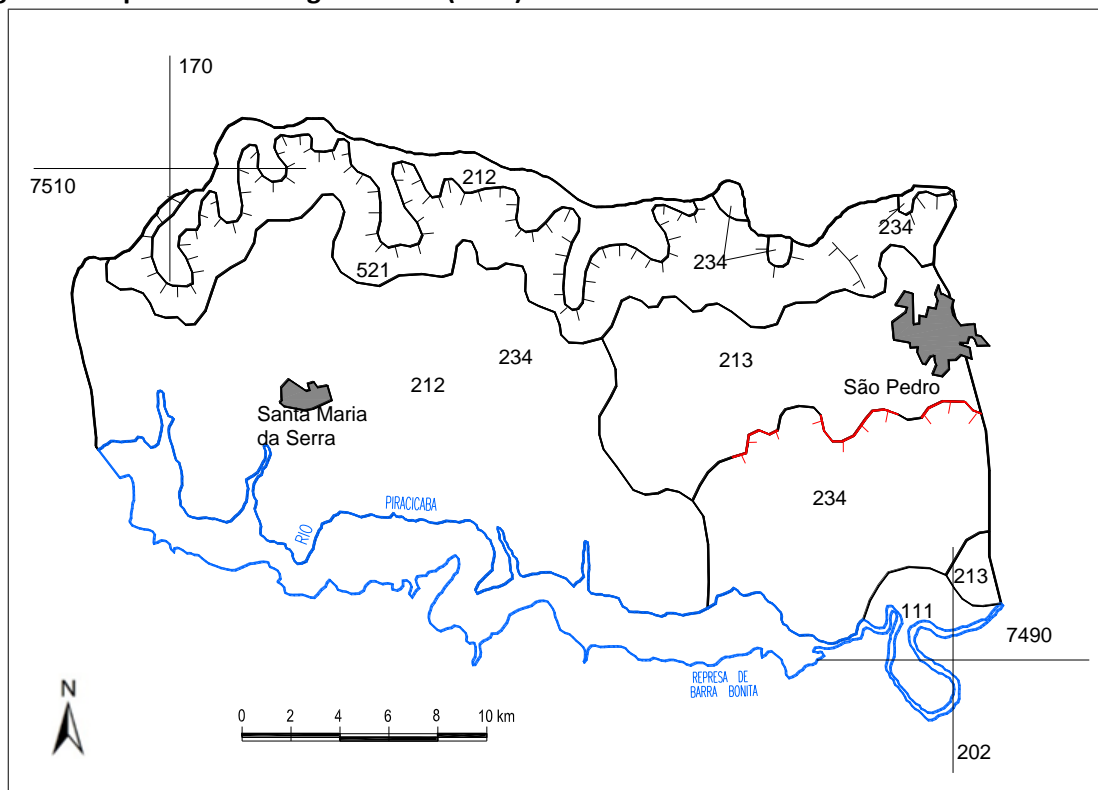
**Figura 4. Mapa Geológico do IPT (1981) da área de estudo**



Fonte: Dantas-Ferreira, 2008.

Segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo em escala 1:1.000.000 (IPT,1981), a área de estudo é constituída pelas seguintes unidades geomorfológicas: O Planalto Ocidental Paulista (Serra de São Pedro); Escarpa da Serra (Cuestas Basálticas); e a Depressão Periférica, que são representadas na Figura 5 e descritas na Tabela 2.

Figura 5. Mapa Geomorfológico do IPT (1981) da área de estudo.



Fonte: Dantas-Ferreira, 2008.

Tabela 2. Descrição das unidades geomorfológicas segundo IPT (1981).

Unidade	Símbolo	Descrição
<i>Planícies aluviais</i>	111	Terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos periodicamente a inundações.
<i>Relevo Colinoso:</i> (predominam baixas declividades - até 15% - e amplitudes locais inferiores a 100 metros)	212	<i>Colinas Amplas</i> - predominam interflúvios com área superior a 4 km <sup>2</sup> , topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
	213	<i>Colinas Médias</i> - predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 km <sup>2</sup> , topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

<i>Relevo De Morrotes</i> (predominam declividades médias a altas - acima de 15% - e amplitudes locais inferiores a 100 metros)	234	<i>Morrotes Alongados e Espigões</i> - predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.
<i>Escarpas</i> (predominam declividades altas - acima de 30% - e amplitudes maiores que 100 metros)	521	<i>Escarpas festonadas</i> - desfeitas em anfiteatros separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade, padrão subparalelo a dendrítico, vales fechados.

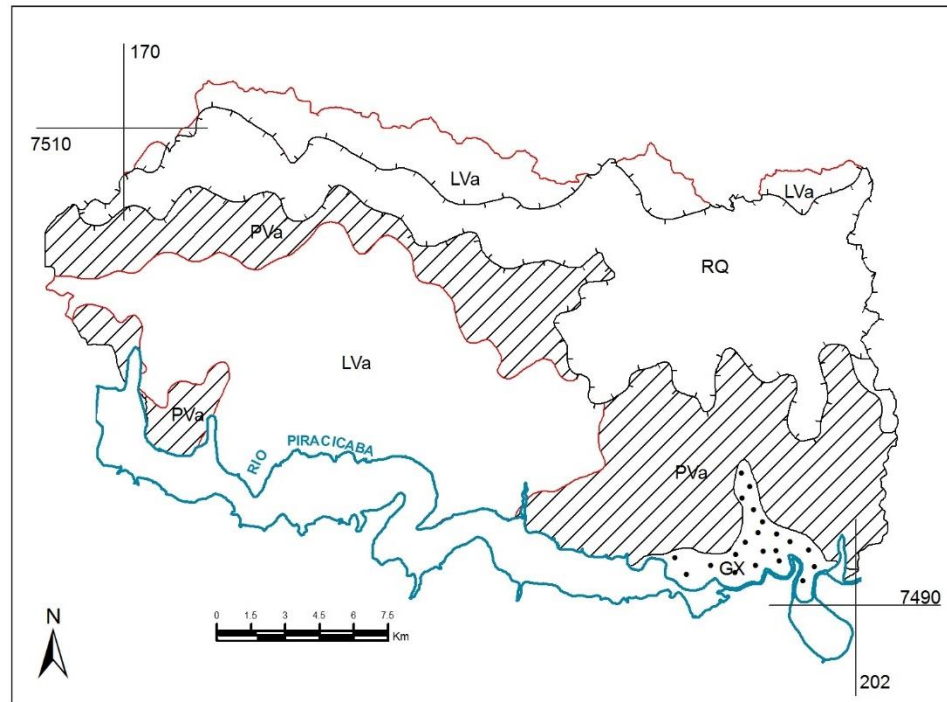
Em relação a pedologia, os tipos de solos encontrados na região segundo Oliveira et al. (1999), são descritos na Tabela 3 e Figura 6.

**Tabela 3. Descrição dos solos da área de estudo.**

<b>Unidade</b>	<b>Descrição</b>
<i>Latossolos Vermelho-Amarelo</i>	Estão associados às coberturas cenozóicas de materiais transportados originados das formações Pirambóia, Botucatu e Itaqueri. São solos de caráter álico, textura areia média a muito argilosa, e horizonte A moderado a proeminente.
<i>Argissolo Vermelho-Amarelo</i>	São originados de sedimentos das formações Pirambóia e Itaqueri. Tratam-se de solos ácidos a muito ácidos de textura areia média a argilosa, com índice médio de CTC relativamente elevado para os argilosos, e apresentam o horizonte A moderado e o B textural.
<i>Neossolos Quartzarênicos</i>	Materiais constituintes dos depósitos da base da escarpa da Serra, cuja composição essencialmente arenosa (>70%) indica uma origem a partir do retrabalhamento dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu. Apresentam o horizonte A moderado com espessura superior a dois metros, cores variando de vermelho-acizentado a bruno-avermelhado claro, de consistência friável e fortemente ácido.
<i>Solos Litólicos</i>	São solos com horizonte A moderado, com presença de minerais instáveis e elevados valores do índice médio de CTC, e são caracterizados pelas espessuras do solum inferiores a quarenta centímetros. Tem como substrato os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, os basaltos da Formação Serra Geral e os conglomerados da Formação Marília.
<i>Gleissolos (Solos Hidromórficos)</i>	Materiais restritos às planícies de inundação de alguns cursos d'água que drenam a região.

Fonte: OLIVEIRA et al (1999).

**Figura 6. Mapa Pedológico da área de estudo segundo (OLIVEIRA, 1999).**



Segundo o sistema de Köppen, em função das características de temperatura e precipitação, pode-se identificar para a grande área de estudo, compreendendo o município de São Pedro, um clima tropical do tipo Aw, tropical chuvoso com inverno seco e verão quente, mês mais frio com temperatura média superior a 18°C, com precipitação média anual de 1307 mm. Enquanto que na localidade de Santa Maria da Serra, o clima é caracterizado pelo tipo Am, marcado pelo clima tropical chuvoso, com inverno seco, e precipitação média de 1467 mm (CEPAGRI, 2016). Ocorrem ainda chuvas de efeito orográfico em função à proximidade da Serra de São Pedro.

Em relação à vegetação, os exemplares de maior porte encontram-se nas Cuestas Basálticas. A outra parte está ocupada por atividades agrícolas com o predomínio de cana-de-açúcar, pastagens e reflorestamentos (eucaliptos) (Figura 7a). Pode-se observar também a concentração de vegetação nativa junto nas margens dos principais ribeirões e córregos (DANTAS-FERREIRA, 2008).

A região é amplamente difundida pelas atividades ecoturísticas, apresentando inúmeros atrativos naturais como cachoeiras, corredeiras e saltos, resultantes dos desníveis



abruptos do relevo das serras de Itaquerí e São Pedro, morros testemunhos, grutas, represas, áreas de remanescente de flora, entre outros (CORVALÁN, 2009) (Figura 7b).

**Figuras 7. Paisagens em São Pedro. 7a: primeiro plano mata; plano direito eucalipto, plano esquerdo cana-de-açúcar e último plano citricultura. 7b. Cachoeira.**



Fonte: elaborada pelo autor.

São Pedro apresenta 611,27 km<sup>2</sup> de área, 31.662 habitantes, densidade demográfica de 51,9 hab/km<sup>2</sup>, taxa de alfabetização de 97,07%, grau de urbanização de 84,03%. Enquanto que Santa Maria da Serra possui uma extensão territorial de 252, 62 km<sup>2</sup>, população de 5.413 habitantes, densidade demográfica de 21,43 hab/km<sup>2</sup>, taxa de alfabetização de 88,42%, grau de urbanização de 88,1% (IBGE, 2017).

## REFERÊNCIAS

ALVES, D. S. Sistemas de Informação Geográfica. In: **Simpósio Brasileiro de geoprocessamento**, São Paulo, SP. Anais, p. 66-78, 1990.

CEPAGRI. **Centro de pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura**. 2016. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipiospaulistas.htm>.

CORVALÁN, S. **Zoneamento Ambiental da APA Corumbataí (SP) de acordo com critérios de Vulnerabilidade Ambiental**. Tese de Doutorado. IGCE-UNESP, Rio Claro, 170 pp, 2009.

DANTAS-FERREIRA, M.D. **Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 454 pp, 2008.

FELGUEIRAS, C.A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação.** Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999, 182p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **State of the Art Report on Global and Regional Soil Information: Where are we? Where to go?** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, 2011.

FUREGATTI, S. A. **Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

HASSUDA, S. Modelagem matemática: elaboração do modelo conceitual. Informática em águas subterrâneas. In: **Informativo da Sociedade Brasileira de Águas Subterrâneas**, n.10, p.2-3, 2000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades.** 2016. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - 1981. **Mapa geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:500 000.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada.

\_\_\_\_\_ 1981. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.** São Paulo.

\_\_\_\_\_ 1986. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe - Paranapanema.** São Paulo, 1986, 6 vols. (IPT, Relatório, 24.739).

\_\_\_\_\_ 1988. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Baixo Tietê.** São Paulo, 1988, 4 vols. (IPT, Relatório 26.989).

\_\_\_\_\_ 1990. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Pardo Grande.** São Paulo, 1990, 2 vols. (IPT, Relatório 28.184).

\_\_\_\_\_ 1992. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Médio Tietê,** São Paulo, 1992. (IPT, Relatório 29.004).

LESSA, L.G.F. **Simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Pardo– Botucatu, SP, por modelagem hidrológica.** Tese de Doutorado, UNESP, Botucatu-SP, 2011.

MACHADO, R. E., e VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo,**

27(4), 735-741, 2003. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400018>

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. e CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPA-Solos. Campinas. 1999. 64p.

SANTOS, R.F. dos. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

TRICART, J.J.L. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977, 91 p

TROMBETA, L.R; GARCIA, R.M; NUNES, R.S; GOUVEIA, I.C.M.C; LEAL, A.C; GOUVEIA, J.M.C. Análise da fragilidade potencial e emergente do relevo da unidade de gerenciamento de recursos hídricos pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, (36): 159-173, 2014. Disponível em: <http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3178/2664>

ZIADAT, F. M.; TAIMEH, A. Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. **Land Degradation e Development**, 24(6): 582–590, 2013.



## **CAPITULO 1 - MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL EM ÁREAS DEGRADADAS POR PROCESSOS EROSIVOS - SÃO PEDRO E SANTA MARIA/SP**

### **RESUMO**

Ao longo dos anos os processos erosivos no Estado de São Paulo tem sido motivo de preocupação, tanto pelo porte quanto em números, gerando grande prejuízo econômico e social, além de riscos ambientais. Os modelos de predição da erosão estão ganhando espaço por ser um meio mais rápido e de menor custo em relação aos métodos diretos, tendo como mais uma vantagem a possibilidade de estudar diferentes cenários de interferências do solo. Na busca por uma melhor compreensão sobre as dimensões espaço-temporais desses processos erosivos, o presente trabalho foi desenvolvido visando estimar as áreas com maiores potenciais de perda de solo por meio da Equação Universal de Perdas de Solos (USLE). O período considerado na análise foi entre 1962 e 2015. Como resultado, obtiveram-se mapas temporais de perdas de solo, sendo possível identificar as áreas com altas perdas e sua relação com os usos e coberturas do solo e os fatores físicos existentes em uma área de aproximadamente 550 km<sup>2</sup>, abrangendo os municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra. Esta aplicação espaço-temporal mostrou a tendência evolutiva dos processos erosivos na região, principalmente os compreendidos nas áreas relacionadas à altas declividades, solos mais erodíveis e solos expostos e com culturas anuais. O ano que apresentou a maior perda de solo foi o de 2015, chegando a uma perda máxima de 6.944,4 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Mesmo com suas limitações, essa metodologia se mostra eficiente no que diz respeito a espacialização de áreas potencialmente erodíveis, contribuindo com o planejamento estratégico territorial.

**Palavras-chave: perda de solo, espaço-temporal, USLE**

### **ABSTRACT**

Over the years erosion processes in the State of São Paulo have been a cause for concern, both in terms of size and numbers, generating great economic and social damages, as well as environmental risks. Erosion prediction models are gaining space because they are a faster and less expensive means than direct methods, having as a further advantage the possibility of studying different scenarios of soil interference. In the search for a better understanding of the spatio-temporal dimensions of these erosive processes, the present work was developed to qualitatively demonstrate the areas with the greatest potential for soil loss through the Universal Soil Loss Equation (USLE). The period considered in the analysis was between 1962 and 2015. As a result, temporal maps of soil losses were obtained, being possible to identify the areas with high losses and their relation with the land uses and coverings and the physical factors existing in an area of approximately 550

km<sup>2</sup>, encompassing the municipalities of São Pedro And Santa Maria da Serra. This spatial-temporal application showed the evolutionary tendency of the erosive processes in the region, especially those in areas related to high slopes, more erodible soils and exposed soils and with annual crops. The year that presented the largest loss of soil was that of 2015, reaching a maximum loss of 6,944.4 ton.ha<sup>-1</sup>.year<sup>-1</sup>. Even with its limitations, this methodology is efficient in terms of the erodible areas potentially spatialization, contributing to territorial strategic planning.

**Key words: soil loss, spatio-temporal, USLE**

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão é um fenômeno de origem natural, porém quando influenciada por ações antrópicas (principalmente pelo uso e ocupação indevido do solo), pode agravar e acelerar os processos erosivos, acarretando em sérios impactos ambientais, econômicos e sociais.

O processo de erosão dos solos pela água se manifesta de diferentes maneiras, dependendo das interações dos fatores presentes em uma área, como as características geológicas, propriedades físicas do solo, a erosividade das chuvas, cobertura vegetal e uso do solo. De acordo com Almeida Filho et al (2001), a ocupação do território do Estado de São Paulo, iniciada pelo desmatamento e diversos usos do solo, foi determinante para a intensificação da ação das chuvas, provocando a aceleração dos processos erosivos.

O manejo dos solos e a cobertura vegetal tem influência significativa na resistência dos solos à erosão. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), os efeitos da vegetação sobre o solo são: proteção direta contra o impacto das gotas de chuva, interceptação da água, decomposição das raízes das plantas que contribuem na infiltração, melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica e diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

Por isso, faz-se necessária a orientação do uso e da ocupação do território de forma adequada à sua aptidão natural, possibilitando uma expansão da malha urbana e aproveitamento de recursos existentes de forma a satisfazer as necessidades econômicas e sociais sem comprometer o ambiental.

A importância de estudos e pesquisas nas áreas referentes ao transporte e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas é reforçada pelo uso desenfreado do solo e recursos naturais em geral, produzindo altas taxas de sedimento, ocasionando o assoreamento de cursos d'água. Como consequência, a produção de sedimentos é objeto de preocupação em todas as situações referentes à gestão do uso do solo e da água.

No que argumenta Sangoi (2007), o levantamento do uso do solo é de grande importância, uma vez que os efeitos do mau uso deste solo causam deterioração do

ambiente, tendo como consequências os processos de erosão, as inundações, os assoreamentos desenfreados de reservatórios e cursos d'água.

O objetivo dos modelos espaço-temporais é a simulação numérica de processos do mundo real em que os estados do modelo se modificam ao longo do tempo e em função de diversas condições de entrada. Os modelos de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo (PEDROSA e CÂMARA 2002).

O uso de técnicas de geoprocessamento utilizando SIG tem contribuído para a análise integrada do meio ambiente. Certos modelos qualificam e/ou quantificam as degradações ambientais, como o modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) e os sistemas de aptidões agrícolas, que utilizam o Geoprocessamento como meio de aquisição, entrada, manipulação e saída dos dados (ARAUJO JR, 1997; RAWAT et al., 2015).

A Equação Universal de Perda de Solos foi desenvolvida nos Estados Unidos na década de 1950 e revisado por Wischmeier e Smith em 1978, e é um dos modelos mais empregados e difundidos, onde compõe a maioria dos estudos de erosão do solo no mundo (GARCÍA RUIZ et al., 2015).

Um dos motivos é a exigência de poucos dados e sua facilidade de aplicação. A aplicação da USLE, em diversas escalas, facilitada pelo uso dos SIGs, têm se mostrado eficiente na integração de diferentes dados temáticos e na geração de novos produtos cartográficos, especialmente em estudos sobre perda de solo (PINTO, 2005; LIN et al., 2016).

Diante dos fatos apresentados, o presente estudo teve como objetivo analisar a dinâmica temporal da cobertura e do uso da terra, nos anos de 1962, 1972, 1985, 2000 e 2015 e estimar a perda de solos por processos erosivos por meio da aplicação da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS).

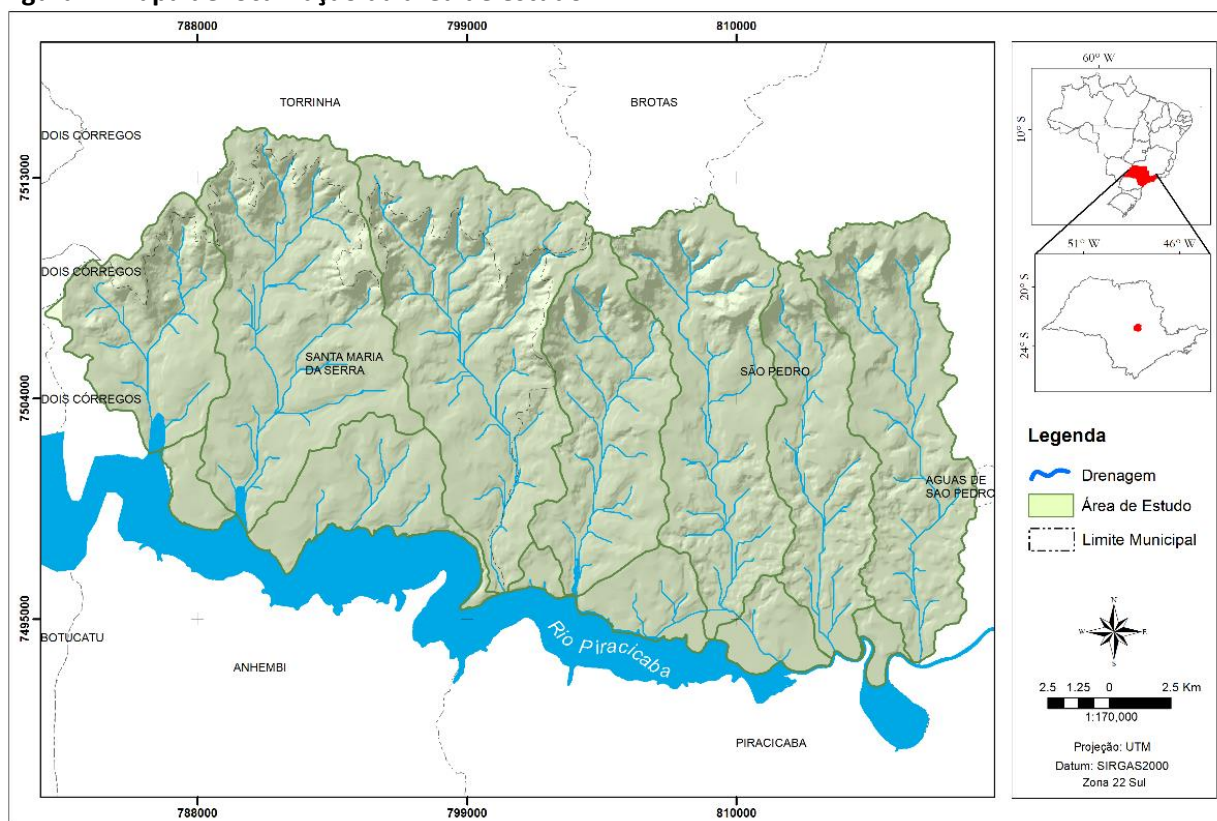


## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização da Área de Estudo

A área do presente estudo está localizada na região centro-leste do Estado de São Paulo, situada nos municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra, compreendida entre as coordenadas UTM 782016 m E e 7490616 m S do fuso 22 e UTM 202263 m E e 7490317 m N do fuso 23, totalizando uma área aproximada de 550 Km<sup>2</sup>. Tem como limites os municípios de Brotas e Torrinha (ao norte); Charqueada (a leste); Dois Córregos (a oeste) e Piracicaba (ao sul) (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.



Segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo em escala 1:1.000.000 (IPT,1981), a área de estudo é constituída pelas seguintes unidades geomorfológicas: O

Planalto Ocidental, representado por terrenos com as cotas mais elevadas; as Cuestas Basálticas (escarpas), com declividade muito elevada e a Depressão Periférica.

No Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1: 500.000, publicado pelo IPT (1981), a região de estudo é representada por cinco formações geológicas: Formação Pirambóia; Formação Botucatu; Formação Serra Geral; Formação Itaqueri e Sedimentos Aluvionares.

Em relação à vegetação, as de maior porte encontram-se nas Cuestas Basálticas e concentração de vegetação nativa junto às margens dos principais ribeirões e córregos. A outra parte está ocupada por atividades agrícolas com o predomínio de cana-de-açúcar, pastagens e reflorestamentos (DANTAS-FERREIRA, 2008).

## **2.2. Materiais**

A análise espaço-temporal da cobertura e uso do solo e dos processos erosivos, visando avaliar as diferenças ocorridas no período de 1962 a 2015, foi conduzida através da elaboração de um banco de dados georreferenciados e do cruzamento dos dados referentes aos anos de 1962, 1972, 1985, 2000 e 2015. Para isso, foram utilizados os materiais descritos a seguir.

**Tabela 1. Atributos ambientais utilizados para as análises.**

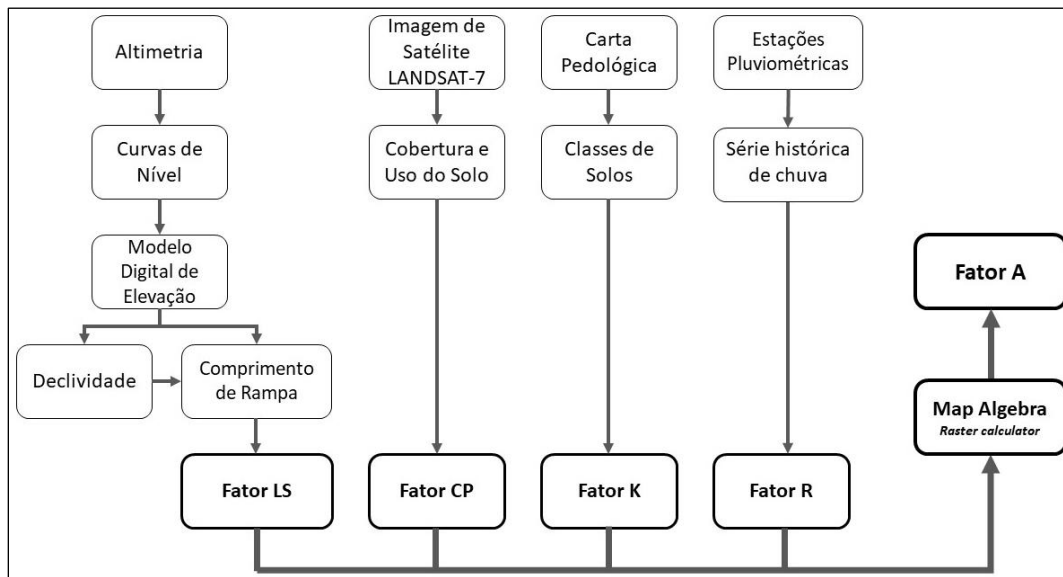
<b>Atributo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fonte</b>	<b>Escala</b>
<i>Altimetria</i>	Curvas de Nível, Declividade, Modelo Digital de Terreno	Cartas Topográficas (IBGE, 1971): Folhas Brotas SF-22-Z-B-III-4; Itirapina SF-23-M-I-3; Barra Bonita SF-22-Z-B-VI-1; Santa M. da Serra SF-22-Z-B-VI-2; São Pedro SF-23-M-III-1	1:50.000
<i>Pedologia</i>	Tipos de Solo	Mapa pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999)	1:500.000*
<i>Clima</i>	Pluviosidade	CIAGRO (2017) DAEE (2016) Estações D5-062; D4-060	-
<i>Uso e Cobertura do solo – 1962, 1972, 1985, 2000</i>	Classes de Usos	(DANTAS-FERREIRA, 2008)	-
<i>Uso e Cobertura do solo 2015</i>	Classes de Usos	Imagem LandSat 8, órbita/ponto 220/76 de 17/11/2015. Composição colorida – bandas: 6, 5 e 4 com fusão com a pancromática (Pixel 15m)	-

\* A base cartográfica de referência utilizada na elaboração foi do IBGE, na escala 1:250.000 (OLIVEIRA et al., 1999).

### **2.3. Metodologia**

De maneira resumida, o presente estudo foi elaborado conforme a Figura 2, que apresenta a esquematização das etapas desenvolvidas.

**Figura 2: Fluxograma da metodologia aplicada.**



## USLE

A Equação Universal de Perda de Solos, desenvolvida nos Estados Unidos na década de 1950 e revisada por Wischmeier e Smith em 1978, e é a equação de estimativa de erosão mais conhecida e aplicada até hoje. Muitos dos modelos aplicados hoje foram baseados na equação ou utiliza alguns de seus índices. É utilizada para estudo da erosão laminar, expressa pela relação:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Onde: A – Índice que representa a perda de solo por unidade de área, em t/ha/ano; R – Índice de erosividade da chuva, em  $Mj.mm/ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$ ; K – Índice de erodibilidade do solo, em  $t.ha.h/ha.mm/h$ ; L – Índice relativo ao comprimento da encosta, em metros; S – Índice relativo à declividade da encosta, em %; C – Índice relativo ao fator uso e manejo do solo (adimensional); P – Índice relativo à prática conservacionista adotada (adimensional).

## FATOR R

O índice de erosividade foi calculado com base nas séries históricas de chuvas dos municípios de Santa Maria da Serra e São Pedro. Foi calculado o fator R correspondente a

cada ano analisado no presente estudo, por meio da equação 2, desenvolvida por LOMBARDI NETO e MOLDENHAUER (1992).

$$EI_{mensal} = 67,355 \times \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,85} \quad (2)$$

Sendo:  $EI_{mensal}$  – erosividade média mensal do mês, em  $Mj.mm.h^{-1}.ha^{-1}$ ;  $r$  – precipitação média mensal do mês, em mm;  $P$  – precipitação média anual, em mm.

### FATOR K

O fator de erodibilidade (K), que se refere a suscetibilidade de determinado tipo de solo à erosão, foi obtido por meio da associação de valores encontrados na literatura, conforme representado a seguir, pela Tabela 2.

**Tabela 2. Fator de erodibilidade de cada solo identificado na área de estudo.**

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Fator K</b>	<b>Fonte</b>
Latossolo Vermelho Amarelo	0,022	SILVA et al. (2010)
Argissolo Vermelho Amarelo	0,034	BERTONI e LOMBARDI NETO (2012); DENARDIN (1990)
Neossolo Quartzarênico	0,027	BERTONI e LOMBARDI NETO (1990)
Gleissolo	0,0354	MINOTTI (2006)

### FATOR LS

Um dos algoritmos mais difundidos para estimativa do fator LS (topográfico) a partir de SIG foi desenvolvido por Desmet e Govers (1996), a partir da metodologia de Foster e Wischmeier (1974). Esse algoritmo emprega o conceito de contribuição de área e requer a geração de um mapa de fluxo acumulado. Para cada pixel, calcula-se a declividade, a direção de fluxo e a quantidade de fluxo acumulada a montante daquele pixel.

Dessa forma, a equação 3 apresenta o cálculo do fator L segundo metodologia de Desmet e Govers (1996), empregada neste trabalho.

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22,13)^m} \quad (3)$$

Onde:  $L_{(i,j)}$ : fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j);  $A_{(i,j)}$ : área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) ( $m^2$ ); D: tamanho da grade de células (m); x: valor da direção do fluxo; e m: coeficiente que assume os valores: 0,5 se  $s > 5\%$ , 0,4 se  $3\% \leq s < 5\%$ ; 0,3, se  $1\% \leq s < 3\%$ ; e 0,2, se  $s < 1\%$  (s é a declividade em graus).

O fator S:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10,8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03 \\ 16,8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5 \end{cases} \quad (4)$$

De acordo com Velásquez (2008), quando se aplica esta fórmula no *Raster Calculator* do ArcGIS, deve-se levar em conta que o ângulo deverá ser convertido para radiano (1 grau = 0,01745 radianos), para que se possa ser multiplicado pelos demais componentes das equações.

### FATOR CP

Foram analisados usos e coberturas do solo relacionados aos anos de 1962, 1972, 1985, 2000 e 2015. O fator CP corresponde ao gerenciamento da cobertura e os fatores de práticas conservacionistas. Quando o enfoque do trabalho é a perda de solo por erosão, os fatores C e P estão correlacionados de tal forma que podem ser analisados como um único fator (STEIN et al., 1987; DONZELLI et al., 1992; ROSLAN et al., 1997; GURGEL et al., 2011; NOVOTNÝ et al., 2016).

A cada uma das classes, com o auxílio de bibliografias, foi atribuído um valor para CP, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3. Fator uso e cobertura do solo e práticas conservacionistas identificados na área de estudo.**

<b>Uso e Cobertura do Solo</b>	<b>Fator C</b>	<b>FONTE</b>
Cana-de-açúcar	0,2	STEIN et al. (1987); DONZELLI et al. (1992); GURGEL et al. (2011); XAVIER et al. (2013)
Citricultura	0,25	STEIN et al. (1987); GURGEL et al. (2011)
Vegetação ciliar/mata nativa	0,0004	STEIN et al. (1987); GURGEL et al. (2011); XAVIER et al. (2013)
Eucalipto	0,004	STEIN et al. (1987); DONZELLI et al. (1992); GURGEL et al. (2011); XAVIER et al. (2013)
Solo exposto	1	WISCHMEIER e SMITH (1978); XAVIER et al. (2013); COSTA et al. (2016)
Urbano*	0	WISCHMEIER e SMITH (1978); XAVIER et al. (2013); COSTA et al. (2016)
Pastagem	0,1	STEIN et al. (1987); GURGEL et al. (2011); XAVIER et al. (2013)
Água*	0	STEIN et al. (1987); DONZELLI et al. (1992); GURGEL et al. (2011); XAVIER et al. (2013); COSTA et al. (2016)
Cultura anual	0,25	STEIN et al. (1987); GURGEL et al. (2011)

\*Adotou-se fator CP igual a zero para as classes de uso da terra corpos d'água e urbano, por apresentar perda de solo por erosão quase nula e não quantificável pela USLE.

A classe solo exposto não foi considerado na classificação dos anos de 62 e 72, uma vez que, tal classificação se deu por fotografias aéreas e tal uso não era objeto de estudo no trabalho em questão.

Todos os fatores descritos anteriormente foram adaptados e reescalados em ambiente SIG. Para caracterização do processo de erosão, é necessário analisar os elementos do ambiente físico que participam desse processo. Isto significa que é essencial quando se trabalha em grandes áreas, utilizar um sistema no qual é possível promover uma interação espacial entre os dados, sendo este processo conhecido por álgebra de mapas.

Através da ferramenta *Map Algebra*, estes dados foram cruzados, sendo obtidos da reclassificação das categorias segundo os valores definidos nas tabelas correspondentes, mediante conversão dos planos de informação do formato *feature* para *raster*, todos com resolução de pixel de 30 metros.

Os resultados foram classificados conforme adaptações da *Food and Agriculture Organization* – FAO (1967) (Tabela 4).

**Tabela 4. Classificação de perdas de solo.**

<b>Classes de Perda de Solo</b>	<b>Intervalo (t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>)</b>
Muito Baixa	0 – 5
Baixa	5 – 10
Moderada	10 – 50
Alta	50 – 200
Muito Alta	> 200

Fonte: FAO (1967).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A USLE utiliza seis fatores para estimar a perda de solo. O cálculo da estimativa de Erosão Anual foi obtido por meio do cruzamento de todos os planos de informações relativos aos fatores mencionados anteriormente.

O fator erosividade, estimado pela Equação 2, para os respectivos anos, obteve valores muito semelhantes nas duas estações pluviométricas utilizadas. Com isso, foi calculada uma média, e considerado um valor único para a área total, apresentado na Tabela 5.

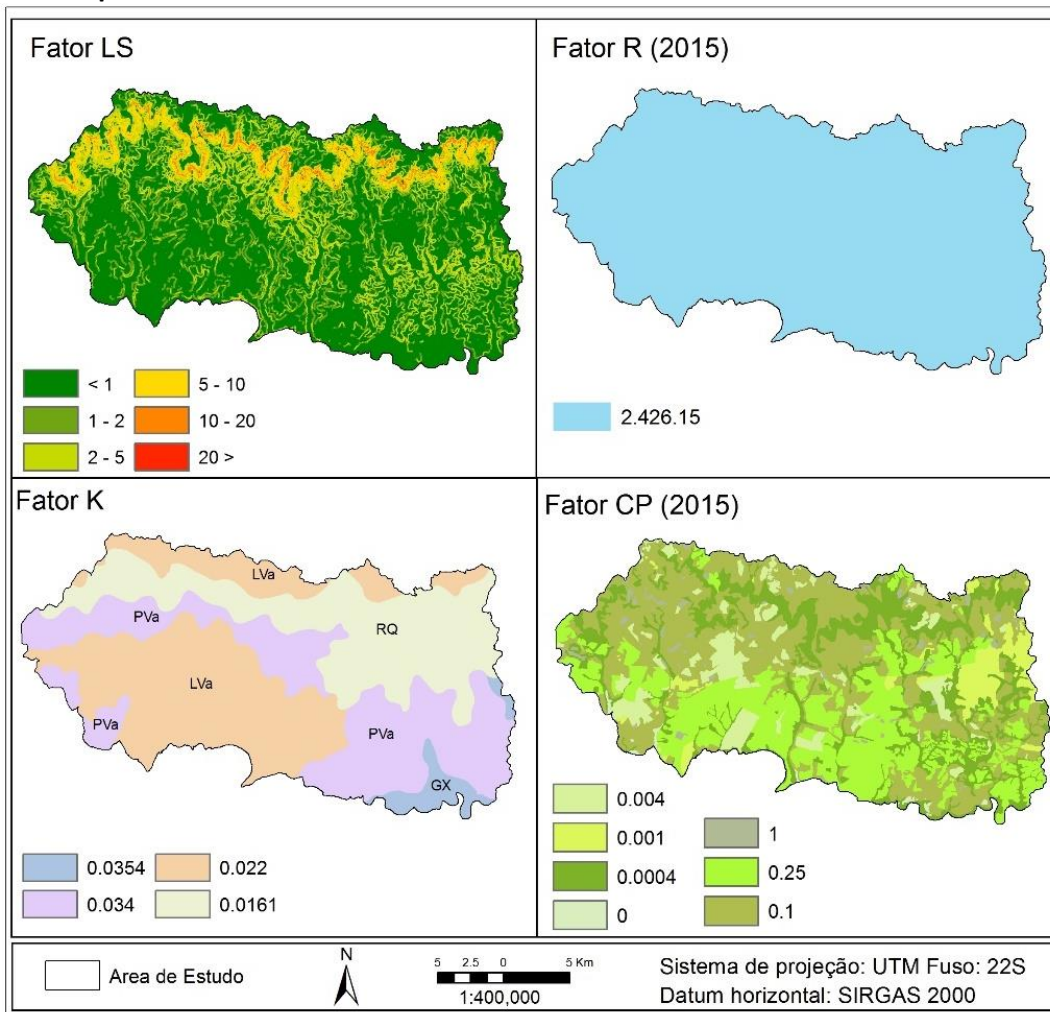
**Tabela 5. Fator erosividade nos respectivos anos.**

<b>Anos</b>	<b>Fator R (MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>)</b>
<b>1962</b>	4.458,24
<b>1972</b>	4.872,73
<b>1985</b>	3.748,72
<b>2000</b>	4.551,16
<b>2015</b>	2.426,15



O mapa de erodibilidade do solo é obtido pela substituição das classes pedológicas pelo seu respectivo fator K. Consequentemente, pode-se inferir que a espacialização de K está diretamente relacionada com o mapa pedológico, assim como a espacialização do fator CP está relacionado as classes de cobertura e uso do solo e as práticas conservacionistas (Figura 3).

**Figura 3. Mapa de fatores utilizados na EUPS.**



Por tratarem de dados do meio físico, os fatores K, L e S não se alteram. Fazendo uma análise temporal, percebe-se uma mudança de cenários por conta do fator antrópico e práticas conservacionistas CP e do fator R (erosividade), que se alteram ao longo do tempo, como pode ser observado na tabela 6 a seguir e nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8.

**Tabela 6. Área (ha) das classes de cobertura e uso do solo nos anos analisados.**

	1962	1972	1985	2000	2015
Água	208	208	350	245	255
Cana-de-açúcar	948	3.395	27.484	12.719	12.087
Cultura	5.651	6.764	2.742	2.385	319
Eucalipto	45	26	379	1.748	4.325
Citricultura	99	43	160	1.114	2.631
Pastagem	40.428	37.746	19.298	27.845	20.783
Solo Exposto	-	-	238	-	991
Urbano	21	226	1.459	2.674	2.783
Mata	7.690	6.682	2.980	6.360	10.915

Pela distribuição dos usos, detectou-se que a maior parte da bacia está sendo utilizada com culturas agrícolas e pastagem, fator que pode determinar maiores perdas de solo devido à grande mobilização destes por máquinas agrícolas e pisoteio do gado.

O cultivo da cana-de-açúcar e da citricultura foram os fatores que mais influenciaram com o aumento das perdas de solo na área de estudo. Nota-se também, o crescimento significativo, a partir do ano 2000, das áreas de mata. Esse aumento se deve pelas legislações ambientais implementadas no país desde então.

A natureza e quantidade do revestimento vegetal, além das características ou propriedades físicas e químicas do solo, é que determinam a resistência no qual este solo exerce à ação erosiva da água (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

A respeito da área urbanizada, grande parte dos estudos atribui pesos para o fator CP igual a 0, tendo em vista que essas áreas geralmente apresentam grandes percentuais de áreas impermeabilizadas e, conseqüentemente não expõem o solo aos processos erosivos.

Quando analisado o período entre 1962 e 2015, verificou-se que nas áreas com maiores LS (equivalentes a declividades a partir de 15%), há a presença de consideráveis áreas com altas e muito altas perdas de solo, no qual requerem atenção com relação ao manejo do uso do solo, a fim de se evitar a sua degradação e da água.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2012), a topografia, representada pela declividade e pelo comprimento das vertentes, tem grande influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastado pela água dependem da intensidade do fluxo e do refluxo da drenagem, que é representado pelo grau de declive do terreno, e determinam a potencialidade da erosão (TUNDISI et al., 2006; BATISTELLA e VALLADARES, 2009).

Nas regiões de Cuestas (declividade acima de 15%) mesmo com presença de Neossolo Quartzarênico, no qual são solos que apresentam muito baixa coesão, e mesmo em relevos mais suaves, sua susceptibilidade à erosão é elevada (IAC, 2016), a perda de solo foi predominantemente baixa, graças à presença de vegetação nativa. A cobertura vegetal protege o solo tanto pela interceptação das gotas da chuva, como pela diminuição da velocidade de escoamento das enxurradas, contribuindo para um controle efetivo da erosão (LEIPH, 2010).

As classes de muito baixa a moderada perda (0 – 50 ton/ha) encontram-se distribuídas por toda área, notadamente nas cobertas por mata, ao longo dos cursos d'água e por eucalipto.

Em relação as classes pedológicas da área, o que influenciou para uma taxa menor de perda de solo nos anos analisados foi o Gleissolo associado a áreas mais planas. Encontrado na porção sul da área de estudo, este solo é caracterizado por textura média ou argilosa em todos os horizontes, ocorrendo em áreas mais planas e/ou de várzea. Combinado a declives mais baixos, possui muito baixa susceptibilidade à erosão pluvial e baixo potencial natural de erosão (IRRIGART; PRADO, 2004).

Assim como o Gleissolo, o Latossolo Vermelho-Amarelo contribuiu para uma menor taxa de perda de solo, por ser um solo muito evoluído, intemperizado, bem profundo e poroso. Devido às boas condições físicas, sendo bem permeáveis, constituem sistemas com considerável resistência aos processos erosivos (BERTOL e ALMEIDA, 2000; PRADO, 2004).

O Latossolo Vermelho Amarelo, sendo um solo profundo encontrado em áreas de relevo plano e suave ondulado, ocorre na área de estudo em áreas com declividade

variando de 15 a 20%, coincidindo com a Formação Itaqueri, a qual é encontrada no reverso das cuestas arenito-basálticas (CORREA, 2011).

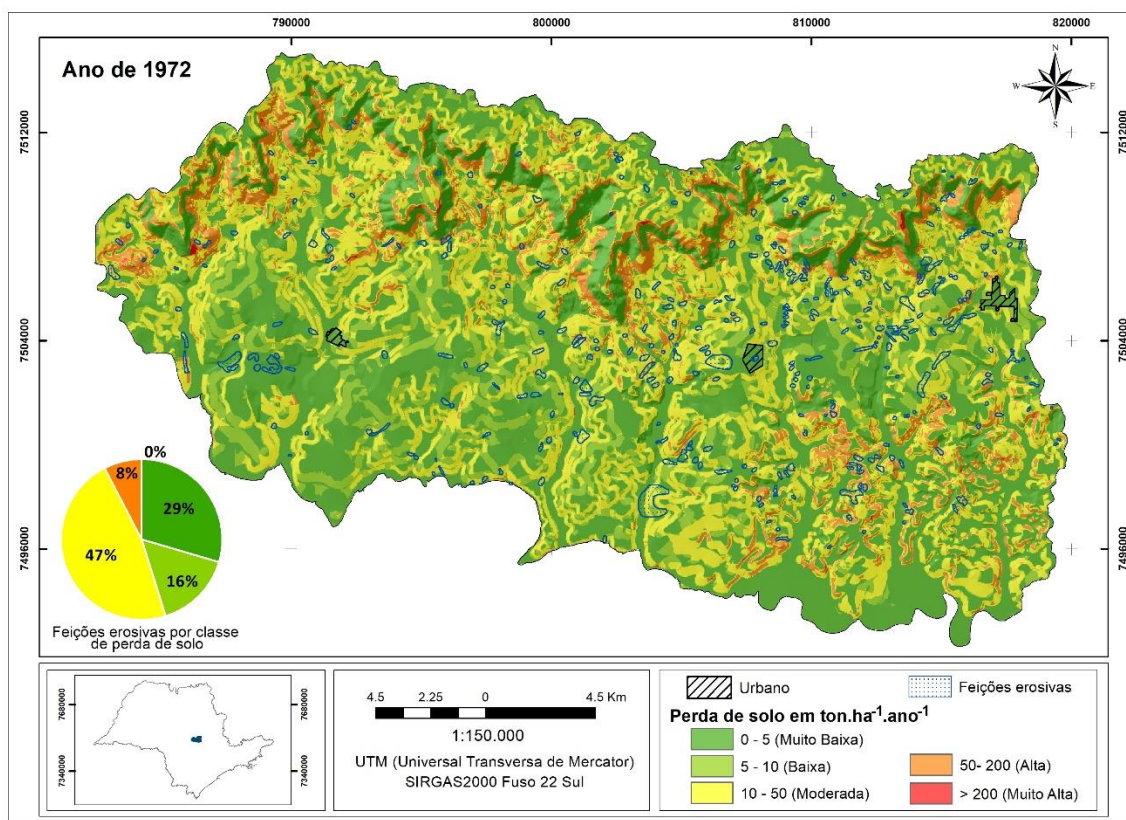
Diferentemente, os Argissolos são mais facilmente erodíveis que os Latossolos. Por apresentarem mudança textural, por vezes abrupta, e sua natureza pouco coesa em superfície e menor permeabilidade nos horizontes subsuperficiais, apresentam elevada susceptibilidade à erosão, exigindo práticas intensivas de controle de erosão quando sob manejo agrícola (PRADO, 2004; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012; IAC, 2016).

### ***Ano de 1962***

Em relação ao ano de 1962, há uma predominância da classe de média perda de solo, obtendo uma média anual de  $16,9 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  e perda máxima de  $1.674,3 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  (Figura 4).

De todos os anos, este foi o que apresentou menor perda. Tal fato se deve pelo início da atividade agrícola na região, onde a pastagem predomina, ocupando uma extensão de 73,13%, seguida das áreas de vegetação que ocupam 13,96% e as culturas anuais 10,33%, enquanto que os outros usos ocupam 2,58% (Cana-de-açúcar, Citricultura e Área Urbanizada).

Figura 4. Estimativa de perda de solo do ano de 1962.



As áreas com baixas perdas de solo possuem predominância do Latossolo Vermelho Amarelo, enquanto que a grande concentração ao sul das classes Moderada, Alta e Muito Alta, se deve pela predominância do Argissolo Vermelho Amarelo em conjunto com as culturas anuais e cana-de-açúcar e declividades mais acentuadas. Já nas áreas próximas as Cuestas, o que influenciou com maiores perdas foi a pastagem associada com o Neossolo Quartzarênico.

Por meio de fotointerpretação, Dantas-Ferreira (2008) mapeou as feições erosivas do tipo linear (voçoroca e ravina) na área de estudo, nos anos de 1962, 1972 e 2000. Observa-se que a maior parte do mapeamento das feições erosivas (47%) se encontra em áreas de média perda de solo, enquanto que 45% concentram-se nas classes muito baixa e baixa perda de solo. Além dessa categoria de perda de solo predominar na área analisada, estas feições estão intimamente relacionadas a pastagem em Neossolo Quartzarênico, que não receberam valores altos, por se tratarem de solos bem drenados (por apresentarem

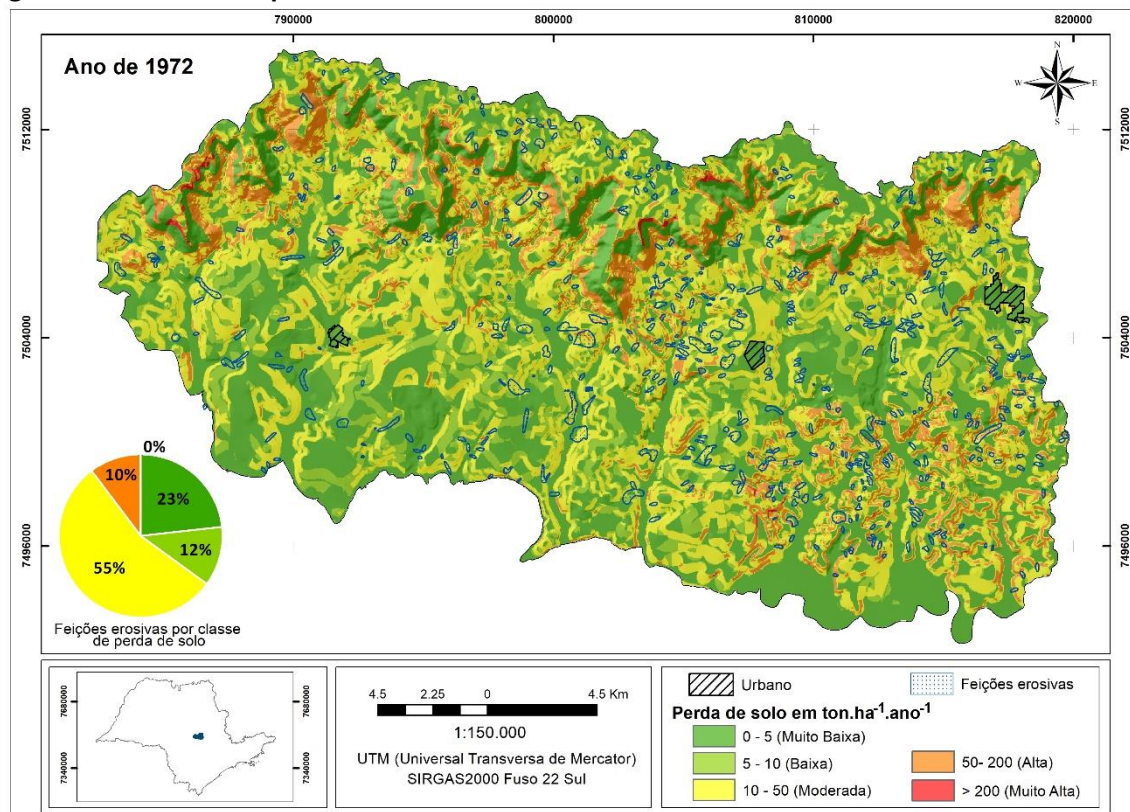
composição essencialmente arenosa, > 70%), e em relevo mais plano, que facilita a infiltração.

Correchel (2003), analisando a erodibilidade do Neossolo Quartzarênico em uma amostra no município de Anhembi-SP, constatou que associado a pastagens este solo possui um índice de erodibilidade menor do que associado ao cultivo da cana-de-açúcar.

### **Ano de 1972**

No que diz respeito ao ano de 1972, as taxas de perda de solo foram maiores, se comparadas a dez anos antes. Foi estimada uma perda média de  $19,81 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , tendo como perda máxima  $2.689,7 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Isso devido ao aumento de mais de 16% de culturas anuais, se comparada ao ano de 62.

**Figura 5. Estimativa de perda de solo do ano de 1972.**



Em relação às feições erosivas, comparado ao ano de 1962, houve um pequeno aumento em relação à classe alta (10%), referente a áreas com maiores declividades associadas a atividade agrícola.

Costa (2005), ressalta que em culturas anuais, o preparo do solo, determinando maior ou menor desagregação de suas partículas, tem sensível efeito nas perdas de solo e água. Estudos apontam a necessidade de revolvimento reduzido da camada arável, de forma a limitar a desagregação das partículas de solo.

Ainda em relação às culturas anuais, Lepsch (2010) esclarece que tais culturas deixam a superfície mais exposta do que os cultivos perenes ou semiperenes (como a cana-de-açúcar), pois os horizontes mais superficiais do solo são revolvidos anualmente, a fim de controlar o crescimento de ervas daninhas e preparar o solo para as semeaduras. Com isso, provocam a compactação da camada de solo logo abaixo, expondo a superfície desse solo à ação direta dos raios solares e de gotas de chuva, acelerando sua erosão.

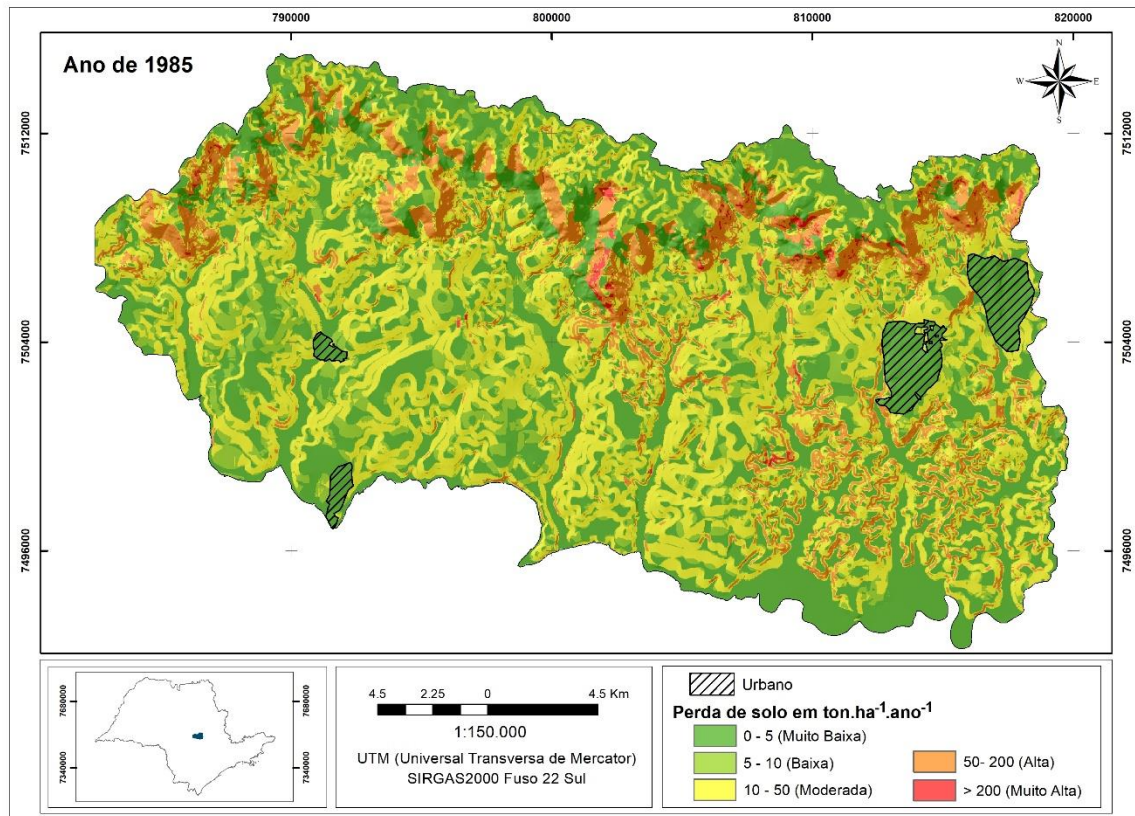
A cultura da cana-de-açúcar também cresceu (6,07%), porém a pastagem ainda é predominante na área (67,53%), garantindo baixas médias taxas de perda de solo. Lepsch (2010), aponta que, embora um pouco menos do que as florestas, os pastos bem conduzidos evitam a erosão acelerada. No entanto, pastagens com pecuária extensiva desencadeiam a potencialização dos processos erosivos, em especial os lineares, por conta do pisoteio do gado.

As gramíneas (que constituem as pastagens) são plantas, cuja densidade de hastes e sistema radicular adaptam-se bem no controle da erosão laminar, pela sua capacidade de diminuir a intensidade da enxurrada e prender as partículas de solo, favorecendo a estabilização da estrutura do solo, agindo como uma espécie de barragem, retardando o movimento da água (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; DONAGEMMA et al, 2016).

### ***Ano de 1985***

A partir de 1985 o cenário da região muda. Notadamente percebe-se um aumento nas perdas do solo, comprovado pelo resultado na perda média de 22,9 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e máxima de 3.795 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Figura 6. Estimativa de perda de solo do ano de 1985.



A atividade econômica da região segue uma vertente. Há um aumento significativo no cultivo da cana-de-açúcar. Tal fato se deve ao Programa Nacional do Álcool ou *Proálcool*, que foi criado no ano de 1975 por meio do decreto nº 76.593, com o objetivo de estimular a produção do álcool, visando o atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos.

Outro fator que corroborou pelo aumento das taxas de perda de solo foi a diminuição de mata nas áreas de Cuestas e o surgimento de áreas com solo exposto. A partir do ano de 1985 o mapeamento de uso e cobertura do solo se deu por meio de imagens de satélite e a classe solo exposto foi então considerada na classificação de tais usos.

Quando desprovido total ou parcialmente de sua vegetação natural, o solo fica exposto a uma série de fatores que tendem a depauperá-lo (ALBUQUERQUE et al., 2001; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012; LEPSCH, 2010). Aliado a terrenos mais acidentados, tal

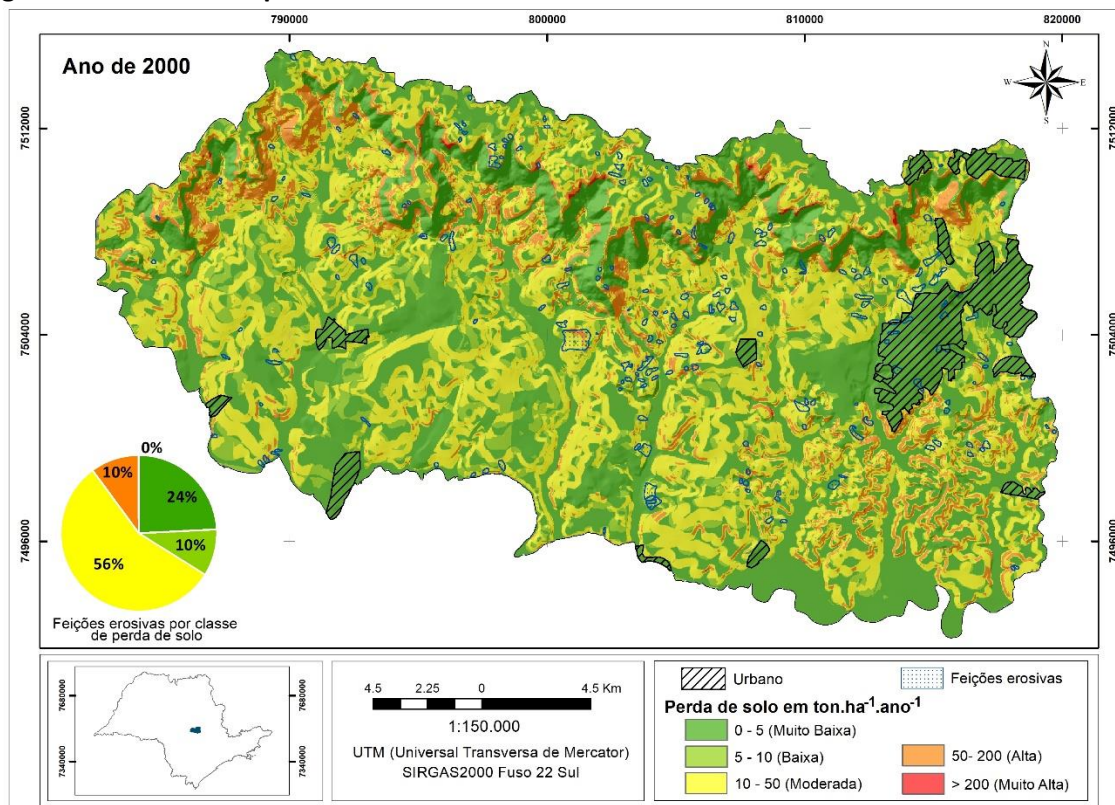


tipo de uso acentua o potencial de erosão e, conseqüentemente, a perda do solo, por meio do escoamento superficial.

### **Ano de 2000**

No ano de 2000 as áreas de cana diminuem, em relação a 1985, e as de pastagem e reflorestamento (eucalipto) aumentam. Mesmo com o aumento da precipitação no ano de 2000, esse cenário contribuiu para uma melhora nas perdas de solo. As taxas médias chegaram a  $17,57 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  e de máxima  $2.512,18 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

**Figura 7. Estimativa de perda de solo do ano de 2000.**



Daniel e Cunha (2009) realizaram um estudo no município de São Pedro das evoluções erosivas e ressaltam que no ano de 1988 iniciou-se a prática da silvicultura no Estado de São Paulo. Isso colaborou na contenção, estabilização e até o desaparecimento de algumas feições erosivas, segundo os autores. Tal fato pode ser observado no

levantamento das feições erosivas relativas a esse ano, com uma diminuição de quase 45% (de 1.926 ha para 860 ha), em comparação ao levantamento de 1972, favorecendo a melhora do cenário de 2000.

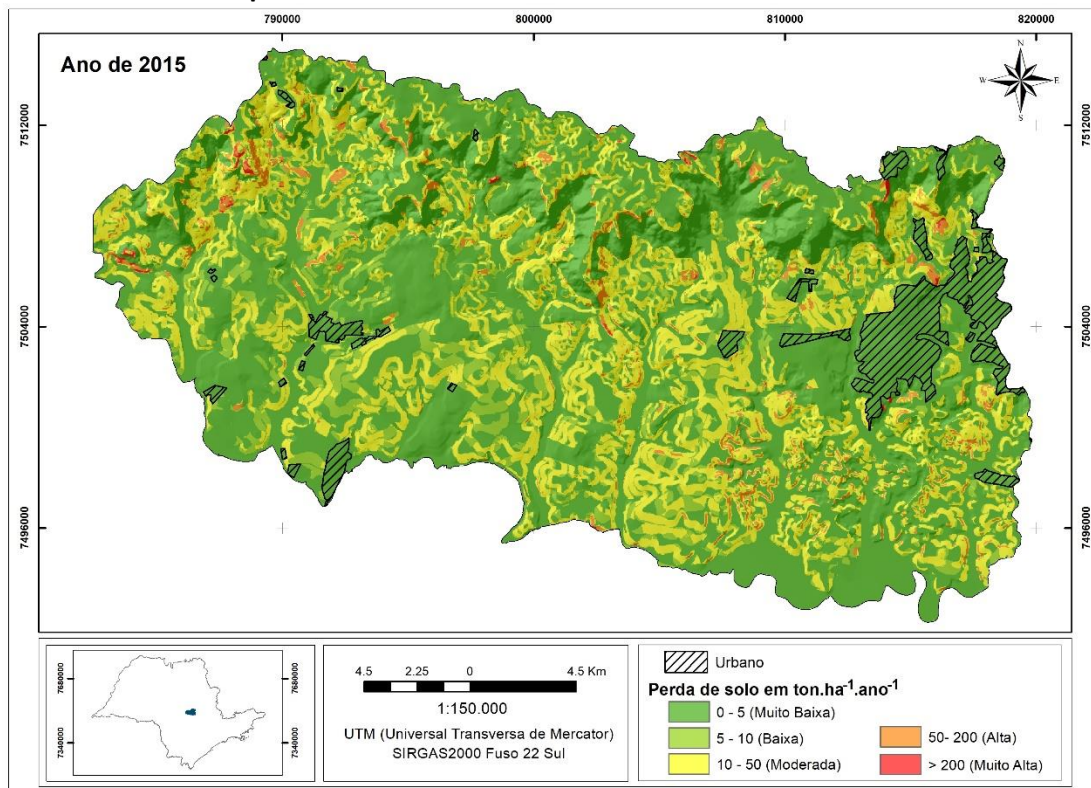
Outro fato interessante em destacar é a tendência da expansão urbana do município de São Pedro, onde nas áreas em que houve o crescimento da mancha urbana, em 1962 já apresentava abundante quantidade de feições erosivas e eram consideradas áreas com médias perdas de solo. Quase toda a área urbana encontra-se sobre Neossolo Quartzarênico, que pelo modelo é considerado um solo de baixa erodibilidade quando associado a relevos mais planos, por ser um solo facilmente drenado.

Entretanto, dependendo do seu manejo, esta classe pedológica pode ser altamente erodível, por apresentar um caráter muito arenoso, esclarecendo o número de feições erosivas identificadas nessa região. Isso reafirma a falta de planejamento urbano e o despreparo das autoridades em fazer um estudo geotécnico prévio de aptidão de urbanização do município.

### ***Ano de 2015***

O ano de 2015 foi o qual obteve a maior taxa de perda de solo de todos os anos. Com uma média de  $9,86 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  e máxima de  $6.944,4 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , apresentou-se como o pior cenário. Essa maior estimativa de perda se deu pelo aumento de áreas com solo exposto que, mesmo com precipitação anual muito abaixo da média, teve influência expressiva para esse aumento de sedimentos.

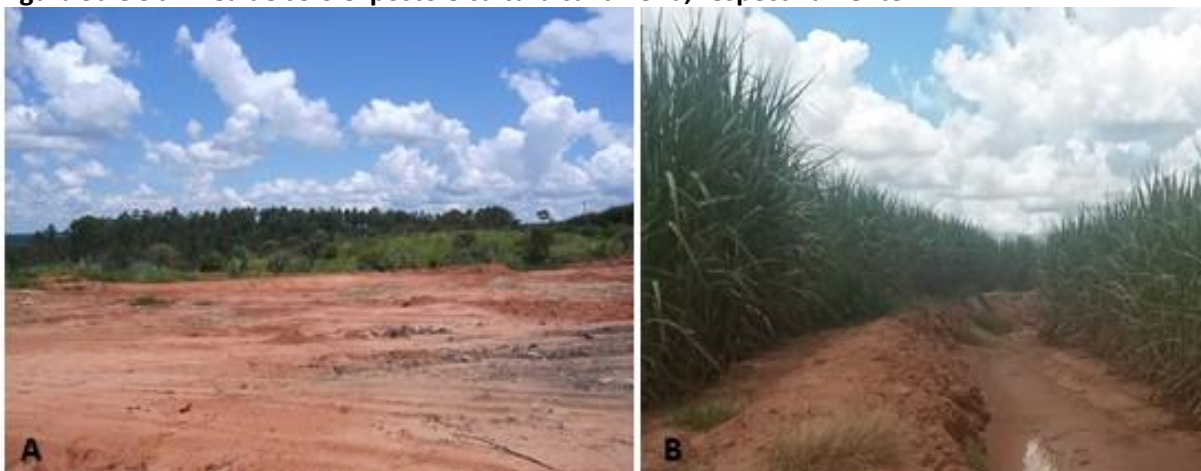
Figura 8. Estimativa de perda de solo do ano de 2015.



Mesmo com uma taxa máxima de perda maior do que nos outros anos analisados, percebe-se uma melhora no cenário em geral. Isso por conta do aumento de vegetação situadas nas áreas de Cuestas e ao longo dos cursos d'água.

Em se tratando de práticas agrícolas, alguns tipos de culturas tornam um mesmo solo mais susceptível a erosão se comparado a outros. Nos dias atuais, a cultura canieira e o solo exposto abrangem expressivas porções na área de estudo (Figura 9).

Figura 9a e 9b. Área de solo exposto e cultura canieira, respectivamente

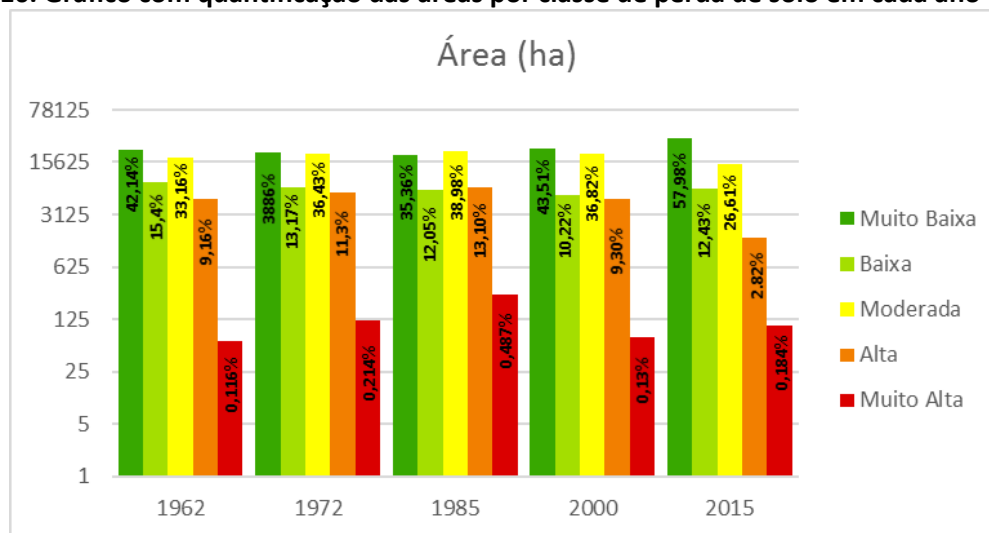


Fonte: elaborada pelo autor.

A cana-de-açúcar, quando associada a práticas não conservacionistas de manejo do solo, pode alterar a forma e a intensidade dos processos erosivos naturais e acarretar a formação acelerada de sulcos, ravinas e voçorocas (SALGADO e MAGALHÃES JÚNIOR, 2006; ASSUNÇÃO e CUNHA, 2009).

Conforme observado no gráfico a seguir (Figura 10), especialmente, as áreas de perda de solo mantiveram-se quase que constantes no período estudado, apresentando pouca oscilação, enquanto que as maiores diferenças se deram no quantitativo de geração de solo.

Figura 10. Gráfico com quantificação das áreas por classe de perda de solo em cada ano \*



\*o gráfico encontra-se em escala logarítmica para melhor visualização dos resultados.

Nota-se que nos anos de 1985 e 2015, a classe muito alta foi maior, se comparada aos outros anos. A presença de solo exposto foi decisiva para esse aumento, uma vez que esta classe de cobertura e uso do solo é adotado o valor 1. Mesmo o solo exposto ter uma maior presença em 2015 (elevando a taxa máxima de perda de solo), em 1985 as áreas ocupadas por mata, eram bem menores, se comparadas atualmente. Pelas características observadas nos usos do solo dos períodos analisados, em comparação com os dados da Tabela 4 e as respectivas cartas de estimativa de perda de solo, é possível constatar a coerência nos resultados obtidos.

É importante ressaltar que, apesar de não terem sido realizados experimentos em campo, a aplicação da USLE foi fundamentada em dados específicos para o Estado de São Paulo. Os resultados obtidos, quando comparados com outros trabalhos realizados em bacias hidrográficas no estado, mostram-se próximos do esperado.

Taxas de perdas de solo semelhantes foram observadas nos trabalhos de Minotti (2006), que observou taxas máximas que variaram de 1,3 a 2.538 t/ha.ano em micro bacias na área do Médio Mogi-Guaçu. Demarchi (2012), encontrou perda máxima de 4.761,57 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> para a bacia hidrográfica do Ribeirão das Perobas, no município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP. Por outro lado, Nery e Lima (2013), chegaram a uma taxa máxima de perda de solo de 32.507,25 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> na bacia do Córrego Canabrava, no Estado de Minas Gerais.

A metodologia aplicada pela USLE, remete a resultados de cunho mais qualitativo do que quantitativo, por apresentar valores estimados de perda de solo. Assim, os valores de perdas de solo por erosão não podem, categoricamente, ser tomados como dados exatos, servindo principalmente para espacializar qualitativamente as áreas quanto a sua maior ou menor susceptibilidade à erosão laminar (FARINASSO, et al., 2006).

Em muitas situações, os gestores de terras e decisores políticos estão mais interessados na identificação de áreas suscetíveis a erosão e na distribuição espacial do risco de erosão do solo do que em valores absolutos da perda desses solos (LU et al, 2004).

Este resultado, evidencia que embora uma variável possa ser categórica em uma maior ou menor taxa de erosão (como a declividade, por exemplo), esta é resultado da interação e influência dos diversos fatores dos meios físico e antrópico.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base no presente estudo, pode-se concluir que por meio deste modelo, foi possível estimar a perda de solo por erosão na área determinada, em relação a diferentes coberturas e usos do solo no período proposto (1962 a 2015).

Observou-se nos distintos anos um comportamento semelhante na relação do meio físico com o manejo da cobertura do solo. No que diz respeito as áreas de declividades mais elevadas onde havia cobertura vegetal, não obtiveram grandes perdas, por conta da proteção mecânica do solo que tal cobertura oferece. De outro modo, em áreas sob cultivos anuais e de cana-de-açúcar e áreas de solo exposto, que apresentaram os maiores valores de perdas de solo. Recomenda-se a adoção de manejos adequados para a manutenção de sua sustentabilidade, como rotação de culturas, cobertura de palha entre os plantios, entre outros.

Outro ponto a ser destacado é a importância do reconhecimento em campo destes usos, que foi fundamental para validar a simulação.

Embora a USLE apresente algumas limitações, como não ter como comprovar a geração de escoamento superficial e, não contemplar erosão linear, não pode ser tomada como dado exato de erosão. Tal modelo contribui para categorizar as áreas quanto a sua maior ou menor susceptibilidade à erosão laminar, tornando-se uma importante ferramenta no planejamento conservacionista, auxiliando na formulação de políticas públicas voltadas ao controle da erosão.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.121-128, 2001.

ALMEIDA FILHO, G. S. de et al. Prevenção e controle da erosão urbana no Estado de São Paulo. In: **Saneamento ambiental: desafio para o século 21**. ABES, 2001. p. 1-12. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/brasil/ix-003.pdf>>. Acesso em: 2015-05-12.

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**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 1997.

ASSUNÇÃO, J. C.; CUNHA, S. B. **Relações entre o Crescimento Urbano Desordenado e a Qualidade das Águas Fluviais na Cidade do Rio de Janeiro**. 13 Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Viçosa/MG. A Geografia e as Dinâmicas de Apropriação da Natureza. Cópias e Cópias, p. 01-14, Viçosa, Minas Gerais, 2009.

BATISTELLA, M.; VALLADARES, G.S. Farming expansion and land degradation in Western Bahia, Brazil. **Biota Neotropica**, v.9, p.61-76, 2009.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.657-668, 2000.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo, Editora Ícone. 335 p, 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo** Piracicaba: Livroceres, 1985.

CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. **CIIAGRO ONLINE**. 2017. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br>.

CORRÊA, E. A. **Caracterização da Cobertura Vegetal na Equação Universal de Perda de Solos (Fator C) por Meio de Geotecnologias**. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Geografia)–Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro (SP).

CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do <sup>137</sup>Cs**. 2003. Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

COSTA, A.L.C. da. **Estudo da vulnerabilidade à erosão com a aplicação da Equação Universal de Perda do Solo na Alta Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Pepira, utilizando SIG/SPRING**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

DAEE. Departamento de Água e Energia Elétrica. **Banco de Dados Hidrológicos**, 2015. Disponível em: <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>

DANIEL, E.; CUNHA, C.M.L. **Avaliação das características do relevo da área urbana de São Pedro/SP e o diagnóstico dos processos erosivos e suas causas.** In: 12º Encuentro de Geografos de America Latina, 2009, Montevideo. Caminando en una America Latina em transformación. Montevideo: Imprenta Gega, 2009.

DANTAS-FERREIRA, M. D. **Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas.** 2008. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

DEMARCHI, J.C. **Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo–SP.** 2012. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO.

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos.** Tese de Doutorado. Piracicaba: USP-Esalq, 1990. 113p

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G.A. GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p.427-433, 1996

DONAGEMMA, G.K et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900001>.

DONZELLI, P. L., VALÉRIO FILHO, M., PINTO, S. A. F., NOGUEIRA, F. P., ROTTA, C. L., e Lombardi Neto, F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. **Documentos IAC**, 29, 91-119, 1992.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Classificação de Solos do Estado de São Paulo.** 1999.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS for the desktop 10.2**, 2013.

F.A.O. 1967. **La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo.** Cuadernos de fomento agropecuario da Org. de Las Naciones Unidas-FAO, Roma, n. 81, 207 p.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. de C.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; RAMOS, V.M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da Eups - Equação Universal de Perdas de Solo, utilizando novas metodologias em sig para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-Pi-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, n.2, p.73-85, 2006.

FOSTER, G.R. e WISCHMEIER, W.H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 17:305-309, 1974.

GARCÍA-RUIZ, J.M., BEGUERÍA, S., NADAL-ROMERO, E., GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C., LANARENAULT, N., SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, v. 239, n.15, 2015, p. 160-173.



GURGEL, R.S.; JÚNIOR, O.A.C.; GOMES, R.A.T, GUIMARÃES, R.F.; CÂMARA, J.F.A.; SOBRINHO, D.A.; MARTINS, E.S.; BRAGA, A.R.S. Identificação das áreas vulneráveis à erosão a partir do emprego da EUPS – equação universal de perdas de solos no município de Riachão das Neves – BA, **Geografia Ensino e Pesquisa**, v.15, n.3, 2011.

IAC. Instituto Agronômico de Campinas. **Solos do Estado de São Paulo**. 2016. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solossp>

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cartas topográficas. **Folhas Topográficas: Brotas (SF-22-Z-B-III-4), Itirapina (SF-23-M-I-3), Barra Bonita (SF-22-Z-B-VI-1), Santa M. da Serra (SF-22-Z-B-VI-2), São Pedro (SF-23-M-III-1)**. Escala 1:50.000, 1971.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981.

\_\_\_\_\_. **Mapa geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:500 000**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981.

IRRIGART. **Relatório da Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí - 2002/2003**. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí. 2004. v.2, p.126-334. Relatório Final.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LIN, B. S. THOMAS, K., CHEN, C. K., e HO, H. C. Evaluation of soil erosion risk for watershed management in Shenmu watershed, central Taiwan using USLE model parameters. **Paddy and water environment**, v. 14, n. 1, p. 19-43, 2016.

LU, D.; LI, G.; VALLADARES, G.S.; BATISTELLA, M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land Degradation and Development**, v.15, p.499-512, 2004.

MINOTI, R.T. **Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Microbacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

NERY, C.V.M; LIMA, F.A. Uso do Geoprocessamento na determinação das perdas de solo por erosão laminar na Bacia Hidrográfica do Córrego Canabrava. In: **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

NOVOTNÝ, I; ŽÍŽALA, D.; KAPIČKA, J.; BEITLEROVÁ, H.; MISTR, M.; KRISTENOVÁ, H.; PAPAJ, V. Adjusting the CPmax factor in the Universal Soil Loss Equation (USLE): areas in need of soil erosion protection in the Czech Republic. **Journal of Maps**, v. 12, n. sup1, p. 58-62, 2016.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. e CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas, Instituto Agronômico/EMBRAPA-Solos. Campinas. 1999. 64p.

PEDROSA, B. M e CÂMARA, G. **Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento**. INPE. São Paulo, 2002.

PINTO, S.A.F.; GARCIA, G.J. Experiências de aplicação de geotecnologias e modelos na análise e modelos de Bacias Hidrográficas. **Revista do Departamento de Geografia**, 17: 30-37, 2005.

PRADO, R.B. **Geotecnologias aplicadas à análise espaço temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 2004.

RAWAT, K.S; MISHRA, A. K; BHATTACHARYYA, R. Soil erosion risk assessment and spatial mapping using LANDSAT-7 ETM+, RUSLE, and GIS—a case study. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 4, p. 288, 2015.

ROSLAN, Z.A.; TEW, K. H.; WALLING, D.; PROBST, J. Use of satellite imagery to determine the land use management factors of the USLE. **IAHS Publication**, v. 245, n. 10, p. 205-206, 1997.

SALGADO, A. A. R.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Impactos da Silvicultura de Eucalipto no aumento das taxas de turbidez das águas fluviais: o caso de mananciais de abastecimento público de Caeté / MG. **Geografias**, 2: 47-57, 2006.

SANGOI, R. G. **Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos na bacia hidrográfica de São Martinho da Serra - RS**, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Brasil - 2007.

SILVA, F. G. B; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim—SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

STEIN, D.P.; DONZELLI, P.L.; GIMENEZA, A.F.; PONÇANO, W.L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na Bacia do Peixe Paranapanema. In: **Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. 4., 1987, Marília, São Paulo. Anais. Marília: ABGE/DAEE, 1987. p. 105135.

TUNDISI, J.G.; TIZIANI, V.; NAKASU, L. Plano de desenvolvimento sustentável do Vale do Acaraú-Plandesva. In: FALCÃO SOBRINHO, J.; FALCÃO, C.L. da. C. (Org.). **Semi-Árido: diversidades, fragilidades e potencialidades**. Sobral: Sobral Gráfica, 2006. p.194-212.

VELÁSQUEZ, S. **Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE)**. Coronado, Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, 2008.

XAVIER, A.P.C; SILVA, A.M; DA SILVA, R.M. Mudanças Espaço-Temporais da Variabilidade Da Precipitação e Perdas de Solo na Bacia do Rio Mamuaba, Brasil. **Cadernos do Logepa**, v. 8, n. 1-2, p. 79-102, 2013.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington: **Agriculture Handbook**, 58 p. 1978.



## **CAPITULO 2 - MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NAS BACIAS RIBEIRAO SAMAMBAIA E RIBEIRAO DO MEIO - SÃO PEDRO/SP**

### **RESUMO**

O crescimento populacional que, muitas vezes, ocorre de forma desordenada, aliado à ocupação humana ao longo das bacias de drenagem pode alterar profundamente a qualidade e reserva de corpos hídricos. A deterioração dos solos está associada com a degradação dos recursos hídricos e da vegetação, assim como a ação antrópica pode acelerar tal processo. A produção de sedimentos nas bacias hidrográficas constitui um aspecto importante para o planejamento do uso do solo, o que, sem dúvida, reflete positivamente na conservação dos recursos hídricos superficiais. O presente estudo teve como objetivo, estimar a produção de sedimentos nas bacias do Ribeirão do Meio e do Ribeirão Samambaia, a partir do modelo hidrossedimentológico SWAT, o qual utiliza dados de entrada a cobertura e uso do solo, os tipos de solos, clima. A partir da simulação realizada, os sedimentos gerados a partir do escoamento superficial nessas bacias podem ser quantificados. Como resultado, verificou-se que as sub-bacias localizadas em maiores declividades, associadas a Neossolo Litólico e usos cana-de-açúcar e pastagem, apresentaram as maiores perdas de solo, chegando a 37,3t/ha/ano no Ribeirão do Meio e 38,7t/ha/ano no Samambaia. Por serem mananciais de abastecimento público, e boa parte das captações de água superficial se encontrarem nas áreas de maior geração de sedimentos, é necessário que seja aplicada medidas emergenciais, assim como praticas conservacionistas, como a revegetação de APP's a fim de conservar garantir a recarga dos recursos hídricos e a disponibilidade hídrica do município.

**Palavras-chave: erosão, geração de sedimentos, mananciais, recursos hídricos.**

### **ABSTRAT**

Population growth, which often occurs in a disordered way, associated to human occupation along the drainage basins can profoundly alter the quality and reserve of water resources. Soil deterioration is associated with degradation of water resources and vegetation, as well as anthropogenic action can accelerate this process. Soil sediment production in the watersheds is an important aspect of land use planning, which undoubtedly positively reflects the conservation of surface water resources. The objective of this study was to estimate sediment yield in the Ribeirão do Meio and Ribeirão Samambaia basins, based on the SWAT hydrosedimentological model, which uses input data to cover and land use, soil types and climate. From the simulation performed, the sediments generated from the runoff in these basins can be quantified. As a result, it was verified that the sub-basins located in greater slopes, associated with Entissoil and sugar cane and pasture uses, presented the highest soil losses, reaching 37.3t/ha/ year in Ribeirão do Meio and 38.7t/ha/year in Samambaia. Due to the fact that they are sources of public

water supply, and a large part of surface water abstractions are found in the areas with the greatest sediment generation, it is necessary to apply emergency measures, as well as conservationist practices, such as the revegetation of APP in order to preserve the recharge of water resources and the water availability of the municipality.

**Key words: erosion, sediment generation, headwaters, water resources.**

## 1. INTRODUCAO

A erosão constitui o principal fator de degradação do solo. O uso intensivo do solo, sem o devido planejamento e o uso de técnicas adequadas, é responsável pela produção de altas taxas de sedimentos, ocasionando o assoreamento de cursos d'água. Isso reforça a importância de estudos referentes a geração e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas.

Desde que tomadas medidas adequadas, alguns processos de degradação do uso do solo são reversíveis, como no caso de recuperação de áreas desmatadas. Entretanto, em relação a degradação dos solos, os processos de formação e regeneração são mais lentos (ARAÚJO et al., 2005).

A erosão envolve os processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas sólidas, denominado sedimentação. Esses processos vêm atuando através do tempo geológico e têm auxiliado no modelamento do relevo atual. A erosão, o transporte e a sedimentação podem causar sérios problemas tais como a perda da fertilidade do solo, transporte e depósito de nutrientes e contaminantes, alterações na qualidade da água, entre outros (CARVALHO et al, 2000; HOROWITZ, 2003; CARVALHO, 2008).

Os sedimentos podem ser desagregados do solo através do escoamento superficial (por meio da ação de energia na superfície do solo proveniente da chuva), assim como pela ação do vento, sendo então transportados pela água, pelo vento ou pela força da gravidade (BROOKS et al., 2003).

O impacto da gota da chuva em um terreno desprovido de vegetação, e o resultante desprendimento das partículas de solo é a principal causa da erosão do solo pela água. O escoamento da enxurrada torna-se apenas um fator atuante no problema. Desse modo, a erosão é mais ativa nesses locais, e a cobertura vegetal serve como proteção do descoberto (BERTONI e LOMBADI NETO, 2012).

Assim como a erosão, o transporte de sedimentos também é uma característica natural dos sistemas hidrográficos, que acabam por moldar as feições das bacias hidrográficas e serve para a manutenção da estabilidade entre os processos de erosão e

deposição, onde essa carga de sedimentos transportada corresponde a capacidade de suporte do sistema e que, com a intervenção antrópica, esta entra em desequilíbrio.

Desse modo, os estudos da produção, remoção e transporte de sedimentos, são ferramentas importantes para o planejamento de processos de conservação do solo e da água. Estes estudos podem ser aplicados na análise de sedimentação em reservatórios, projetos agrícolas, nas mudanças na morfologia do solo e nos processos dinâmicos em bacia hidrográfica (SINGH et al, 2008).

Os modelos matemático/computacionais constituem uma ferramenta bastante empregada na interpretação dos processos naturais associado aos antrópicos, subsidiando medidas preventivas. Basicamente, a modelagem matemática consiste em representar o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real.

Neste contexto, a associação de modelos hidrológicos matemáticos com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) permite manusear dados espaciais, subsidiando o controle, organização e ocupação das unidades físicas do ambiente. Essas análises de baixo custo contribuem com maior agilidade e eficiência nas tomadas de decisão (MACHADO e VETTORAZZI, 2003; MINOTI, 2006; LEE e CHOI, 2010; LESSA, 2011).

Os modelos de predição da erosão são descrições matemáticas capazes de prever, estimar e simular a produção de sedimentos em conjunto com as interferências do uso do solo nos corpos hídricos, assim como identificar áreas propícias a ocorrência dos processos erosivos. Esses modelos são desenvolvidos para a avaliação e planejamento ambiental, para direcionar as ações de decisão sendo utilizados para o dimensionamento de estruturas de controle de erosão e avaliação de práticas de manejo da terra (MACHADO, 2002; SILVA 2003; FERNANDES, 2015).

Dentre os modelos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*, destaca-se por permitir estudar aspectos quantitativos de escoamento, processos erosivos, perdas de sedimentos e nutrientes de áreas agricultáveis, qualidade da água, além de possibilitar a avaliação do

comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em decorrência de alterações no uso e cobertura do solo (ROSA, 2016).

O SWAT é um modelo de escala de bacia hidrográfica, desenvolvido para quantificar o impacto das práticas de manejo de terras sobre a água, sedimentos e insumos químicos agrícolas em grandes e complexas bacias hidrográficas com solos, uso da terra e condições de manejo variados durante um longo período de tempo.

Nesse sentido, a pesquisa objetivou estimar a geração de sedimentos nas bacias do Ribeirão do Meio e do Ribeirão Samambaia a partir da aplicação do modelo **SWAT**, a fim de analisar suas interferências antrópicas nos recursos hídricos, assim como identificar áreas prioritárias para manejo conservacionista.

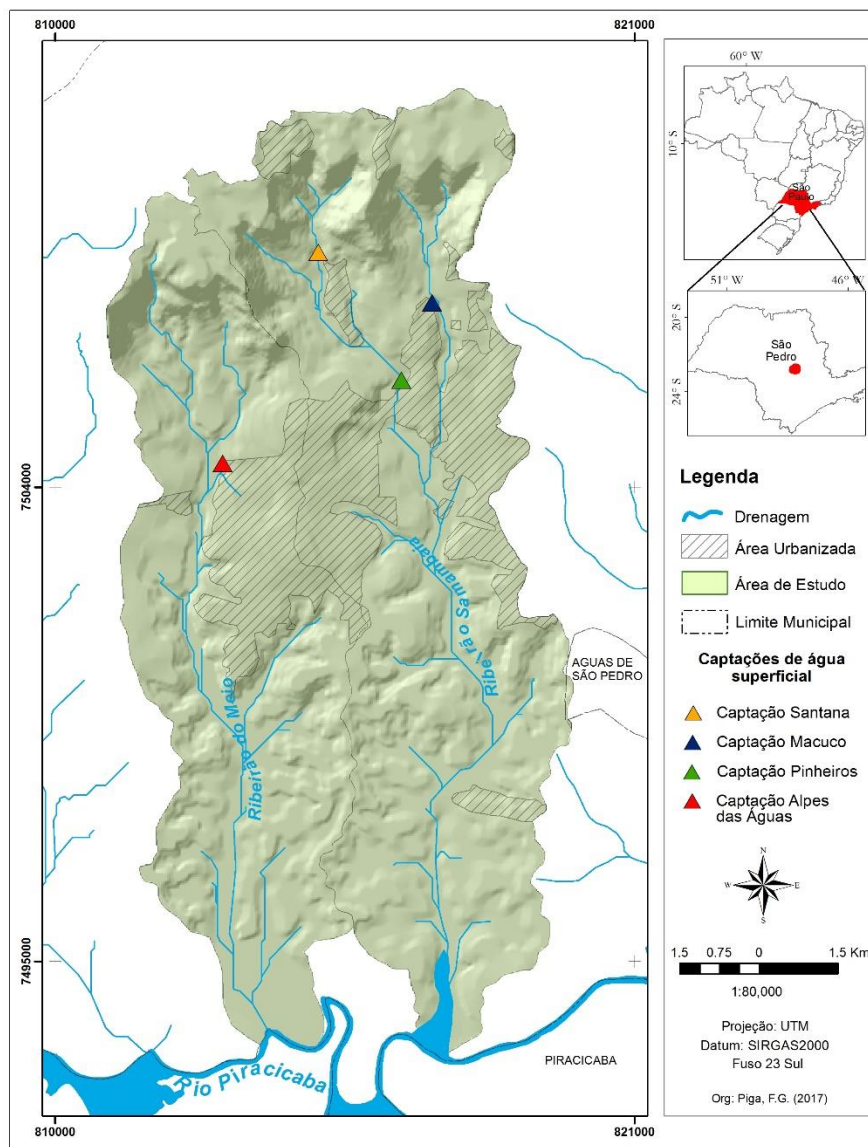
## **2. MATERIAIS E METODOS**

### **2.1 Caracterização da área de Estudo**

A área de estudo está inserida entre as coordenadas UTM 194031 E 7508458 N e 203326 E 7490912 N, localizada na zona urbana e de expansão urbana do município de São Pedro-SP, compreendendo as bacias do Ribeirão Samambaia, com uma área aproximada de 6.937ha e o Ribeirão do Meio, ocupando cerca de 4.825ha, as quais são mananciais de captação de água (Figura 1).



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e suas respectivas captações de água superficial.



A geomorfologia da região é caracterizada, segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo em escala 1:1.000.000 (IPT,1981), pelas seguintes unidades geomorfológicas: O Planalto Ocidental, representado por terrenos com as cotas mais elevadas; as Cuestas Basálticas (escarpas), com declividade muito elevada e a Depressão Periférica.

Em relação a geologia, no Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000, publicado pelo IPT (1981), a região de estudo é representada por cinco formações geológicas: Formação Itaqueri: Predominantemente arenitos de cimento argiloso com

lentes alongadas de folhelhos e conglomerados polimíticos; Formação Serra Geral: rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos de coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios; Formação Botucatu: arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média com estratificações cruzadas de médio a grande porte; Formação Pirambóia: depósitos fluviais e de planícies de inundação incluindo arenitos finos a médios, avermelhados, síltico-argilosos, de estratificação cruzada ou plano-paralela.

Segundo Oliveira et al. (1999), a pedologia é constituída por: Latossolos Vermelho-Amarelo: solos de caráter álico, textura areia média a muito argilosa, e horizonte A moderado a proeminente; Latossolo Vermelho: solos de textura argilosa a muito argilosa, com valores percentuais de areia grossa inferior a 10%, normalmente o horizonte A é moderado e B é apédico; Argissolo Vermelho-Amarelo: solos ácidos a muito ácidos de textura areia média a argilosa, apresentam o horizonte A moderado e o B textural; Neossolos Quartzarênicos: composição essencialmente arenosa (>70%) indica uma origem a partir do retrabalhamento dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu. Apresentam o horizonte A moderado com espessura superior a dois metros, de consistência friável e fortemente ácido; Neossolos Litólicos: solos com horizonte A moderado, com presença de minerais instáveis, caracterizados pelas espessuras do solum inferiores a quarenta centímetros; Gleissolos: materiais restritos às planícies de inundação de alguns cursos d'água que drenam a região.

Ressalta-se a cobertura vegetal natural no *front* das Cuestas Basálticas, enquanto que há o predomínio de cultura de cana-de-açúcar e pastagem nas regiões de relevo suavizado. Pode-se observar também, a presença de vegetação nativa junto nas margens dos principais cursos d'água (DANTAS-FERREIRA, 2008).

A população de São Pedro é estimada em 31.662 habitantes (IBGE, 2010), sendo que 84% da população do município residem na área urbana e de expansão, e são atendidas pelo sistema público de abastecimento de água administrado pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Pedro (SAAESP). Os 16% restantes, correspondentes à população rural

do município, são abastecidos com água proveniente de poços artesianos ou semi-artesianos próprios ou comunitários (SÃO PEDRO, 2013).

## 2.2 Elaboração do Banco de Dados

Para a realização do presente estudo se fez uso dos materiais cartográficos descritos na Tabela 1.

**Tabela 1. Materiais cartográficos utilizados.**

<b>Material</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fonte</b>	<b>Escala</b>
Altimetria	Curvas de Nível, Declividade, Modelo Digital de Elevação	Cartas Topográficas (IBGE, 1971): Folhas Brotas SF-22-Z-B-III-4; Itirapina SF-23-M-I-3; Barra Bonita SF-22-Z-B-VI-1; Santa M. da Serra SF-22-Z-B-VI-2; São Pedro SF-23-M-III-1	1:50.000
Pedologia	Tipos de Solo	Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo (IAC, 1981): Folha de Piracicaba - SF-23-Y-A-IV Folha de Brotas – SF-22-Z-B-III-4 Folha de São Carlos – SF-23-Y-A-I	1:100.000*
Clima	Dados meteorológicos	CIAGRO Estação Meteorológica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Unesp de Botucatu Climate Forecast System Reanalysis	-
Uso e Cobertura do solo 2015	Classes de Usos	Imagem LandSat 8, órbita/ponto 220/76 de 17/11/2015. Composição colorida – bandas: 6, 5 e 4 com fusão com a pancromática (Pixel 15m)	1:50.000

\*Embora impresso na escala de 1:100.000, a base geográfica utilizada para elaboração do mapa pedológico foi a escala 1:50.000 (IAC, 1981)

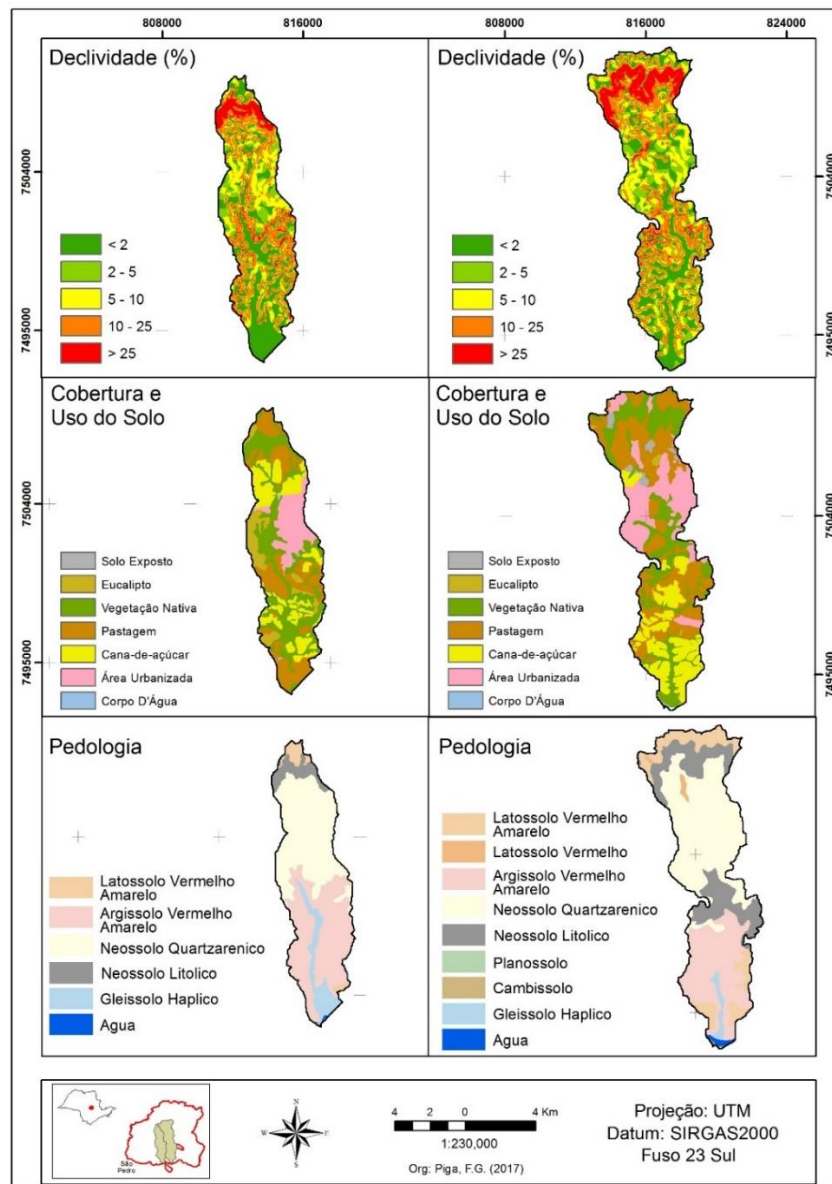
O modelo hidrossedimentológico SWAT é utilizado em interface com alguns *softwares* SIG, como por exemplo o ArcGIS (ArcSWAT), sendo este a ser empregado no presente estudo.

O ArcSWAT foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações do uso e da ocupação do solo sobre a produção/contribuição de sedimentos da bacia hidrográfica para o sistema, bem como no escoamento superficial e subterrâneo. Os principais parâmetros do modelo descrevem processos associados ao movimento da água, ao movimento dos sedimentos, aos solos, ao clima, ao crescimento das plantas, aos nutrientes, aos pesticidas e ao manejo da terra (ARNOLD et al., 1998).

O primeiro passo para a definição dos atributos a serem utilizados na modelagem é por meio da preparação dos materiais cartográficos (planos de informação), os quais foram reescalados e inseridos, juntamente com os dados tabulares no sistema através do *software* ArcGIS (ESRI, 2013).

Os modelos exigem uma mesma projeção para todos os planos de informação (PI's), na qual foi utilizada a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul – 2000 (SIRGAS2000), no Fuso 23 Sul (Figura 2).

Figura 2. Planos de informação das bacias do Ribeirão do Meio e do Ribeirão Samambaia, respectivamente, utilizados na simulação.



### 2.3 Dados de entrada no ArcSWAT

A estimativa de sedimentos realizada pelo modelo se dá através da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (Modified Universal Soil Loss Equation – MUSLE), a qual é uma versão modificada de Equação Universal de Perda de Solo (USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978). Enquanto a USLE calcula a erosão anual média em função da energia da chuva, a MUSLE utiliza a quantidade de escoamento para simular a erosão e

a produção de sedimentos (NEITSH et al., 2002). Ainda de acordo com os autores, a substituição resulta no aumento da precisão do modelo e permite a equação ser aplicada para eventos de chuvas individuais.

A partir da inserção do Modelo Digital de Elevação (MDE), foi delineado o sistema de drenagem, permitindo a decomposição e discretização da bacia em sub-bacias. A partir disso é sobreposto os mapas de uso e cobertura da terra, de pedologia e classes de declive, permitindo assim formar as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). Estes, por sua vez, representam as unidades de controle de informação no modelo ArcSWAT, tanto para parametrização quanto para saída de simulação.

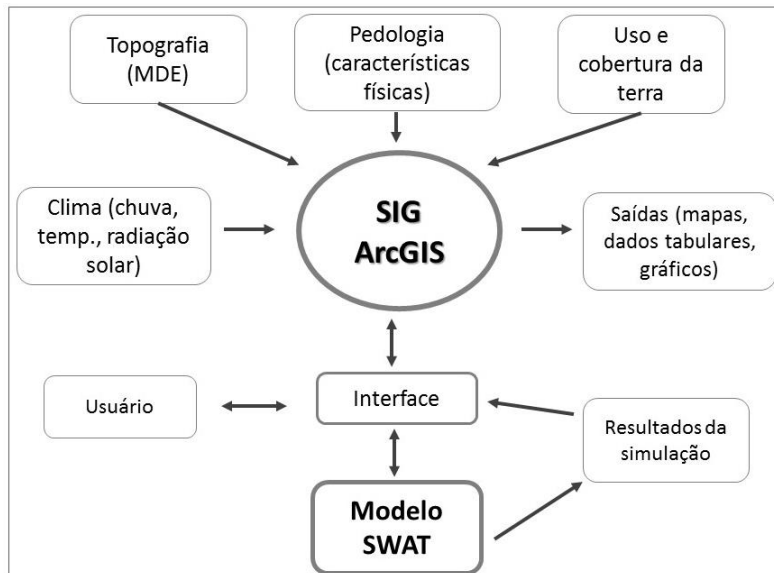
Além dos planos de informação, o ArcSWAT requer o preenchimento de dados tabulares de solos e clima, digitados diretamente no banco de dados do modelo. Em relação aos dados de solos, é solicitado uma grande quantidade de dados pedológicos, dos quais foram baseados nos trabalhos de BALDISSERA (2005) e DANTAS-FERREIRA (2008).

O PI pedológico contém informações das características físico-hídricas, a saber: número de camadas, profundidade do limite inferior de cada camada à superfície, densidade do solo, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada e percentagem das partículas do solo.

Dados meteorológicos diários e mensais foram inseridos no modelo. Os dados diários compreendem precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Os dados foram coletados a partir do banco da Estação Meteorológica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Unesp de Botucatu e da CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), obtidos dos Dados Climáticos Globais para SWAT. O CFSR torna-se uma alternativa potencial viável aos dados meteorológicos observados para modelos de captação hidrológica como SWAT, oferecendo resolução espacial adequada e comprimento de séries temporais para a maioria das aplicações do modelo (MONTEIRO et al, 2016).

As etapas executadas pelo modelo podem ser melhor visualizadas na Figura 3.

**Figura 03. Processo de funcionamento do ArcSWAT.**



Adaptado de MACHADO (2002).

No presente estudo considerou-se apenas os procedimentos de interesse na predição de produção de sedimentos, não tendo sido considerados outros módulos, tais como a produção de nutrientes, qualidade de água, propagação em reservatórios entre outros.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso do ArcSWAT na modelagem ambiental foi quantificar o impacto do uso e cobertura do solo, assim como as características geotécnicas, sobre a produção de sedimentos.

#### 3.1 Calibração e Validação

O modelo ArcSWAT conta com o *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT CUP), ferramenta disponível para auxiliar a calibração, validação e análises de incerteza dos projetos gerados no modelo (EAWAG, 2009).

De acordo com Arnold et al. (1998), com os dados observados, é necessário separar a série temporal de dados observados em dois períodos, um para a calibração e outro para validação. No período de calibração, os parâmetros de entrada do modelo são modificados até que se obtenha um ajuste aceitável. Para o período de validação do modelo, os ajustes obtidos no período de calibração são utilizados para executar o modelo.

Para a calibração foram utilizados dados de vazão das duas bacias, extraídas do estudo de DANTAS FERREIRA (2008) (medição da velocidade com molinete) e do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRH).

O modelo ArcSWAT foi executado mensalmente por um período de 18 anos (1998-2014), incluindo um período de teste (aquecimento) de três anos. O modelo foi calibrado por meio do software SUFI-2 na SWAT-Cup (Versão 5.1.6.2), usando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que descreve o grau de colinearidade entre os dados simulados e medidos; índice de *Nash-Sutcliffe* (NSE), utilizado para comparação da magnitude relativa da variação dos resíduos com a variação dos dados observados; e o percentual de tendências (PBIAS), para avaliar a magnitude de erro.

Os parâmetros utilizados neste trabalho foram baseados em estudos onde tais parâmetros são classificados como mais sensíveis em relação ao balanço hídrico, principalmente a respeito em ambientes tropicais (ARNOLD et al., 2012; LELIS et al., 2012; VILLELA, 2015). Na tabela 2 são descritos os parâmetros utilizados.

**Tabela 2. Parâmetros utilizados na calibração do modelo e seus respectivos valores.**

Parâmetros	Descrição	Valor inicial	Valor final
R_CN2	Curva numero	57,8 <sub>(S)</sub> 36,1 <sub>(M)</sub>	35,6 <sub>(S)</sub> 22,6 <sub>(M)</sub>
V_ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	0,67 <sub>(S)</sub> 0,46 <sub>(M)</sub>	0,27 <sub>(S)</sub> 0,36 <sub>(M)</sub>
V_GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea	31 <sub>(S)</sub> 33 <sub>(M)</sub>	113,2 <sub>(S)</sub> 107 <sub>(M)</sub>
V_GWQMN	Coeficiente “revap” de água subterrânea	0 <sub>(S)</sub> 0,03 <sub>(M)</sub>	0,51 <sub>(S)</sub> 0,42 <sub>(M)</sub>
V_GW_REVAP	Coeficiente “revap” de água subterrânea	0,16 <sub>(S)</sub> 0,13 <sub>(M)</sub>	0,23 <sub>(S)</sub> 0,21 <sub>(M)</sub>
V_ESCO	Fator de compensação de evaporação da água do solo	0,08 <sub>(S)</sub> 0 <sub>(M)</sub>	0,16 <sub>(S)</sub> 0,14 <sub>(M)</sub>
V_CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal principal	0,05 <sub>(S)</sub> 0,01 <sub>(M)</sub>	0,14 <sub>(S)</sub> 0,12 <sub>(M)</sub>
R_CH_K2	Condutividade efetiva do canal ( $\text{mm h}^{-1}$ )	0,6 <sub>(S)</sub> 0 <sub>(M)</sub>	1,8 <sub>(S)</sub> 1,2 <sub>(M)</sub>
V_ALPHA_BNK	Fator alfa de escoamento de base para armazenamento de aquífero	-0,07 <sub>(S)</sub> -0,19 <sub>(M)</sub>	0,3 <sub>(S)</sub> 0,22 <sub>(M)</sub>



<b>R_SOL_AWC.sol</b>	Capacidade de água disponível no solo	0,21 <sub>(S)</sub> 0,14 <sub>(M)</sub>	0,38 <sub>(S)</sub> 0,28 <sub>(M)</sub>
<b>R_SOL_K.sol</b>	Condutividade hidráulica saturada do solo	0,02 <sub>(S)</sub> 0,04 <sub>(M)</sub>	0,19 <sub>(S)</sub> 0,11 <sub>(M)</sub>

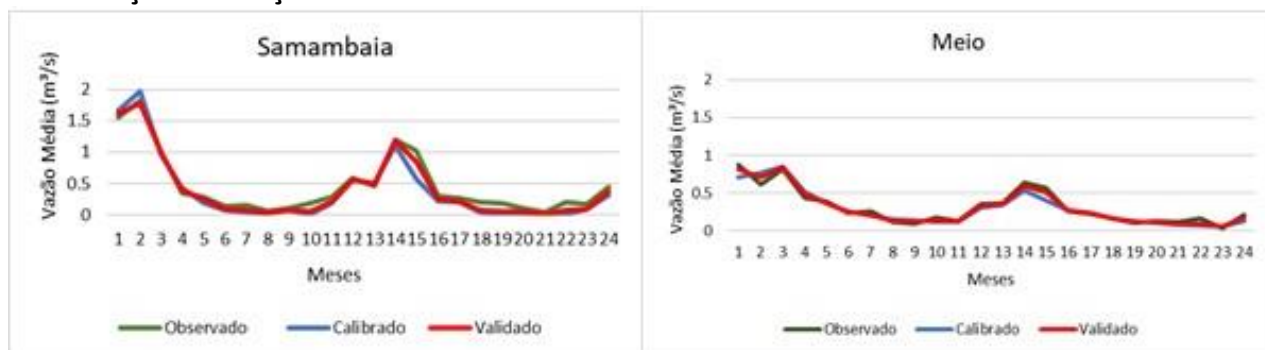
\*(S): Ribeirão Samambaia; \*(M): Ribeirão do Meio.

O processo de calibração foi repetido, até se obter a maximização dos valores referentes à estatística de precisão utilizada para a análise do modelo. Após os ajustes necessários para se chegar a um desempenho satisfatório perante aos testes estatísticos, foi realizada etapa de validação. Os dados nas bacias estudadas, apresentaram os valores mostrados na Tabela 3 e figura 4.

**Tabela 3. Avaliação da precisão das simulações calibrada (c) e validada (v).**

Índices estatísticos	Samambaia	Meio	Desempenho (Moriasi et al, 2007)
<b>R<sup>2</sup></b>	0,90 <sub>(c)</sub> 0,85 <sub>(v)</sub>	0,95 <sub>(c)</sub> 0,86 <sub>(v)</sub>	0,75 < R <sup>2</sup> < 1,00 – Muito bom
<b>NSE</b>	0,89 <sub>(c)</sub> 0,84 <sub>(v)</sub>	0,92 <sub>(c)</sub> 0,89 <sub>(v)</sub>	0,75 < NSE ≤ 1,00 – Muito bom
<b>PBIAS%</b>	6,2 <sub>(c)</sub> 5,9 <sub>(v)</sub>	6,7 <sub>(c)</sub> 6,4 <sub>(v)</sub>	PBIAS ≤ ± 10 – Muito bom

**Figura 4. Hidrogramas para vazões estimadas pelo ArcSWAT e observadas para o período de calibração e validação do modelo.**



De acordo com os valores alcançados, é possível enquadrar o modelo como muito bom. No entanto, o ArcSWAT apresentou uma pequena tendência a subestimar os valores de vazão em 5,9% para o Ribeirão Samambaia e 6,4% para o Ribeirão do Meio, mas ainda assim dentro do aceitável. Os valores positivos do PBIAS indicam viés de subestimação do

modelo e valores negativos indicam viés de superestimação modelo (GUPTA et al., 1999 apud MORIASI et al. 2007).

Lessa et al. (2013) afirmam que, ao calibrar o ArcSWAT para a vazão, o modelo já calibra o parâmetro concentração de sedimentos, visto que o agente de transporte ser o escoamento superficial e as alterações feitas neste parâmetro tenderem a alterar a concentração de sedimentos.

### 3.2 Produção de sedimentos

A quantificação da produção de sedimentos das bacias, assim como parâmetros hidrológicos, tem importância significativa nos processos erosivos, que são responsáveis pelas modificações ocorridas no relevo sob diversas condições climáticas e geológicas.

Na tabela 4, em uma simulação para quinze anos (2000 a 2014), a influência destes parâmetros pode ser verificada.

**Tabela 4. Dados hidrológicos da simulação.**

Meses	Meio			Samambaia	
	Precipitação média (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
1	407,48	113,92	10,4	135,91	26
2	316,82	89,8	7,33	118,5	19,45
3	198,38	40,28	2,01	48,02	4,19
4	99,8	12,46	0,54	16,78	1,25
5	69,08	8,27	0,21	10,6	0,46
6	45,13	7,01	0,17	10,2	0,5
7	37,57	3,01	0,05	4,68	0,2
8	17,55	1,02	0,04	1,49	0,12
9	58,9	3,72	0,08	5,68	0,3
10	132	16,63	0,63	22,51	2,21
11	180,57	36,08	2,01	46,23	5,86
12	271,16	62,45	4,1	80,59	11,34
<b>TOTAL</b>	<b>1834,44</b>	<b>394,65</b>	<b>27,57</b>	<b>501,19</b>	<b>71,88</b>

Verifica-se que há uma maior produção de escoamento superficial e, consequentemente de sedimentos na bacia do Ribeirão Samambaia. Isso, se deve por a bacia apresentar maior área urbanizada, diminuindo a capacidade de infiltração, e possuir uma região de Cuestas mais extensa que do Ribeirão do Meio, ou seja, apresenta um relevo mais acidentado, contribuindo para um maior escoamento superficial. Além disso, as Áreas de Preservação Permanente (APP) próximas as nascentes do Ribeirão do Meio estão mais presentes do que no Samambaia.

Observa-se que na estação chuvosa, ocorre uma maior produção de água e consequentemente uma maior produção de sedimentos. Isso implica que nesses meses o manejo do solo, principalmente em relação às atividades agrícolas, merece uma maior precaução, evitando que o solo esteja desprotegido por muito tempo.

A produção de sedimentos também está relacionada ao tipo de solo presente nestas regiões, onde o predomínio dos solos litólicos (mais susceptíveis a erosão) é maior na bacia do Samambaia do que na bacia do Meio. Outro fator intimamente relacionado às taxas de sedimento é a Curva Número (CN), no qual o modelo utiliza para calcular o escoamento superficial ao tipo de solo e suas características, uso do solo, manejo e declividade do terreno, no qual varia entre 1 e 100, correspondendo respectivamente a uma cobertura permeável até uma cobertura impermeável.

Zuquette et al. (2006), mostram que, ao invés de homogeneidade em termos de textura dos solos, a infiltração e a taxa de escoamento superficial dependem do tipo de uso do solo e às práticas de manejo associadas. De acordo com Tucci (1998) e Bertoni e Lombardi Neto (2012), o comportamento do escoamento depende da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, da declividade e do sistema de drenagem. O escoamento superficial é agravado em áreas que apresentam carência de cobertura vegetal, pois a quantidade de energia que chega ao solo durante uma chuva é maior. Com a presença de vegetação, parte da água precipitada é interceptada, minimizando os impactos das gotas, reduzindo assim a erosão.

Com isso, foi verificada uma diferença mais notável no valor da CN para solo exposto de 86 no Samambaia e 82 no Meio e para vegetação nativa de 64 e 56, no Samambaia e no

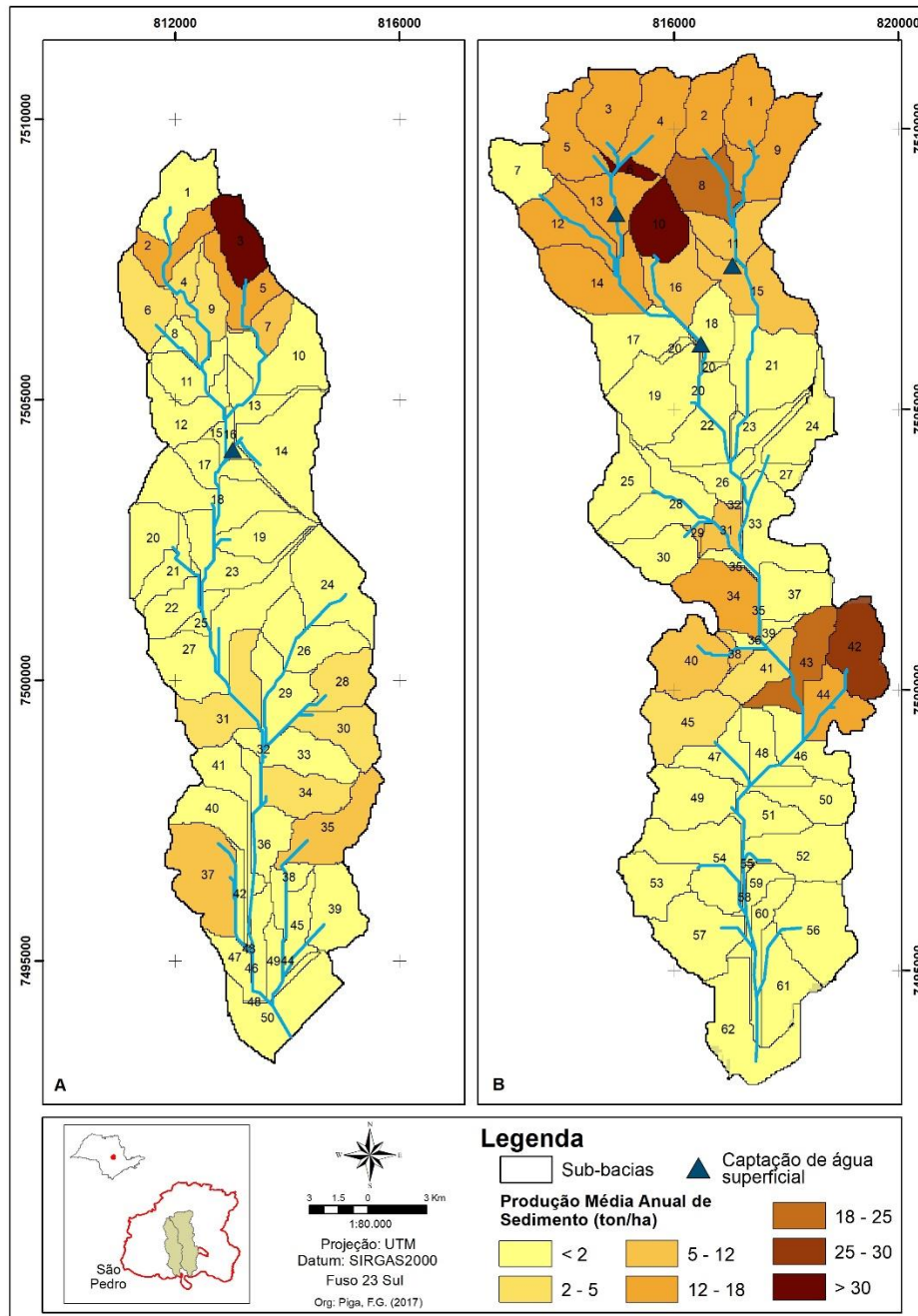
Meio, respectivamente. Enquanto que a diferença da CN nos usos pastagem (75 no Samambaia e 76 no Meio) e cana-de-açúcar (80 no Samambaia e 78 no Meio) foi bem sutil. Tal cenário contribuiu para uma maior taxa de escoamento superficial na bacia do Samambaia e, conseqüentemente, maior produção de sedimentos, conforme apresentado na tabela 4.

Vale ressaltar que, a CN na classe vegetação nativa obteve um valor relativamente alto devido sua majoritária presença em altas declividades (Cuestas) e em solos litólicos. Ainda assim, foi a classe que obteve menor valor de Curva Numero dentre as analisadas.

O ArcSWAT além de correlacionar variáveis ambientais e físicas, divide a área em sub-bacias para uma melhor visualização, auxiliando no manejo do local e na identificação dos fatores mais atuantes no processo erosivo.

Mesmo o clima tendo papel fundamental no processo erosivo no que diz respeito a regiões tropicais, a sua correlação com os fatores físicos e antrópicos é determinante na identificação dessas áreas mais propícias à erosão. Em eventos de chuvas orográficas a combinação dessas condicionantes influencia diretamente na produção do escoamento superficial, principalmente no que diz respeito a áreas com altas declividades, tornando essas regiões com alto potencial de produção de sedimentos. Na figura 5 pode-se observar a produção de sedimentos por sub-bacia da área de estudo.

Figura 5. Espacialização da produção anual de sedimentos da perda de solos por sub-bacias no Ribeirão do Meio (A) e Ribeirão Samambaia (B) no período de 2000 a 2014.



A partir dos resultados obtidos, percebe-se que os processos erosivos que se manifestam em determinada área sofrem influências da precipitação, da variação espacial das ocorrências dos solos, da cobertura vegetal e da morfologia do terreno.

Com relação às características hidrológicas das sub-bacias apresentadas na figura 4, as sub-bacias a montante das captações de água superficial apresentaram as maiores taxas de produção de sedimentos no período analisado.

Verifica-se que no Ribeirão do Meio as sub-bacias 2, 3, 5 e 7 e as sub-bacias 6, 10, 42, 43, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 12, 13, 14, 34 e 44 no Ribeirão Samambaia são as que possuem maiores taxas de produção de sedimentos (> 18t/ha) e apresentaram níveis de produção bem acima da média das suas respectivas bacias

As maiores taxas de geração de sedimentos são promovidas por encostas mais íngremes juntamente com solos litólicos, cenário também observado por Marchioro et al. (2014), em uma bacia no noroeste do Rio de Janeiro e por Machado e Vettorazzi (2003) em uma bacia experimental em Piracicaba-SP.

No levantamento de Silva (2003), as feições erosivas lineares numa determinada bacia no município de São Pedro (SP) estão relacionadas com a concentração de fluxo de águas pluviais nas cabeceiras de drenagem. Ainda segundo a autora, a alta declividade facilita o escoamento superficial e a remoção consequente do material inconsolidado.

Os Neossolos Litólicos são típicos das regiões de relevo mais dissecado ou íngreme, caracterizados por pequena profundidade (rasos) o que limita o crescimento radicular, dificultando o crescimento da vegetação arbórea. Na área estudada estes solos estão principalmente associados às escarpas cuestiformes.

Dantas-Ferreira (2008), ressalta que os materiais residuais dos basaltos apresentam muito baixo potencial à erosão, no entanto a autora encontrou feições erosivas do tipo ravina e concentrações de sulcos em lugares de declividade elevada, associada a pastagem excessiva. Tal fato pôde ser observado também no presente estudo, onde, além de pastagem, pequenas áreas de solo exposto foram determinantes para as maiores taxas de perdas de solo, uma vez que essas classes de cobertura oferecem menor ou nenhuma proteção do solo.

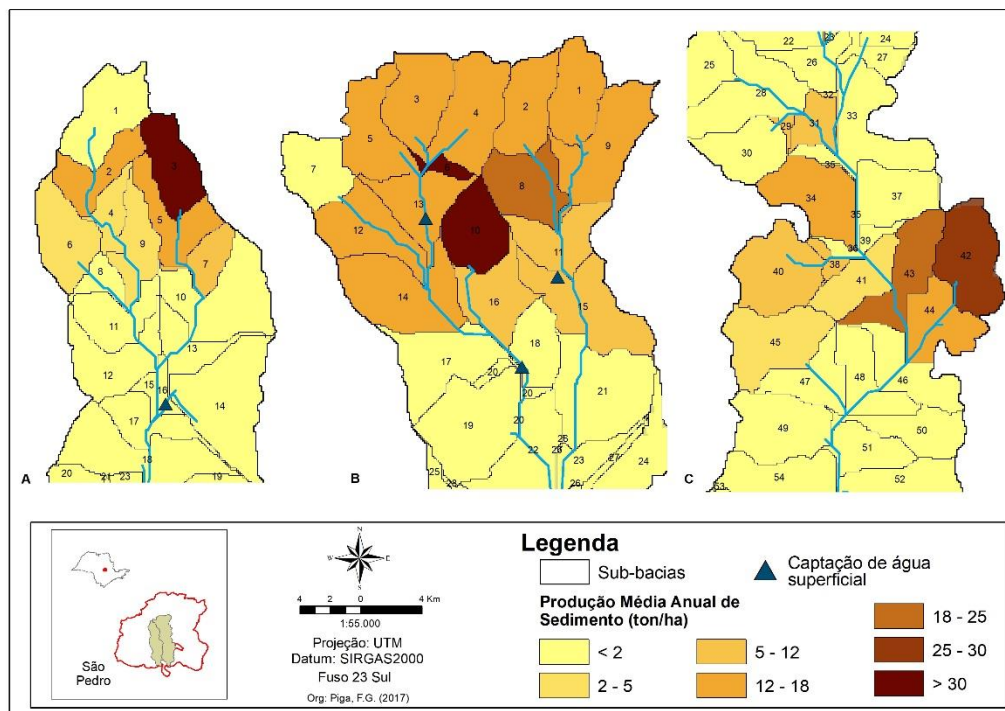
Segundo dados obtidos por Lombardi Neto e Bertoni (1985), os valores de tolerância média de perdas de solo no Estado de São Paulo variam de 4,5 a 13,4t/ha/ano, para B textural e de 9,6 a 15,0t/ha/ano para B latossólico. Nas bacias investigadas, as perdas

excederam a tolerância, devendo ter seus usos e manejos readequados visando diminuir as perdas de solo.

A produção média de sedimentos calculada no período de 2000 a 2014 na bacia do Ribeirão do Meio chegou a 37,3t/ha/ano e na bacia do Samambaia foi de 38,7t/ha/ano. Esses valores mostram-se plausíveis na perspectiva das bacias hidrográficas no Estado de São Paulo. Machado e Vettorazzi (2003), em Piracicaba-SP, verificaram uma produção média de sedimentos de 16,9t/ha/ano em um período de dois anos. Grossi (2003), em uma bacia experimental do Rio Pardo-SP, constatou uma produção média anual de 44t/ha/ano. Também no Rio Pardo, na parte inicial da Bacia, no município de Botucatu-SP, Lessa et al (2013), estimaram uma produção média de sedimentos de 33,8t/ha/ano ao longo dos 6 anos de estudo. Já Silva et al (2010), determinaram 42t/ha/ano de geração de sedimentos em uma bacia no município de São Carlos.

Os fatores que contribuíram para a obtenção dessa expectativa de maior produção foram o relevo acidentado e os solos pouco resistentes à erosão. Nas sub-bacias (28, 30, 31, 34, 35 e 37 no Ribeirão do Meio e 44, 45, 46, 49 e 53 no Samambaia) com predominância de solo Argissolo Vermelho Amarelo (argiloso ou médio/argiloso) e uso agrícola, constatou-se que a produção de sedimentos foi mais elevada, chegando a até 43,8t/ha/mês no período chuvoso, enquanto que com predomínio de Neossolo Litólico (sub-bacias 2, 3 e 5 no Ribeirão do Meio e 3, 4, 5, 6, 8, 10, 34, 40, 42, 43 no Samambaia) chegou a 143,2t/ha/mês, , como pode ser destacado na figura 6.

**Figura 6. Destaque das sub-bacias de maior produção anual de sedimentos por perda de solos no Ribeirão do Meio (A) e Ribeirão Samambaia (B e C)**



Quanto ao uso do solo nessas bacias, verifica-se principalmente a presença de cana-de-açúcar e pastagens sobre solos Litólicos e Argissolos, sendo os mais susceptíveis ao processo erosivo. A localização espacial de áreas agrícolas em relação a vários fatores, como relevo, solos e clima, é de fundamental importância no controle do processo erosivo em microbacias (MACHADO e VETORAZZI, 2003). Isso corrobora com implicação de utilizar as áreas com ocorrência desses solos, somente com culturas perenes ou como Áreas de Preservação Permanente.

De maneira geral, observou-se que as áreas de baixo potencial prevalecem em todo o território das bacias estudadas. Esta baixa taxa de produção de sedimentos se deve ao fato de se situarem sobre Latossolos Vermelhos Amarelos (textura média/argilosa), mais resistentes a erosão, e Neossolos Quartzarênicos, que por apresentarem textura arenosa, possuem maior capacidade de infiltração e são solos profundos, o que contribui para um menor escoamento superficial (FURQUIM, 2002).



Outro fator preponderante, se deve ao fato destes tipos pedológicos estarem sobrejacentes à relevo predominantemente suave, ressalvo a porção central da Bacia do Samambaia (sub-bacias 34, 42, 43 e 44), em face do relevo, com declividades acima de 10%, favorecendo maiores volumes de escoamento superficial e transporte de material gerado.

Um comportamento similar foi verificado por Daniel e Vieira (2015), no Córrego Espreado, também no município de São Pedro, no qual observou-se de forma geral uma redução significativa do volume das feições erosivas, em direção a jusante da bacia estudada, que pode estar relacionada à diminuição da energia da água, à redução da declividade média e a maior presença de Neossolos Quartzarênicos (solos essencialmente arenosos e drenáveis).

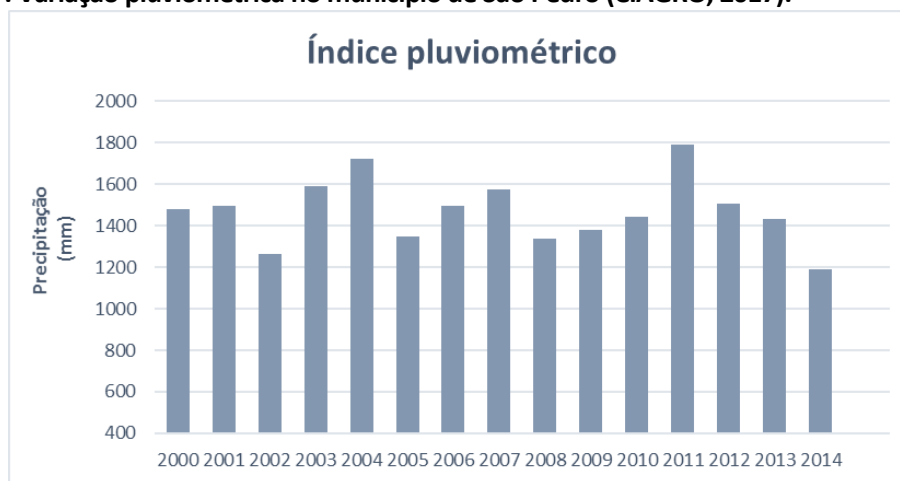
Entende-se que os processos erosivos representam um problema não somente pela perda de solo, prejudicando as atividades agrícolas, mas também por trazerem graves consequências relacionadas ao assoreamento e contaminação dos cursos d'água, lagos e represas. Estudos realizados por Prado (2004) e Buzelli e Cunha-Santino (2013), analisaram a qualidade da água no Reservatório de Barra Bonita. Nos dois estudos, foi constatado um nível considerável de eutrofização, principalmente por nitrato e fósforo, levando a suspeitar de forte contribuição de nutrientes derivados de fontes difusas, relacionadas à agricultura. Provavelmente tais nutrientes são provindos dos rios contribuintes do Rio Piracicaba.

Em relação ao fornecimento de água, na área de estudo existem quatro captações de água superficial, que são utilizadas para o abastecimento do município de São Pedro. De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico de São Pedro, o município capta água dos mananciais superficiais: Ribeirão Pinheirinho e Samambaia, que abastecem 60% do município; e o Ribeirão do Meio, que fornece o restante da demanda, que também conta com o apoio dos poços.

É possível observar que, a maioria das captações encontram-se em áreas com elevada produção de sedimentos, levando a um cenário preocupante, uma vez que, esses sedimentos gerados assoreiam as represas, ou até mesmo podem contaminar os recursos hídricos por meio de insumos agrícolas carregados, comprometendo o abastecimento público da cidade.

Por se tratarem de rios pequenos, qualquer mudança no ambiente pode alterar significativamente o regime hidrológico desses mananciais. Um exemplo é o racionamento de água enfrentado pelo município no ano de 2014, que se repetiu no ano de 2015. Quando comparados os índices pluviométricos nos últimos 15 anos (CIAGRO, 2017) com a média pluviométrica para a região, verifica-se que choveu menos somente no último ano, ainda assim não muito fora do esperado, o que, não justificaria tal cenário de escassez hídrica vivenciada pelo município (Figura 7).

**Figura 7. Variação pluviométrica no município de São Pedro (CIAGRO, 2017).**



Esse cenário de escassez sugere que as áreas de mananciais de captação são sensíveis a qualquer intervenção e podem estar sofrendo processo de assoreamento, requerendo máxima atenção no seu manejo, principalmente no que diz respeito às bacias estudadas, uma vez que as altas declividades associadas aos solos ali presentes, favorecem o escoamento superficial e o transporte de sedimentos gerados pelos processos erosivos.

Outro fator que deve ser levado em consideração é o uso e cobertura do solo, onde parte dessas sub-bacias há presença de pastagem, que asseguram baixa proteção no transporte de sedimentos. Uma alternativa viável seria a revegetação das cabeceiras dos mananciais dessas sub-bacias. Pinheiro et al. (2009), verificaram que em áreas com matas nativas localizam-se os maiores valores de capacidade de infiltração da água. Nesse sentido, o planejamento ambiental e as práticas conservacionistas servem como ferramentas na conservação dos recursos naturais.

Com o intuito de tentar suprir essa escassez no abastecimento público, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Pedro (SAAESP), está viabilizando a definição de um novo manancial superficial, e assim desativar alguns poços comprometidos. Porém, se não forem realizados um levantamento e uma análise adequada, o problema não será resolvido, só irá mudar de lugar, e outro recurso será degradado.

Diante dessa perspectiva, é imprescindível o estudo geotécnico prévio do ambiente, levantando um prognóstico das condições que o recurso natural dispõe e suas potencialidades, a fim de se evitar problemas futuros sem comprometer os serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, o inventário de áreas potencialmente erosivas e a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas constitui um aspecto importante para o planejamento do uso e ocupação do solo, onde as políticas públicas sejam direcionadas para as áreas com maior aptidão.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nas duas bacias estudadas, os maiores aportes resultaram na interação de declividades acentuadas, Neossolos Litólicos, Argissolos Vermelho-Amarelo com culturas de pastagem e cana-de-açúcar.

Em grande parte das bacias analisadas a geração de sedimentos apresentou-se baixa, uma vez que nessas áreas há a presença de relevo suave em consonância com Neossolos Quartzarênicos, que por serem solos profundos e porosos, favorecem a infiltração da água e, conseqüentemente menor escoamento superficial. Embora o modelo tenha apresentado baixo potencial de produção de sedimentos, este solo é bastante suscetível a erosão, o que requer um manejo do solo mais criterioso nas áreas onde ocorre.

Além de provocar sérias conseqüências na aptidão urbana e agrícola do solo, a estimativa da perda de sedimentos é considerada de grande importância na avaliação do nível de contaminação dos recursos hídricos superficiais, devido a sua capacidade em transportar contaminantes e serem possíveis fontes de contaminação, além de contribuir para o assoreamento desses recursos.

Neste contexto, os modelos de erosão fornecem previsões de taxas de perda de solo que são ferramentas valiosas no estabelecimento de ações e políticas públicas, tais como a definição de áreas agrícolas potenciais e suas práticas conservacionistas, controle de expansão urbana, conservação, manejo e restauração, conforme as características do ambiente.

O modelo se mostrou de grande valia, uma vez que permite a inserção de dados específicos do local estudado, possibilitando sua aplicabilidade em qualquer território provido de informações adequadas. Sua desvantagem é a vasta quantidade de dados que o modelo exige, e que podem prejudicar sua capacidade de representar a realidade, bem como de servir como ferramenta eficiente para qualquer atividade de diagnóstico ou de planejamento de bacias hidrográficas. Apesar das dificuldades em obter alguns dados, o modelo mostrou-se bastante capaz de representar qualitativamente os padrões de propagação de sedimentos nas bacias em questão.

## REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Res. Assoc.* 34(1):73-89, 1998.

ARNOLD, J.G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R. et al. SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

ARAÚJO, G.H.S; ALMEIDA, J.R.; GUERRA, A.J.T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 4ª ed. São Paulo: Bertrand Brasil, 320p, 2005.

BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Cuiabá-MT. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo, Editora Ícone. 335 p, 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo** Piracicaba: Livroceres, 1985.

BROOKS, K.N.; FOLLIOTT, P.F.; MAGNER, J.A. **Hydrology and the Management of Watersheds**. Iowa: Iowa State Press, 558p, 2003.

BUZELLI, G.M; CUNHA-SANTINO, M.B. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP). **Ambi-Agua**, Taubaté, 8: (1), pp 186-205, 2013. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.930>

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 599 p. 2008.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. 2000. 154p.

CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. **CIIAGRO ONLINE**– Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br>.

DANIEL, E; VIEIRA, B.C. A evolução das feições erosivas da Bacia Do Córrego Espriado, São Pedro (SP). doi 10.5216/bgg.v35i2.37435. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 321-337, 2015.

DANTAS-FERREIRA, M.D. **Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 454 pp, 2008.

EAWAG. **SWAT-CUP**. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: [www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index\\_EN](http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index_EN)

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS for the desktop 10.2**, 2013.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. Tese (Doutorado) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

FURQUIM, S. A. C. **Interações entre modelo e solo no transecto do Espriado, São Pedro/SP**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GROSSI, C. H. **Sistema e informação geográfica - Basins 3.0 na modelagem hidrológica da Bacia Experimental do Rio Pardo, SP**. 2003. 101f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Rio Pardo, 2003.

HOROWITZ, A.J. Na evaluations of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrol. Process.** 17, pp. 3387-3409, 2003.

IAC. Instituto Agrônomo de Campinas. **Solos do Estado de São Paulo**. 2017. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **Censo 2010**. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - 1981. **Mapa geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:500 000**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada.

\_\_\_\_\_ 1981. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo.

LEE, G.S.; CHOI, I.H. Scaling Effect for the Quantification of Soil Loss Using GIS Spatial Analysis. **Journal of Civil Engineering**, v.14, n.6, p.897-904, 2010.

LELIS, T. A., CALIJURI, M. L., DA FONSECA SANTIAGO, A., CARDOSO DE LIMA, D., & DE OLIVEIRA ROCHA, E. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, 2012.

LESSA, L. G.; F; ZIMBACK, C. R. L; LIMA, S. L; MACHADO, R.E. Modelo hidrológico SWAT na determinação das perdas de solo na bacia hidrográfica do rio Pardo - Botucatu/SP. **Revista Energia na Agricultura**.v.3, p.170-178, 2013.

LESSA, L.G.F. **Simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Pardo– Botucatu, SP, por modelagem hidrológica**. Tese de Doutorado, UNESP, Botucatu-SP, 2011.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão do Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 735-741, maio, 2003.

MACHADO, R.E., **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002

MARCHIORO, E.; FERNANDES, N.F; DE MACEDO, J.R; BHERING, S.B.; GONÇALVES, A. O; PRADO, R. B. Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro-Brasil. *Revista Geografias*, v. 10, n. 1, p. 54-70, 2014.

MINOTI, Ricardo Tezini. **Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. 2006. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MONTEIRO, J. A. F., STRAUCH, M., SRINIVASAN, R., ABBASPOUR, K., AND GÜCKER, B. (2016) Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrol. Process.**, 30: 1419–1430. doi: 10.1002/hyp.10708.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v.50, p.885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2000. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 498 p.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. e CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPA-Solos. Campinas. 1999. 64p.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambi-Agua**, v. n. 2, pp. 188-199, 2009.

PRADO, R.B. **Geotecnologias aplicadas à análise espaço temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 172 p, 2004.

ROSA, D.R.Q. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do Rio Pomba utilizando o Swat**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 127 p, 2016.

SÃO PEDRO. **Plano Municipal de Saneamento Básico de São Pedro**. Volume 1 - SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. PROESPLAN Engenharia, 2013.

SIGRH. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. **Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://143.107.108.83/cgi-bin/regnet.exe?lig=podfp>

SILVA, F.G.B.; MINOTTI, R.T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim-SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

SILVA, A. F. **Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tucum - São Pedro (SP), Escala 1:10.000**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SINGH, P.K.; BHUNYA, P.K.; MISHRA, S.K.; CHAUBE, U.C. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**. 349, pp. 244-255, 2008.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

VILLELA, J.M. **Avaliação da influência da expansão da cana-de-açúcar no regime hidrossedimentológico na microbacia do córrego Cana do Reino, Votuporanga - SP**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington: **Agriculture Handbook**, 58 p. 1978.

ZUQUETTE, L.V; PALMA, J.B; PEJON, O.J. Initial assessment of the infiltration and overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer), State of São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 50, n. 3, p. 371-387, 2006. DOI: 10.1007/s00254-006-0216-2.





### **CAPITULO 3 - GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE E GESTÃO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA APA CORUMBATAÍ/ SP-BRASIL**

#### **RESUMO**

O processo de urbanização provoca modificações no meio ambiente, alterando suas características originais. As unidades de conservação tornaram-se uma opção muito utilizada pela gestão pública na tentativa de preservar os recursos naturais. Outra ferramenta bastante empregada pelos órgãos públicos no planejamento territorial é o mapeamento da fragilidade ambiental, que delimita zonas de maior vulnerabilidade em relação a alterações das funções ecossistêmicas e intervenções antrópicas. Esta pesquisa teve como objetivo realizar o diagnóstico da fragilidade ambiental aos processos erosivos de uma área de aproximadamente de 550km<sup>2</sup>, inserida na APA Corumbataí, caracterizada pela grande ocorrência de erosões, promovendo considerada carga de sedimentos para Represa de Barra Bonita. O mapa de fragilidade ambiental foi obtido a partir da integração dos fatores físicos, bióticos e antrópicos. Os resultados mostram que 76% da área total possui Média a Muito Forte Fragilidade Ambiental, implicando que a região requer maior atenção, principalmente no que diz respeito às áreas mais vulneráveis. Esse estudo permite subsidiar tomadas de decisões no planejamento urbano e priorizar ações para minimizar os danos ambientais da APA.

**Palavras-chave:** fragilidade ambiental, planejamento territorial, gestão hídrica, unidade de conservação.

#### **GEOTECHNOLOGIES APPLIED IN ANALYSIS AND MANAGEMENT OF THE CONSERVATION UNITS: CASE STUDY APA CORUMBATAÍ/ SP-BRASIL**

#### **ABSTRACT**

The urbanization process causes environmental changes, changing its original characteristics. As conservation units have become a much-used option for public health management in an attempt to preserve natural resources. Another tool used by public agencies in territorial planning is the mapping of environmental fragility, which delimits areas of greater vulnerability in relation to ecosystem functions and anthropogenic interventions. The objective of this research was to diagnose the environmental fragility of an area located in the APA Corumbataí, characterized by the great occurrence of erosions, to promote the sediment load for the Barra Bonita Dam. The map of environmental fragility was obtained from the integration of physical, biotic and anthropic factors. The mapping results pointed to 76% of the total area has Medium to Very Strong Environmental Fragility. This research allowed that can subsidize the decision making, territorial planning and prioritizing actions that will minimize the environmental damages in the APA.

**Keywords:** environmental fragility, territorial planning, water management, conservation unit.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os problemas ambientais estão relacionados ao complexo cenário de crise geral e à falta de políticas públicas adequadas quanto ao planejamento da utilização racional dos recursos naturais. O mau uso desses recursos, na maioria das vezes, provoca perdas irreversíveis (BASTOS, 2006).

Os efeitos do uso irracional dos recursos naturais causam degradação do ambiente, tendo como algumas consequências os processos de erosão, as inundações, os assoreamentos desenfreados de reservatórios e cursos d'água, levando a uma perda da qualidade ambiental urbana. Com isso, afim de tentar preservar e conservar esses recursos naturais, são criadas áreas prioritárias, denominadas unidades de conservação (UC).

Segundo Milano (2001 apud Maciel 2011), as UC's têm o intuito de garantir a integridade física do ambiente sem perder suas características e valores, mediante utilização de acordo com o objetivo específico de cada categoria de UC e o manejo adequado.

O planejamento de medidas de proteção e conservação em áreas protegidas é uma prioridade, tendo como finalidade garantir a integridade da paisagem. Essa integridade pode ser avaliada por meio de modelos, que permitem realizar análises estruturais e funcionais da área, assim como suas potencialidades e vulnerabilidades de forma integrada, por meio de técnicas de geoprocessamento e/ou sensoriamento remoto como, por exemplo, o mapeamento da fragilidade ambiental.

O presente trabalho adotou a metodologia elaborada por Ross (1994; 2012). Diversos trabalhos de fragilidade ambiental têm sido desenvolvidos, sendo que no Brasil são fundamentados principalmente pela metodologia de Ross (op. cit.) A metodologia para avaliação da fragilidade empírica proposta pelo autor fundamenta-se no princípio de que a natureza apresenta funcionalidade intrínseca entre suas componentes e utilizam informações do relevo, solo, geologia, clima, uso da terra, cobertura vegetal, possibilitando a análise das fragilidades potencial e ambiental.

O mapeamento de fragilidade ambiental constitui uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos no planejamento territorial. Esse mapeamento permite a avaliação das características ambientais de forma integrada, considerando suas potencialidades e restrições de uso, promovendo áreas mais resistentes e, assim, proteger melhor as áreas mais vulneráveis (KAWAKUBO et al. 2005; TOMCZYK, 2011; TROMBETA et al. 2014).

No que diz respeito a unidades de conservação em áreas urbanas, as maiores interferências exercidas pelas ações envolvidas em sua implantação e operação deverão dar-se preferencialmente nas áreas originalmente mais alteradas, sendo resguardadas aquelas que mantenham suas características mais primárias (GUAPYASSÚ e HARDT, 1998).

As unidades de conservação denominadas Áreas de Proteção Ambiental (APA), nas quais são possíveis a permanência humana e as que se encontram em áreas densamente urbanizadas e povoadas, possuem uma problemática particular: o direito de propriedade e o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, que está intimamente ligado à função social (COSTA et al., 2009).

Um exemplo é a APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá, na qual compreende os municípios de São Carlos, Analândia, Brotas, Itirapina, Corumbataí, Ipeúna, Rio Claro, Dois Córregos, Torrinha, Mineiros do Tietê, Barra Bonita, Santa Maria da Serra, São Pedro, Charqueada e São Manuel. A APA é de suma importância regional, pois abrange inúmeros atrativos naturais como cachoeiras, corredeiras e saltos, resultantes dos desníveis abruptos do relevo das serras de Itaquerí e São Pedro, morros testemunhos, grutas, represas, áreas de remanescentes de flora, entre outros. Sendo uma região conhecida pela sua beleza cênica, é amplamente difundida pelas suas atividades ecoturísticas (CORVALÁN, 2009).

Porém, essa região trata-se de uma área bastante representativa por processos erosivos e afetada pelo processo de ocupação desordenada nos municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra, sendo a região uma das áreas que mais contribui com carga de sedimentos para o rio Piracicaba e conseqüentemente para a zona de represamento da barragem de Barra Bonita (SP).

Em 1997, o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) realizaram o Diagnóstico da Erosão no Estado de São Paulo, que levantou a existência de cerca de 6.700 erosões no Estado, a maior parte de médio e grande porte, as chamadas voçorocas, causadas pelo tipo de solo e pela ocupação desordenada.

A crescente demanda da produção agrícola tem acelerado intensamente os processos de erosão dos solos, resultando na alteração da qualidade da água e assoreamento de rios e reservatórios, sendo a principal causa da degradação acelerada das terras. Além do assoreamento dos corpos d'água, os sedimentos provenientes de áreas agrícolas promovem a contaminação desses recursos hídricos, já tão escassos no atual contexto de mudanças climáticas (VALÉRIO FILHO, 1994; MINOTI, 2006).

Estima-se que, na área rural cerca de 80% das terras cultivadas esteja sofrendo processo erosivo além dos limites de recuperação natural do solo, representando uma perda anual de aproximadamente 200 milhões de toneladas de solo. Em relação a área urbana, a erosão urbana é um dos principais problemas ambientais que afetam as cidades paulistas, e está diretamente relacionada com o processo de rápida urbanização sem planejamento e práticas de parcelamento do solo inadequadas e deficientes (DAEE, 2017).

Além disso, segundo dados do Ministério de Minas e Energia, 79,6% da energia elétrica no Brasil é de origem hidráulica (BRASIL, 2013). Assim, represas e reservatórios, podem ter o seu tempo de vida útil reduzido por conta dessa carga de sedimentos.

Portanto, os estudos de processos erosivos são imprescindíveis na avaliação de impactos ambientais, e vêm sendo desenvolvidos com as mais diferentes finalidades, considerando os diversos componentes do meio ambiente. Esses estudos possuem a finalidade de avaliar e evitar perdas econômicas, sociais e ambientais decorrentes da erosão.

Diante disso, tornam-se essenciais os estudos sobre a erosão, para mitigar o assoreamento de reservatórios. Para aperfeiçoar o mapeamento e o estudo dos processos erosivos, as ferramentas tecnológicas têm sido muito utilizadas, sobretudo para integração

de dados georreferenciados, elaboração de mapas temáticos, avaliação, planejamento, diagnósticos e prognósticos ambientais (CÂMARA e MEDEIROS, 2001).

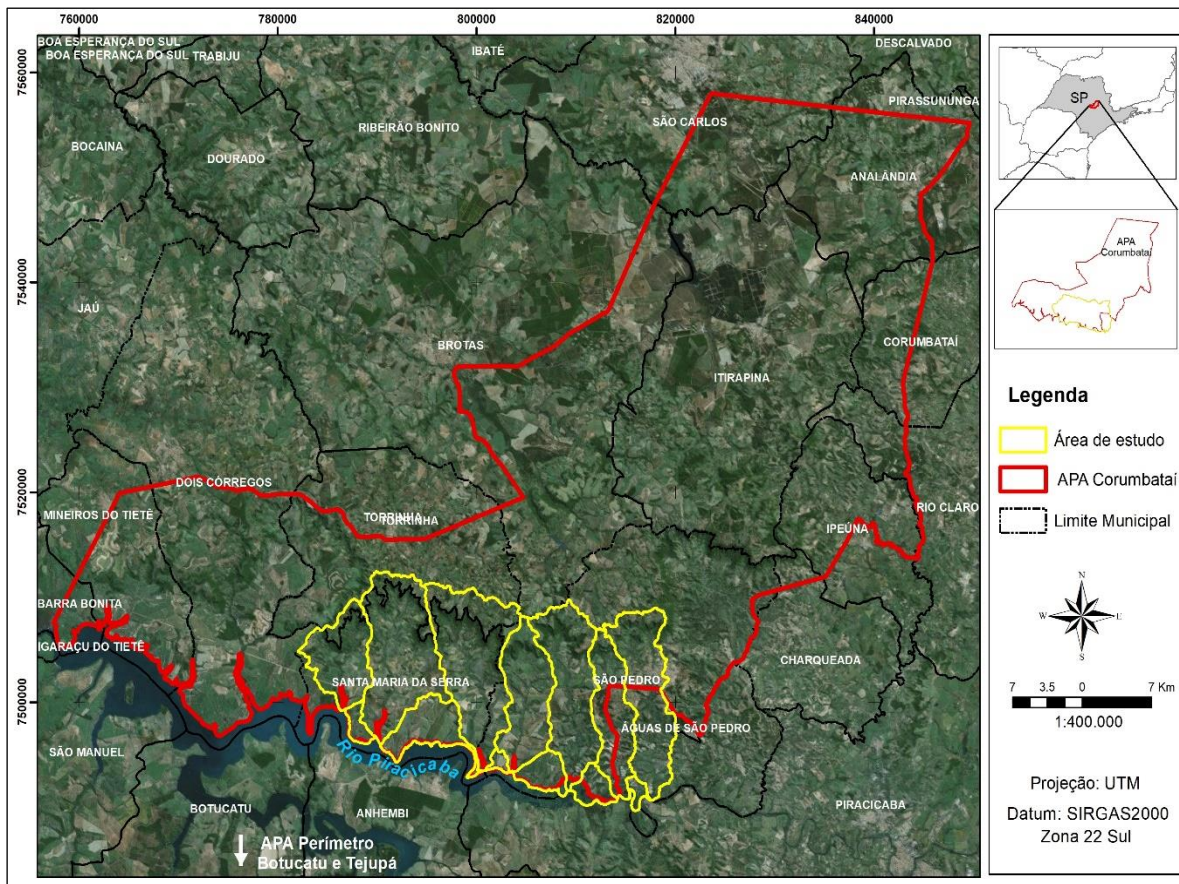
A partir do que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar os diferentes graus de fragilidade ambiental, frente aos processos erosivos, em uma região de 550 Km<sup>2</sup> (20%) da APA Corumbataí à margem direita do reservatório de Barra Bonita - SP entre os municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra, e verificar a viabilidade da utilização dos resultados obtidos no planejamento territorial e ambiental da APA Corumbataí e na gestão de sedimentos no Reservatório de Barra Bonita.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da Área de estudo**

A área de estudo abrange sete bacias: Serelepe, Bonito, Tabaranas, Barra, Vermelho, Meio e Samambaia, além das interbacias, englobando os municípios de São Pedro e Santa Maria da Serra. Está compreendida entre as coordenadas UTM 782016 m E e 7490616 m N do fuso 22 e UTM 202263 m E e 7490317 m S do fuso 23, totalizando uma área aproximada de 550 Km<sup>2</sup>. A região está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí-Botucatu-Tejupá, no perímetro Corumbataí (APA Corumbataí) (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

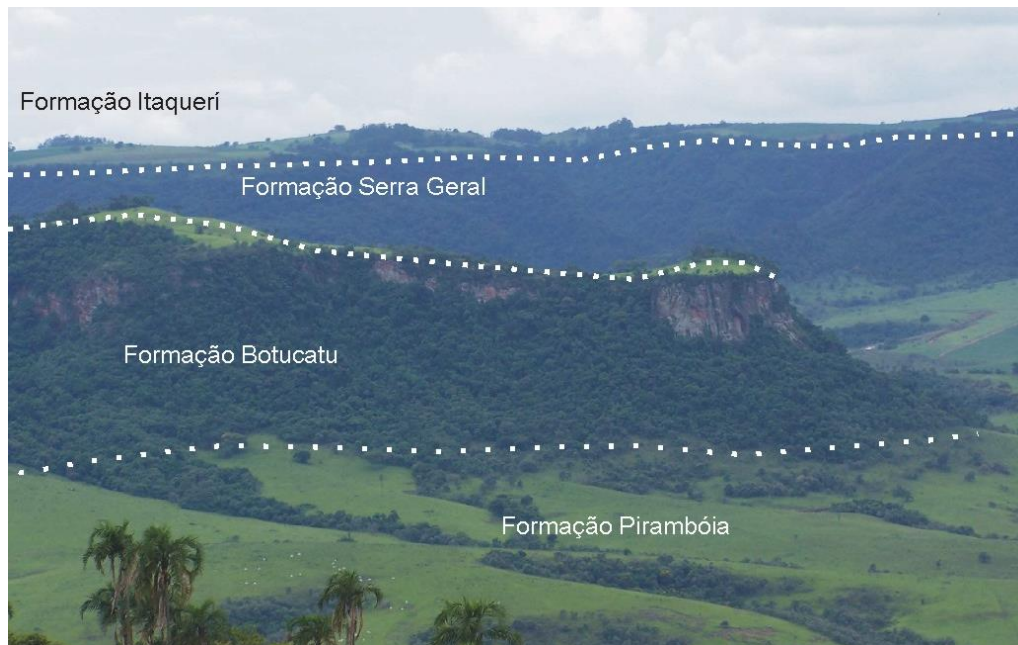


A APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá está subdividida em três perímetros distintos, ocupando cada um deles: Perímetro Corumbataí (272.692 ha), Perímetro Botucatu (218.306 ha) e Perímetro Tejupá (158.830 ha), e foi criada pelo Decreto Estadual nº 20.960, de 8 de junho de 1983, com o objetivo de proteger as Cuestas Basálticas, seus atributos ambientais e paisagísticos, morros testemunhos, recursos hídricos superficiais, o Aquífero Guarani, remanescentes de vegetação nativa e patrimônio arqueológico.

A área de estudo foi definida pela região ser bastante representativa, sendo intensamente afetada pelos diferentes tipos de erosão. Segundo o Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo, em escala 1:1.000.000 (IPT, 1981), a área de estudo é constituída pelo Planalto Ocidental, representado por terrenos com as cotas mais elevadas; as Cuestas Basálticas (escarpas), com declividade muito elevada e a Depressão Periférica.

Em relação às formações geológicas, segundo o Mapa Geológico do estado de São Paulo escala 1:500.000, publicado pelo IPT (1981), a região de estudo é representada por quatro formações geológicas, conforme apresentado na Figura 2 e na Tabela 1.

**Figura 2. Distribuição espacial das formações geológicas na área de estudo.**



Fonte: Dantas-Ferreira 2008.

Tabela 1. Descrição das Formações Geológicas (IPT 1981).

Simbologia		Descrição
KTi		<i>Formação Itaqueri</i> – Predominantemente arenitos de cimento argiloso com lentes alongadas de folhelhos e conglomerados polimíticos.
Grupo Bauru	JKsg	<i>Formação Serra Geral</i> - Rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos de coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, de estratificação cruzada tangencial e esparsos níveis vitrofíricos não individualizados.
	JKb	<i>Formação Botucatu</i> - Arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média com estratificações cruzadas de médio a grande porte; depósitos fluviais restritos de natureza areno-conglomerática e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres.
	TJp	<i>Formação Pirambóia</i> - Depósitos fluviais e de planícies de inundação incluindo arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, de estratificação cruzada ou plano-paralela; níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza areno-conglomerática.

Segundo o sistema de Köppen, em função das características de temperatura e precipitação, pode-se identificar para a grande área de estudo, compreendendo o município de São Pedro, um clima tropical do tipo Aw, tropical chuvoso com inverno seco e verão quente, mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. No que diz respeito na localidade de Santa Maria da Serra, o clima é caracterizado pelo tipo Am, marcado pelo clima tropical chuvoso, com inverno seco. A precipitação média anual de 1467mm (CEPAGRI 2017). Ocorrem ainda chuvas de efeito orográfico em função à proximidade da Serra de São Pedro.



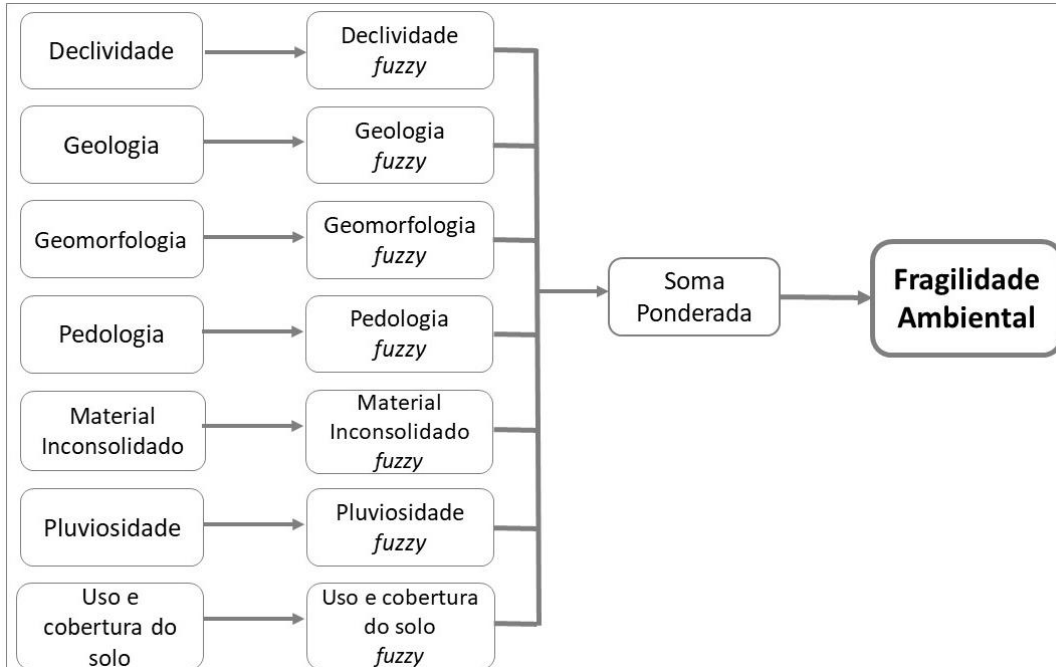
Em relação à vegetação, nas Cuestas Basálticas encontram-se os exemplares de maior porte. A outra parte está ocupada por atividades agrícolas com o predomínio de cana-de-açúcar, pastagens e reflorestamentos (eucalipto). Pode-se observar também a concentração de vegetação nativa junto às margens dos principais ribeirões e córregos (DANTAS-FERREIRA, 2008).

## 2.2 Metodologia

A análise das diferentes categorias hierárquicas das fragilidades dos ambientes naturais consiste na integração de atributos físicos e ambientais, tais como: levantamentos pedológicos, geológicos, do uso e cobertura do solo, das formas do relevo e climáticos.

Os procedimentos para essa avaliação são apresentados de forma resumida no fluxograma a seguir (Figura 3).

**Figura 3. Fluxograma do método utilizado para a fragilidade ambiental.**



A lógica Fuzzy é utilizada na análise de mapas integrados, ao invés de mapas fundidos gerados pela álgebra Booleana, permitindo uma maior flexibilidade nas

combinações de mapas com pesos (ESCADA, 1998). Essa metodologia pode ser definida como a parte da matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural (PAULA e SOUZA, 2007).

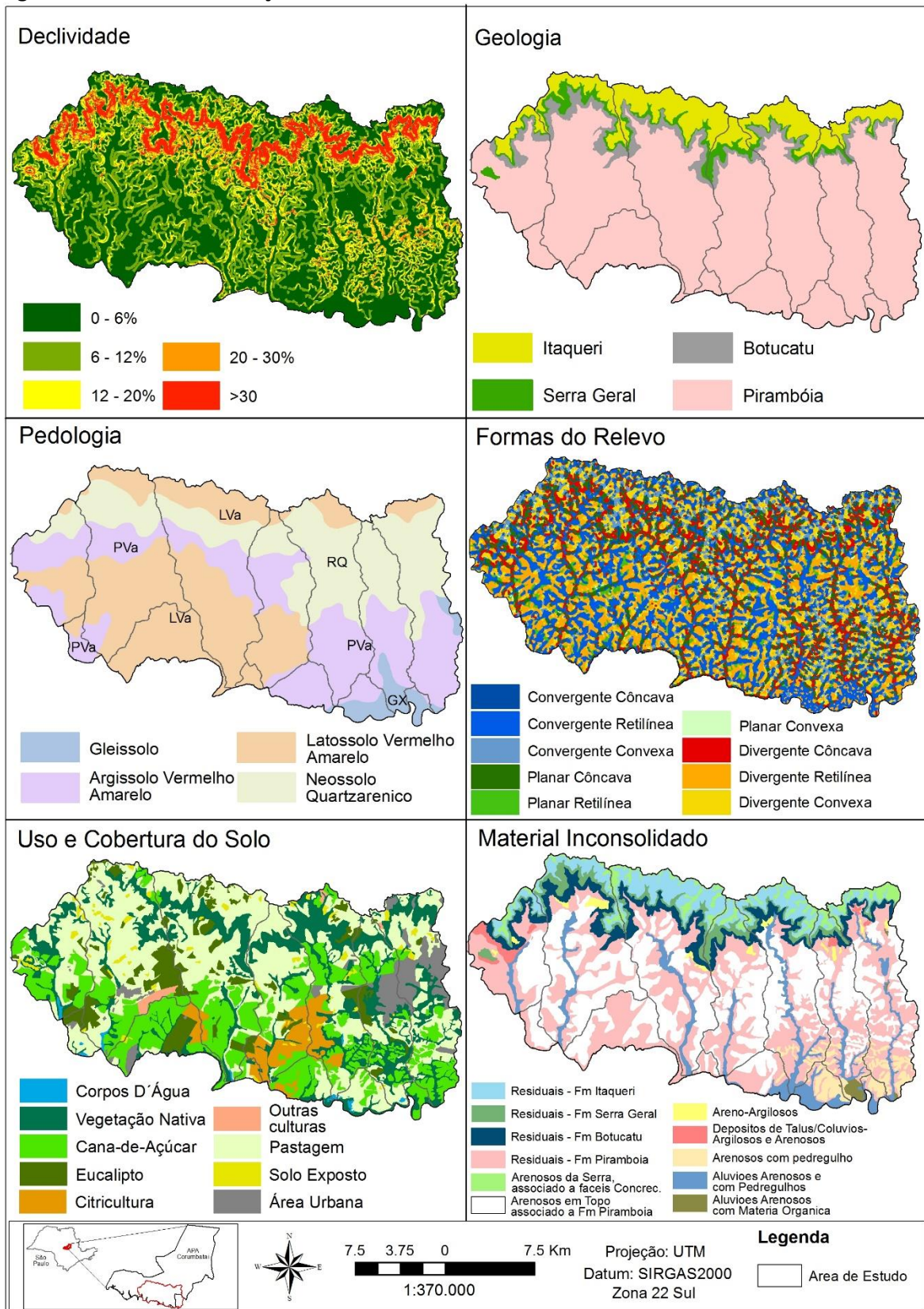
Para o presente trabalho, os planos de informação (Tabela 2 e Figura 4) foram georreferenciados, reescalados e manipulados no *software* ArcGIS® 10.2 (ESRI, 2013) no datum SIRGAS 2000 e projeção UTM Fuso 22 sul. Os dados que não se encontravam em escala adequada para a realização desse trabalho foram adaptados e reinterpretados.

**Tabela 2. Planos de informação utilizados para as análises.**

Material	Descrição	Fonte	Escala
Altimetria	Curvas de Nível, Declividade, Modelo Digital de Terreno	Cartas Topográficas (IBGE, 1971): Folhas Brotas SF-22-Z-B-III-4; Itirapina SF-23-M-I-3; Barra Bonita SF-22-Z-B-VI-1; Santa M. da Serra SF-22-Z-B-VI-2; São Pedro SF-23-M-III-1	1:50.000
Pedologia	Tipos de Solo	Mapa pedológico do Estado de São Paulo (IAC/Embrapa, 1999)	1:500.000*
		Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo (IAC, 1981): Folha de Piracicaba - SF-23-Y-A-IV Folha de Brotas – SF-22-Z-B-III-4 Folha de São Carlos – SF-23-Y-A-I	1:100.000
Geomorfologia	Formas de Terreno	INPE (2017) Valeriano (2008)	1:50.000
Geologia	Formações Geológicas	Dantas-Ferreira (2008)	1:50.000
Material Inconsolidado	-	Dantas-Ferreira (2008)	1:50.000
Clima	Pluviosidade	DAEE (2017) Estações D5-062; D4-060	-
Uso e Cobertura do solo 2015	Classes de Usos	Imagem LandSat 8, órbita/ponto 220/76 de 17/11/2015. Composição colorida – bandas: 6, 5 e 4 com fusão com a pancromática (Pixel 15m)	1:50.000

\*A base cartográfica de referência utilizada na elaboração foi do IBGE, na escala 1:250.000 (Oliveira, 1999).

Figura 4. Planos de informação dos atributos físicos e ambientais.



A metodologia adotada para a determinação das classes de fragilidade foi a descrita por Ross (1994; 2012). Segundo o autor, essas variáveis integradas em uma análise permite um diagnóstico das classes de fragilidade presentes na paisagem, na qual são estabelecidas ponderações (pesos) para cada uma dessas variáveis. Os pesos atribuídos foram baseados nessa metodologia considerando as características dos materiais presentes na área de estudo (Tabela 3).

Tabela 3. Pesos conferidos aos atributos físico-bióticos utilizados.

Classes de Fragilidade/	Declividade (%)	Geologia	Forma do Relevo	Material Inconsolidado	Tipos de solo	Pluviosidade	Classes de uso do solo
Muito Fraca (1)	< 6	Serra Geral	Convergente Côncava	Residuais – Fm Serra Geral  Aluviões arenosos com matéria orgânica	Latossolo Vermelho Amarelo (muito argiloso) Latossolo Vermelho	-	
Fraca (2)	6 a 12	-	Planar Côncava; Divergente Côncava	Aluviões Arenosos e com pedregulhos Depósitos de tatus/coluvios – argilosos e arenosos Residuais – Fm Botucatu	Latossolo Vermelho Amarelo (textura média/argilosa) Latossolo Vermelho Distrófico (textura média) Litolico eutrófico associado a Latossolo Vermelho Amarelo (argiloso) Latossolo Vermelho Amarelo associado a Neossolo Quartzarênico (saturado)	-	Vegetação;  Eucalipto

Média (3)	12 a 20	Itaqueri	Planar Retilínea; Divergente Retilínea; Convergente Retilínea	Areno- argilosos Arenosos com pedregulho	Argissolo Vermelho Amarelo (argilosa ou média/argilosa)	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno; no verão com intensidades mais altas de dezembro a março, com volumes de 1300 a 1600 mm / ano.	Pastagem; Citricultura
Forte (4)	20 a 30	Botucatu	Planar Convexa; Convergente Convexa	Residuais – Fm Itaqueri Arenosos da Serra, associado a fácies concrecionário	Gleissolo; Litólico	-	Cana-de-açúcar; outras culturas (milho)
Muito Forte (5)	> 30	Pirambóia	Divergente Convexa	Residuais – Fm Piramboia Arenosos em topo associado a Fm Pirambóia	Neossolo Quartzarênico Argissolo Vermelho Amarelo (arenoso)	-	Solo exposto; Urbano

Fonte: adaptado de Ross (1994; 2012).

Após essa etapa foi aplicada às classes resultantes a lógica *fuzzy*, de tipo linear, com valores de zero a um, a fim de equalizá-los. Essa metodologia nas análises multicritério, de integração de variados fatores, é bastante empregada uma vez que, permite valores graduais de pesos e considera cada fator com o mesmo grau de influência no resultado final, reduzindo a propagação de erros e gera dados mais confiáveis (RUHOFF, 2004; EASTMAN, 2006; FUSHITA et al., 2010; CEREDA JUNIOR, 2011; COSTA et al., 2015).

Posteriormente foi realizada a soma dos atributos ambientais utilizando o módulo *Weighted Sum* (soma ponderada) do software ArcGIS (ESRI, 2013). O mapa resultante foi agrupado em cinco categorias de fragilidade (ROSS, 2012): Muito Fraca (0,0-0,2), Fraca (0,2-0,4), Média (0,4-0,6), Forte (0,6-0,8) e Muito Forte (0,8-1,0).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A integração dos mapas dos atributos físicos e ambientais possibilitou a construção da matriz de fragilidade e a interpretação dos resultados. Por conta dos materiais cartográficos apresentarem escalas muito distintas, foram realizadas duas análises: a primeira considerando o atributo pedologia e a segunda contemplando os materiais inconsolidados.

#### **3.1 Análise da Fragilidade Utilizando Pedologia**

Por meio da sobreposição dos subprodutos foi possível verificar uma predominância da classe média (48%), seguida da classe forte (31%), fraca (14%), muito forte (6%) e muito fraca (1%), conforme demonstram as Figuras 5 e 6.

Figura 5. Distribuição das classes de fragilidade ambiental da área de estudo.

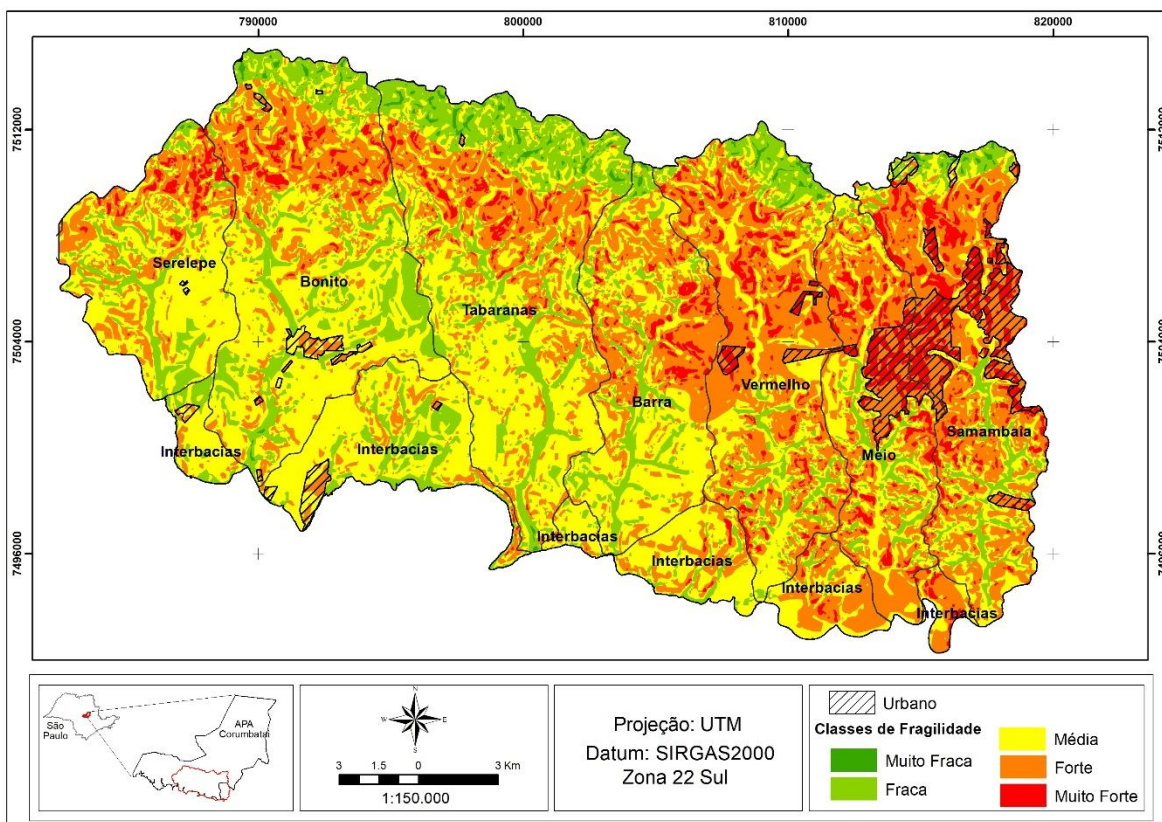
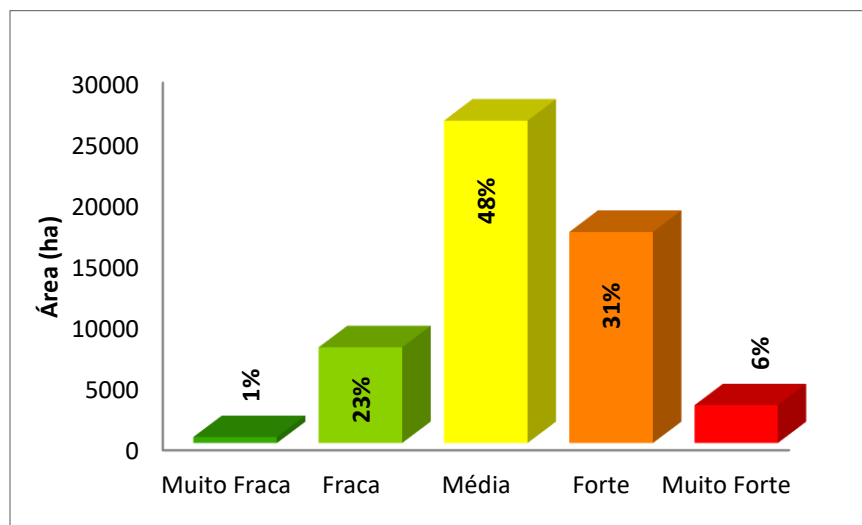


Figura 6. Distribuição dos valores de fragilidade ambiental de acordo com as classes



As características físicas e as variáveis bióticas e abióticas contribuíram para a determinação do grau de fragilidade ambiental aos quais os municípios de São Pedro e



Santa Maria da Serra vem sendo submetidos ao longo dos seus processos de ocupação territorial, principalmente pelas atividades agrícolas.

Na análise da influência de cada fator nas classes de fragilidade ambiental, vale ressaltar:

1. A fragilidade muito fraca está distribuída por pequenos fragmentos (494 ha), principalmente ao norte da área de estudo. Encontra-se especialmente ao longo dos cursos d'água e áreas de relevo Convergente, Planar e Divergente Côncava. Estas áreas caracterizam-se por apresentar baixa velocidade de escoamento superficial, favorecendo a estabilidade do ambiente (COSTA et al. 2015). Outro fator foi a predominância de Latossolo Vermelho Amarelo nessa classe. Estes estão associados a cobertura de pastagem e vegetação nativa (contribuindo na infiltração e uma melhor proteção do solo) e a menores declividades (< 6%). A declividade do terreno exerce influência direta no processo de perda de solo por erosão, pois, quanto maior seu gradiente, maior a intensidade de escoamento das águas sob o efeito da gravidade, sendo, portanto, menor o seu tempo disponível para a infiltração no solo (CORVALÁN, 2009).

2. Em relação a fragilidade fraca (7.875 ha), esta foi mais influenciada pela presença do Latossolo Vermelho Amarelo, associados a declives de 0 a 12% (terrenos planos a ondulados) (EMBRAPA, 1979), nos quais são solos mais profundos, bem desenvolvidos e possuem uma boa resistência a processos erosivos (PRADO, 2004; LEME, 2007). Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2012), as características do solo podem levá-lo a ser mais erodível que outro, mesmo quando se tem fatores similares (condições climáticas, intensidade de chuva, declividade, práticas de manejo e taxa de cobertura vegetal) que influenciam na taxa de erosão.

Esta classe, encontra-se distribuída na formação geológica Itaqueri (predominantemente arenito). Apesar de ter recebido peso médio, esses fatores associados à ocorrência de baixos declives, solos permeáveis, formas de relevo suavizadas e uma predominante cobertura do solo (vegetação nativa, pastagem e eucalipto), apresentaram uma menor vulnerabilidade, sendo decisivo para composição dessa classe.

3. A classe média foi a mais representativa (26.322 ha) e encontra-se distribuída por toda área de estudo. Diferentemente das classes descritas anteriormente, essa classe está intimamente relacionada à formação Pirambóia (arenitos puros a arcossianos e arenitos argilosos) pois além de apresentar maior ocorrência (77%), está associada a Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo e Gleissolo. Os Argissolos são mais facilmente erodíveis que os Latossolos, pois apresentam mudança textural, por vezes abrupta, dificultando a infiltração de água no solo e tornando-o suscetível à erosão (IAC, 2016). No que diz respeito ao Gleissolo, é um solo considerado jovem e pouco desenvolvido, apresentando grau máximo (peso 5) de vulnerabilidade ambiental (LEME, 2007). Nesse caso, associada à ocorrência de Gleissolos, observa-se o predomínio das menores declividades e relevo convergente côncavo, no qual favorecem um menor escoamento superficial. Tal conjuntura permitiu com que este solo estivesse inserido na classe de média fragilidade.

Já em relação ao uso e cobertura do solo, mesmo em declividades mais suaves e solos menos vulneráveis, a presença de práticas agrícolas (cana-de-açúcar, citricultura e outras culturas (ex. milho)), conduziu a essa classificação de fragilidade média. Alguns tipos de culturas são mais prejudiciais para o solo do que outros. A agricultura de cana-de-açúcar torna o solo mais suscetível à erosão do que a agricultura perene (JINNO et al. 2009; LEPSCH, 2010). Além disso, essa erosão acarreta no transporte de insumos agrícolas, poluindo os recursos hídricos. Nas figuras 7a e 7b é possível observar a ocorrência de erosão em terraços do cultivo de cana-de-açúcar.

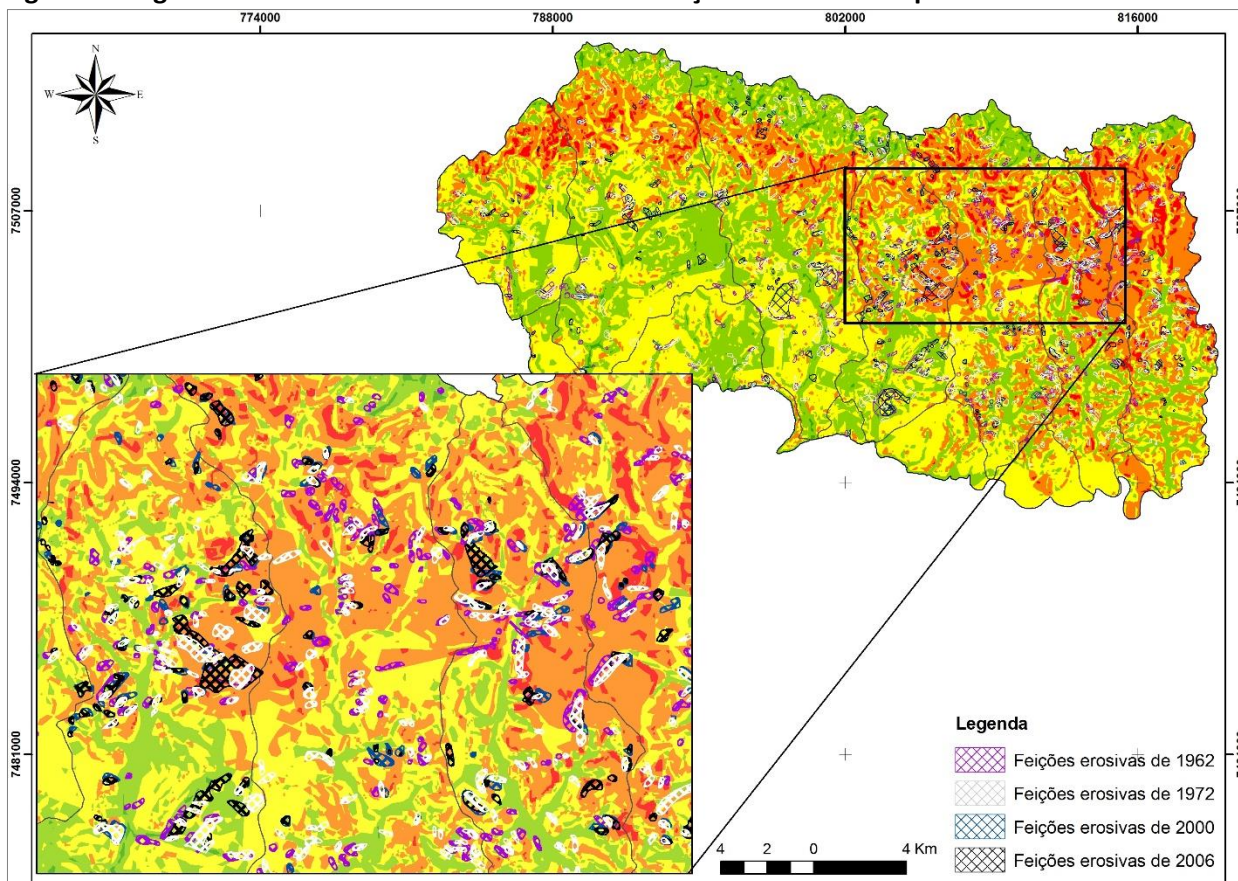
**Figura 7a e 7b. Erosão laminar em terraços de cultivo de cana-de-açúcar.**



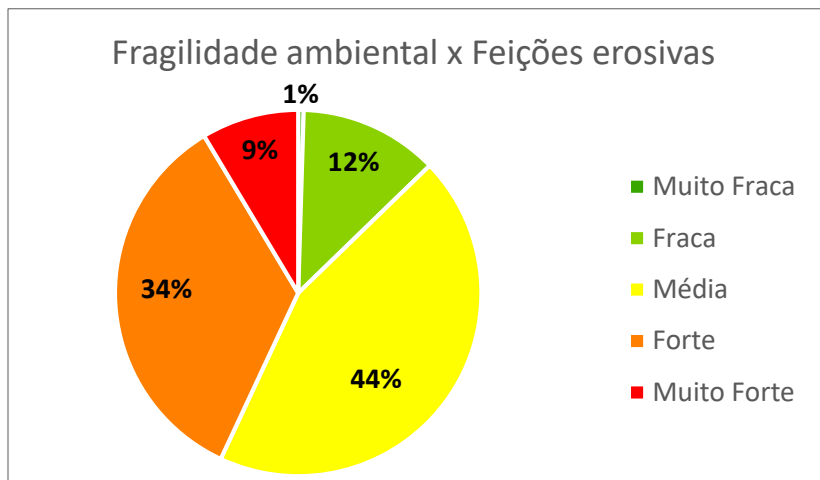
Fonte: elaborada pelo autor.

Dantas-Ferreira (2008), mapeou as feições erosivas do tipo linear (voçoroca e ravina) na área de estudo por meio de fotointerpretação, nos anos de 1962, 1972, 2000 e 2006. Salvo algumas áreas, boa parte do levantamento realizado coincide com áreas de médio e elevado grau de fragilidade, principalmente próximas a áreas urbanizadas e de expansão urbana (Figura 8 e 9).

**Figura 8. Fragilidade ambiental com levantamento de feições erosivas do tipo linear.**



**Figura 9. Distribuição dos valores de fragilidade ambiental de acordo com feições erosivas.**



Observa-se que maior parte das feições se encontram na classe de fragilidade média, seguida da forte e apenas 13% das erosões identificadas encontram-se em áreas de baixa e muito baixa fragilidade, indicando que, o ambiente possui condições favoráveis a estes processos.

Tal fato ressalta que a região sofre com processos erosivos do tipo laminar e linear há mais de 60 anos, implicando que as práticas conservacionistas, por parte da esfera administrativa e social, estão sendo ineficientes ou até mesmo inexistentes.

Para Minoti (2006), o planejamento conservacionista das terras torna-se fundamental para a conservação do solo, controle da perda de sedimentos e água, gerando informações importantes para o processo de tomada de decisão no gerenciamento de bacias hidrográficas.

4. No que diz respeito a classe de forte fragilidade (17.271 ha), está diretamente relacionada às altas declividades (> 20%), presença principalmente de Neossolo Quartzarênico (originado a partir do retrabalhamento dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu) e Gleissolo. Esses solos são considerados por Ross (1994; 2012) como de fragilidade ou erodibilidade muito forte. O Neossolo Quartzarênico, por ser muito arenoso, com baixa capacidade de agregação de partículas, é muito suscetível à erosão. Considerando-se o relevo em que ocorre, o processo erosivo não é alto, porém, quando ocupam as cabeceiras de drenagem (caso da área de estudo), geralmente, dão origem a

grandes voçorocas (AGEITEC, 2016). Carpi Junior (1996), identificou em uma bacia nos municípios de São Pedro e Charqueada (SP), que as zonas de cabeceiras na alta e média bacia, possuem maior susceptibilidade principalmente de processos erosivos lineares acelerados.

Além disso, o que contribuiu para essa classificação de forte fragilidade foi a presença de cana-de-açúcar, solo exposto, pastagem e área urbana. Mesmo com ocorrência de vegetação nativa na região, esta não foi determinante, uma vez que está associada a altas declividades.

Os solos mais erodíveis e localizados em maiores declividades são mais suscetíveis à erosão, e requerem maior atenção, pois segundo Ross et al. (2000 apud Corvalán, 2009) são uma ameaça a conservação e, sobretudo, a preservação florestal. Desse modo, estes solos descobertos ou com cobertura inadequada produzem sedimentos que podem afetar áreas de floresta nativa ou até mesmo chegar aos corpos hídricos e causarem assoreamentos.

Vale ressaltar que foi observada ações de manejo em algumas áreas da região, afim de conter os processos erosivos. O cultivo do bambu é utilizado para contenção de erosão linear, conforme demonstrado na figura 10a e 10b.

**Figuras 10a e 10b. Plantio de bambu para contenção de erosão.**



Fonte: elaborada pelo autor

5. Na categoria muito forte (3.112 ha), o que a difere da categoria forte é a forma do relevo Divergente convexa e Divergente retilínea. Tal relevo, não favorece o armazenamento de água superficial, aumentando o potencial de escoamento superficial (DORICI et al. 2016). Assim como na classe forte, identificou-se também regiões de

expansão urbana. O crescimento da área urbanizada altera o padrão natural de cobertura do solo e causa impactos ambientais negativos como a redução da vegetação natural (LEE e CHOE, 2011). Estes locais, de acordo com metodologia empregada, apresentam valores e limites críticos da morfogênese que, de acordo com Ross (2012), são locais onde as atividades humanas devem ser limitadas.

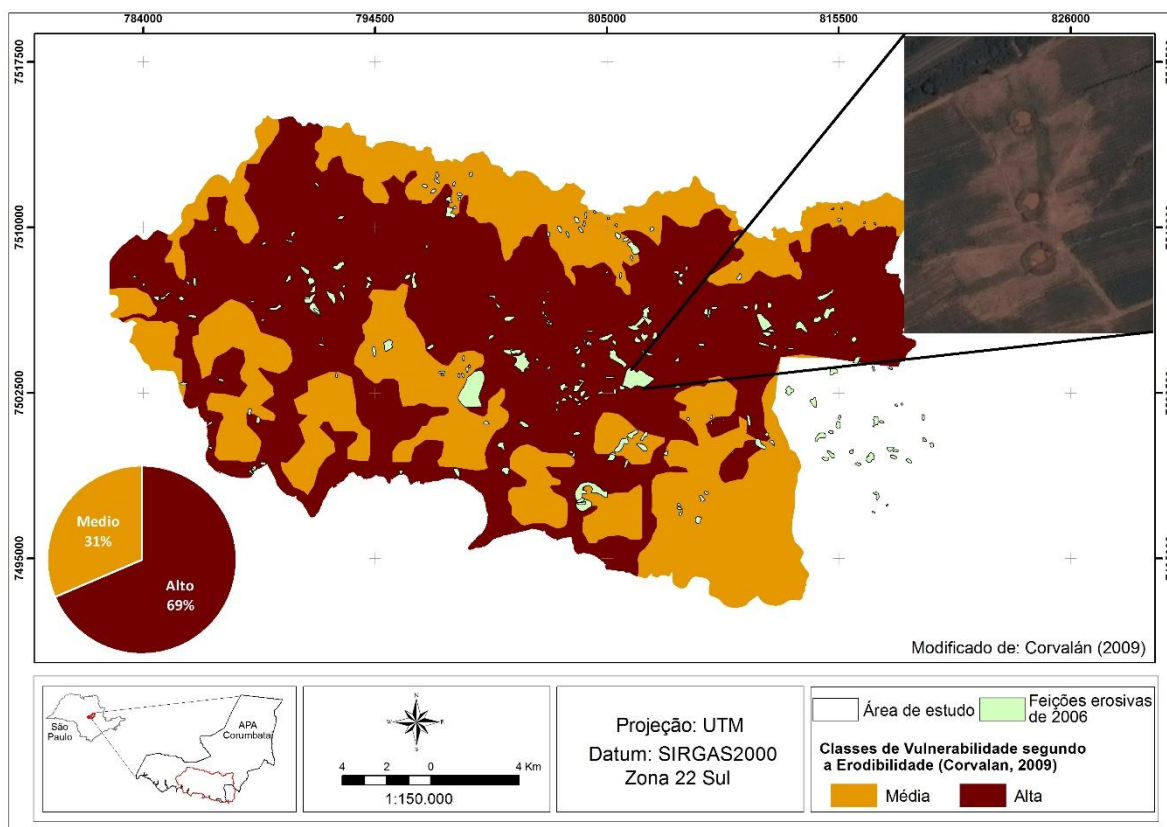
Nessa categoria mais forte, qualquer alteração na forma ou nos processos superficiais podem favorecer o desencadeamento de processos erosivos de grandes proporções. O tipo de uso da terra influencia diretamente a vulnerabilidade do terreno à ação de agentes erosivos – a erodibilidade do solo depende diretamente da capacidade de infiltração da água, que por sua vez é influenciada pela sua cobertura (JAIN e GOEL, 2002; LEPSCH, 2010; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Na área de estudo, os locais com os maiores valores de declividade da bacia hidrográfica estão localizados na frente da Cuesta e foram os que apresentaram os mais altos valores de fragilidade ambiental, apesar da cobertura vegetal. Tais locais, possuem um grande potencial de geração de sedimentos por gravidade.

De acordo com Corvalán (2009), a Cuesta é fundamental para a APA de Corumbataí, pois nessa área localizam-se a maioria das cachoeiras e atrativos naturais que dão suporte ao ecoturismo na região. Baseado nisso, recomenda-se a proteção integral desse território, tanto pelo valor ecoturístico, quanto pela existência de importantes nascentes que, de acordo com a Lei Nº 12.651/2012 do Código Florestal Brasileiro, estabelece a proteção de áreas ao redor de nascentes e áreas com mais de 45% de declividade.

No zoneamento ambiental da APA Corumbataí realizado por Corvalán (op. cit.), cruzando com o levantamento das feições erosivas do ano de 2006 (Dantas-Ferreira, 2008), as áreas de vulnerabilidade alta, segundo a Erodibilidade, representam cerca de 69% das erosões identificadas, enquanto que 31% das erosões estão em áreas de vulnerabilidade média (Figura 11).

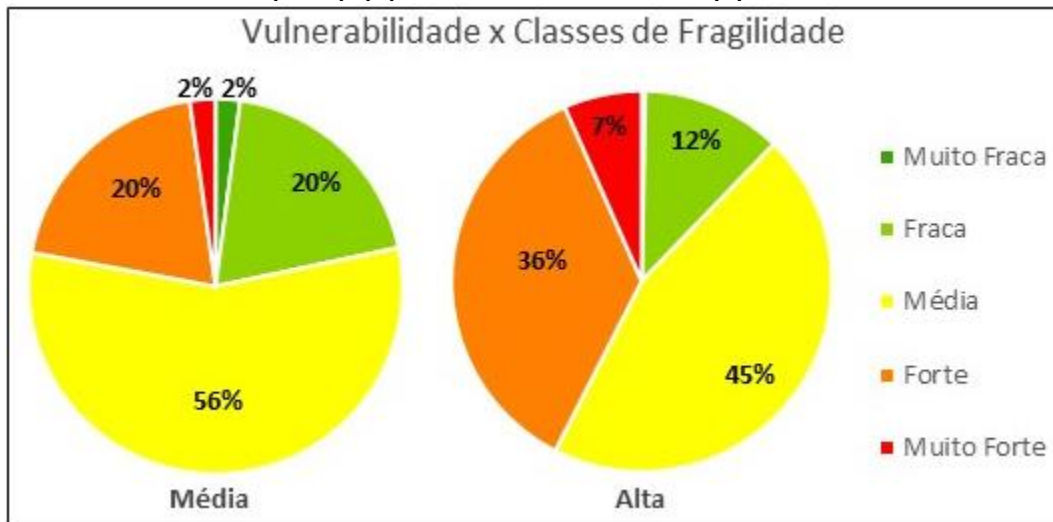
Figura 11. Mapa de vulnerabilidade segundo a Erodibilidade.



Fonte: Modificado de Corvalán 2009.

Relacionando esse zoneamento, com as classes obtidas nesse estudo, as áreas com alta e moderada restrição de uso coincidem com as áreas de média a muito alta fragilidade do presente trabalho. Com o cruzamento das informações levantadas, pode-se observar que os resultados são compatíveis, como mostra a figura 12.

Figura 12. Distribuição das classes de fragilidade em função da vulnerabilidade segundo a erodibilidade de Corvalán (2009). (A) Vulnerabilidade Média e (B) Vulnerabilidade Alta



A classificação da vulnerabilidade se deu pelos fatores erodibilidade, declividade e geomorfologia, que de acordo com a autora, essas terras apresentam grandes problemas relacionados a perda de solos, se comparadas a outros setores da unidade de conservação.

Tal situação reforça que o processo de erosão dos solos se manifesta de diferentes maneiras, dependendo das interações dos fatores presentes em uma área, como as características geológicas, as propriedades físicas do solo (ex. erodibilidade), o clima, cobertura vegetal e uso do solo.

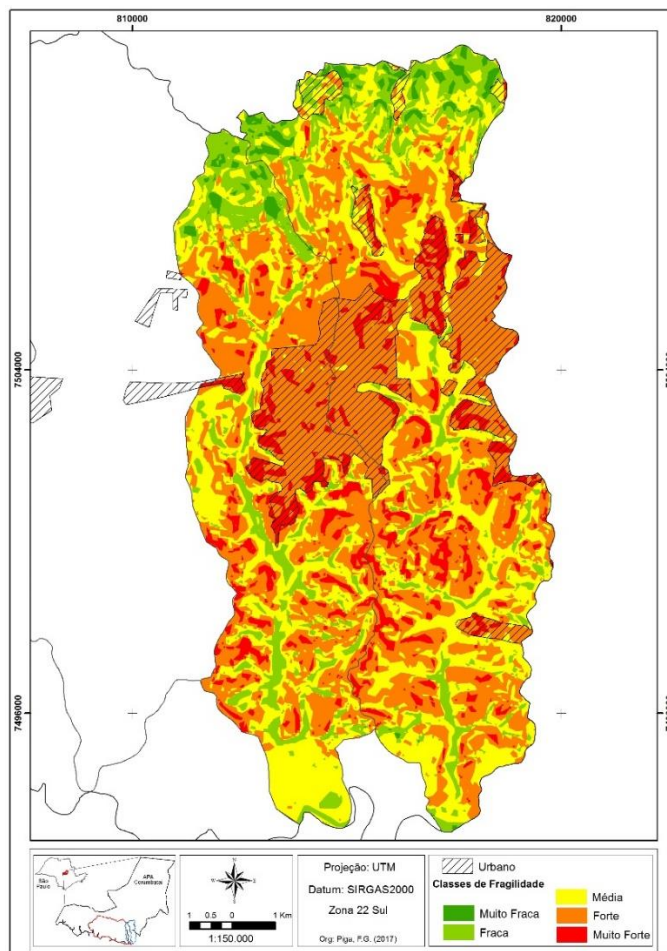
A autora ainda ressalta a importância desses estudos em escalas mais detalhadas, sendo uma ferramenta importante e útil ao apoio à decisão, que possam servir para um zoneamento e planejamento mais efetivos por parte do poder público.

### 3.2 Análise da Fragilidade em escala 1:100.000

Ainda foi realizada uma simulação considerando o mapa pedológico 1:100.000 nas bacias do Samambaia e Ribeirão do Meio. De acordo com as porcentagens das classes de fragilidade, estas não tiveram diferença significativa, uma vez que, os outros atributos utilizados já se encontravam na escala 1:50.000, conforme observado na figura 13.



Figura 13. Fragilidade ambiental com levantamento pedológico 1:100.000 nas bacias Ribeirão do Meio e Samambaia.



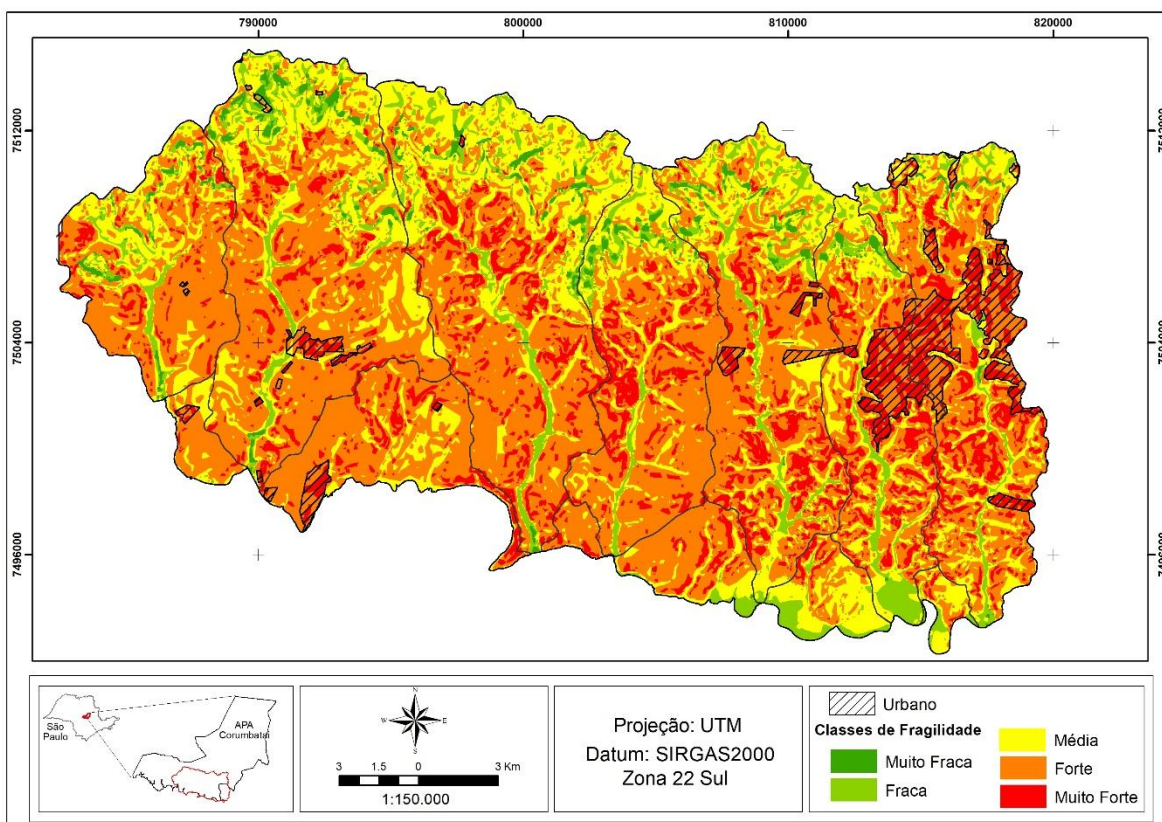
Como não foram atribuídos pesos de influência para cada atributo, a mudança da pedologia de escala 1:500.000 para 1:100.000 não foi suficiente para mudanças significativas com relação a porcentagem das áreas nas classes de fragilidade nessas bacias hidrográficas.

A partir do mapa de Fragilidade Ambiental, pode-se determinar as áreas que necessitam de um manejo mais efetivo. Um planejamento adequado do uso da terra torna-se cada vez mais importante, uma vez que protege o ambiente contra a erosão, e conseqüentemente aumenta a sua capacidade produtiva (FUJIHARA, 2002; CORVALÁN, 2009; ROSS, 2012).

### 3.3 Análise da Fragilidade Utilizando Materiais Inconsolidados

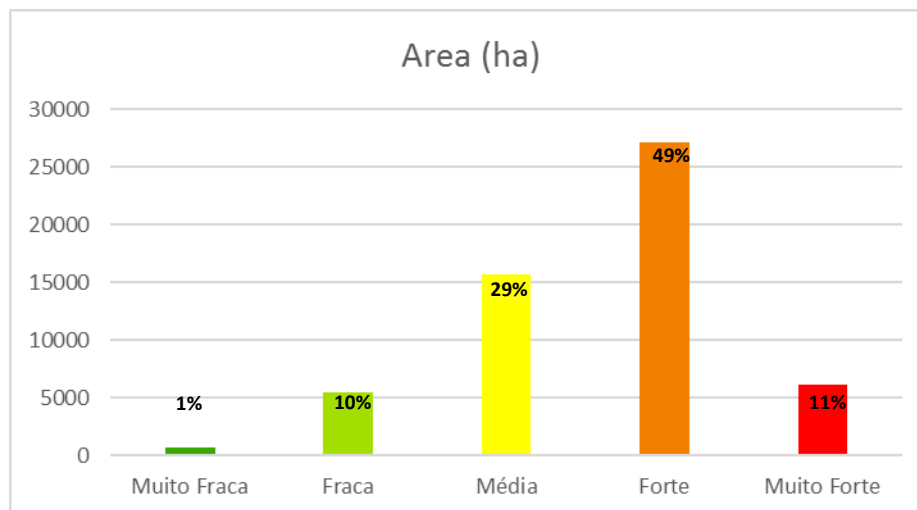
Percebe-se a influência da escala a ser trabalhada através do mapeamento da fragilidade realizado com a análise do material inconsolidado, com escala de 1:50.000, no lugar da pedologia de escala 1:500.000 (Figura 14).

**Figura 14. Mapa de fragilidade ambiental a partir dos materiais inconsolidados.**



O resultado obtido a partir dessa análise, tem um caráter mais condizente com a realidade da área de estudo, levando em consideração as feições erosivas que foram identificadas na região. A maior parte da área é caracterizada pela fragilidade forte (27.197 ha), seguido da média (15.666 ha), muito forte (6.104 ha), fraca (5.409 ha) e muito fraca (699ha) (Figura 15).

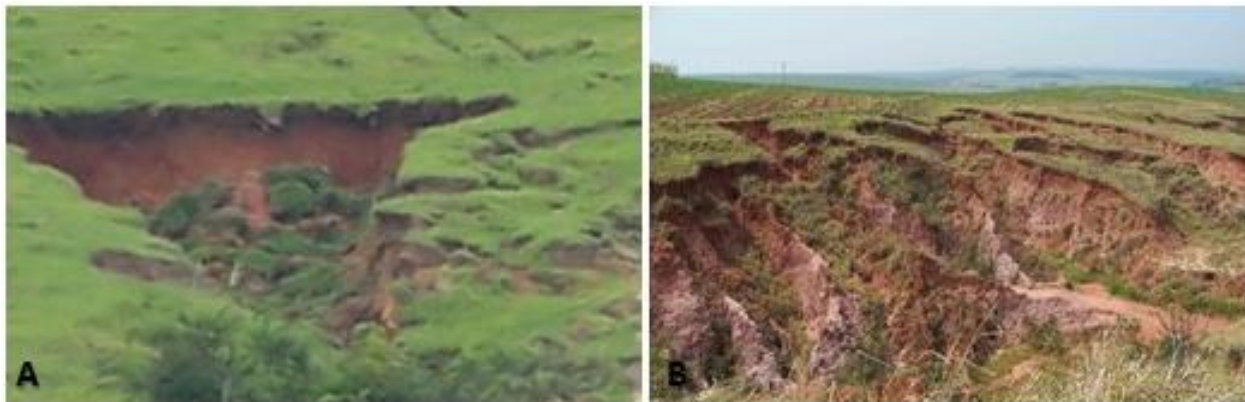
**Figura 15. Distribuição das classes de fragilidade a partir dos materiais inconsolidados.**



As classes média, fraca e muito fraca estão concentradas na parte norte da área de estudo, associadas aos solos residuais da Formação Itaqueri, que variam de silto-argilosos a arenosos em sua textura, e solos residuais da Formação Serra Geral, silto-argilosos com porcentagens significativas de argila, sendo um material de muito baixo potencial a erosão; nos cursos de rio, associados a Aluviões Arenosos com Pedregulho, apresentando pedregulhos basicamente de basaltos, misturados a materiais arenosos (DANTAS-FERREIRA, 2008).

Por estarem em áreas mais planas e alagáveis, seu potencial a erosão é baixo. Numa pequena porção ao sul, também em áreas de menor declive e alagáveis, o retrabalhado arenoso com pedregulho, que possui um perfil arenoso com variação textural muito grande, apresenta uma alta capacidade de infiltração, contribuindo para baixo potencial de erosão.

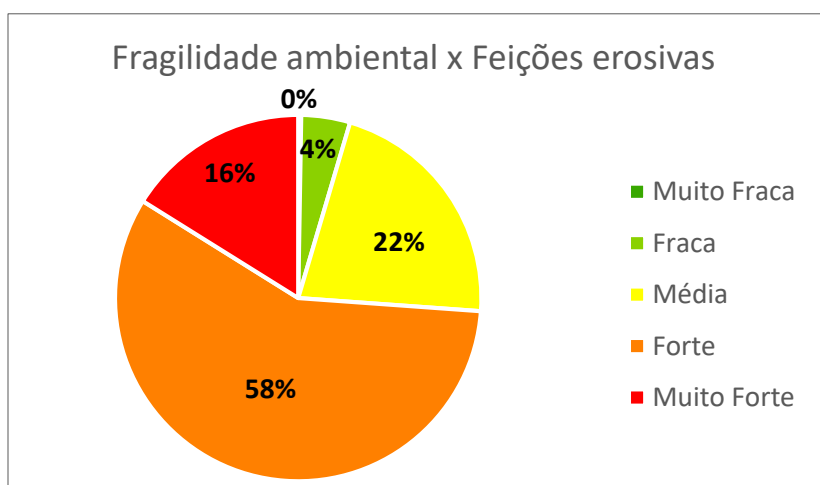
**Figura 16. (A) Erosão associada a material inconsolidado retrabalhado arenoso em topo. (B) Erosão associada a material residual da Formação Piramboia.**



Fonte: Dantas-Ferreira (2008).

De acordo com Dantas-Ferreira (2004) e Dantas-Ferreira e Pejon (2007), os materiais geológicos da área apresentam, predominantemente, alta susceptibilidade à erosão (Figura 15), pois estão intimamente relacionados aos materiais aflorantes da Formação Pirambóia, o de maior ocorrência na área. Tal evento, pode ser reafirmado quando cruzamos o levantamento das feições erosivas do local com as fragilidades a partir dos materiais inconsolidados (Figura 17).

**Figura 17. Distribuição das classes de fragilidade em função das feições erosivas.**



Cerca de 74% das erosões mapeadas encontram-se em áreas de forte a muito forte fragilidade e apenas 4% em fraca fragilidade. Esse panorama indica a alta vulnerabilidade que os materiais encontrados na área de estudo possuem frente aos processos erosivos.

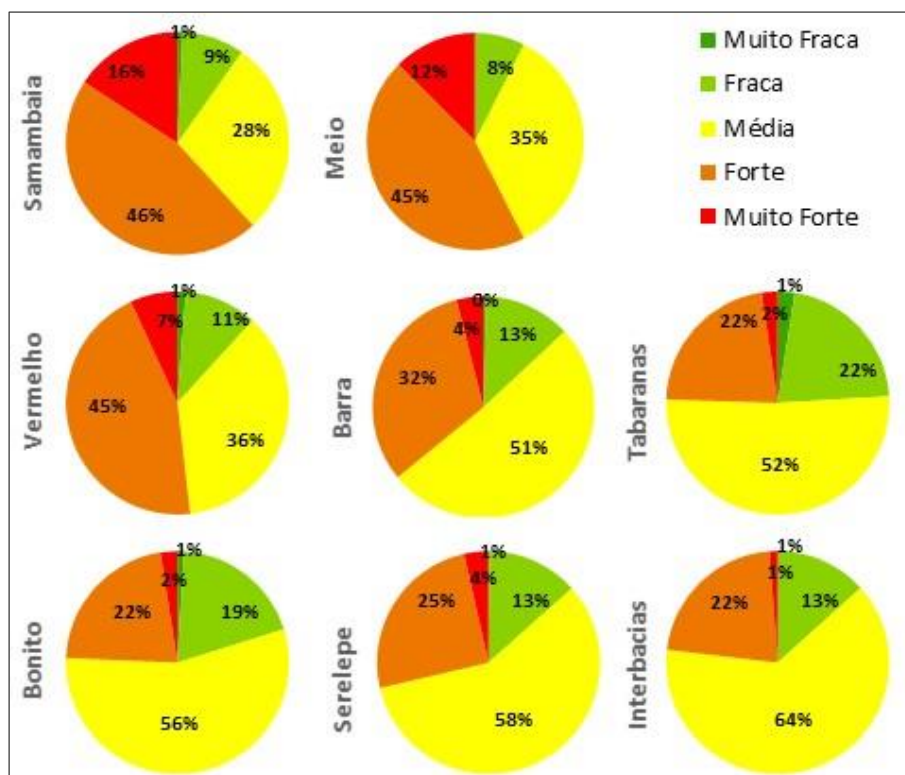
Segundo Valle et al. (2016), fatores como tipo de solo e declividade são decisivos para limitar as formas de ocupação, recomendadas para preservação da fauna e flora. Tais precauções são fundamentais para a manutenção de ecossistemas locais e controle dos processos erosivos, contribuindo para garantir a qualidade dos recursos hídricos e o abastecimento de água na região, uma vez que, são os processos erosivos que fornecem os materiais (sedimentos) que darão origem ao assoreamento.

### **3.4 Análise da Fragilidade por bacia hidrográfica**

A bacia hidrográfica é considerada como a unidade fisiográfica mais apropriada para o planejamento dos recursos hídricos, por constituir-se em sistema aberto de fluxo hídrico e onde se desenvolvem as atividades humanas. Bordallo (1995), menciona que a bacia hidrográfica como unidade de estudo para a gestão das distintas formas de atividade e uso das potencialidades ambientais tem como finalidade projetar, interceder, executar e manusear as melhores formas de apropriação e exploração de seus recursos naturais.

Se levarmos em consideração a análise em escala de bacia hidrográfica, as bacias Samambaia, Meio, Vermelho e Barra apresentaram as maiores fragilidades se comparadas com as bacias Tabaranas, Bonito, Serelepe e as Interbacias. Tal fato pode ser constatado na figura a seguir.

Figura 18. Porcentagem das classes de fragilidade por bacia hidrográfica.



Essas bacias consideradas mais frágeis (vulneráveis) são as que possuem as maiores áreas agrícolas e de expansão urbana, e estão inseridas no município de São Pedro. No caso da bacia Ribeirão Vermelho, sua maior vulnerabilidade se deu por concentrar os solos mais propícios a erosão: Neossolo Quartzarênico e Argissolo Vermelho Amarelo.

O município concentra um percentual de áreas cultivadas e urbanizadas maior se comparado ao município de Santa Maria da Serra, no qual estão inseridas as bacias Bonito, Serelepe e Tabaranas. Isso implica que as autoridades municipais de São Pedro necessitam, o quanto antes, traçar medidas para conter o avanço dessas áreas.

No estudo realizado por Dantas-Ferreira (2008), calculou-se a contribuição de sedimentos que as bacias analisadas neste trabalho transportam ao reservatório de Barra Bonita. As maiores contribuições são das bacias do Barra, Meio e Bonito, com 30, 37 e 80 toneladas/dia, respectivamente, enquanto que as outras bacias são responsáveis por menos de 20 toneladas/dia.

Além da fragilidade, essa carga de sedimentos está intimamente relacionada às vazões dos corpos hídricos. Por isso, a bacia Samambaia mesmo apresentando um grau de fragilidade maior que a bacia do Barra, por exemplo, contribui com menos de 20 toneladas/dia por apresentar uma vazão de em torno de 0,7 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a vazão do Barra é de aproximadamente 1,15 m<sup>3</sup>/s (DANTAS-FERREIRA, 2008).

Os sedimentos depositados nos corpos d'água reduzem a capacidade de escoamento de cheias dos canais e as inundações se tornam mais frequentes, tendo como solução a dragagem do material depositado nestes canais. Além dos impactos físicos, muitas vezes os sedimentos estão agregados aos insumos agrícolas e, provavelmente, são os mais significativos de todos os poluentes em termos de concentração na água. A associação de poluentes tóxicos com materiais finos produz redução da qualidade da água (WARD e TRIMBLE, 2004; TUCCI e COLLISCHONN, 1998).

No trabalho de Franco (2010) e de Silveira et al (2014), foi observada a relação de áreas de alta fragilidade, com presença de altas declividades e solos susceptíveis a erosão, e sua influência na qualidade da água, tanto nos parâmetros físicos, químicos, como biológicos. Os resultados sugerem ainda a influência da sazonalidade climática no comportamento de alguns desses parâmetros. Isso reforça a importância da integração dos vários atributos que a análise da fragilidade permite.

Recentemente o Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Consórcio PCJ) realizou um levantamento preliminar sobre a viabilidade de uso da água da barragem de Santa Maria da Serra para abastecimento público. Através de avaliações da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) foi constatado que a qualidade da água da Represa de Barra Bonita está comprometida.

Ainda de acordo com a CETESB, o principal problema da qualidade da água da represa está associado com seu estado trófico, ou seja, a influência da eutrofização, fenômeno causado pelo excesso de nutrientes (compostos químicos ricos em fósforo ou nitrogênio) numa massa de água. Tais compostos são originados, possivelmente, dos insumos agrícolas que são transportados juntamente com os sedimentos gerados de processos erosivos e do lançamento de efluentes domésticos e industriais.

Segundo o Consórcio PCJ, é imprescindível um rigoroso controle da qualidade das águas na calha do Rio Piracicaba e dos ribeirões e córregos afluentes (caso da área de estudo), na eventualidade de utilizá-lo para abastecimento público.

Perante o diagnóstico que foi levantado, a atribuição da APA de Corumbataí como uma unidade de conservação de uso sustentável, está sendo malsucedida, uma vez que seu manejo e zoneamento não estão sendo respeitados, refletindo na degradação de seus recursos naturais e dos recursos hídricos. A partir dos resultados obtidos percebe-se, sobretudo, uma necessidade crescente de se tomar medidas que possam impedir, ou ao menos reduzir essa degradação, devendo ser tomadas iniciativas nas diversas instâncias governamentais (federal, estadual e municipal) e com a participação da sociedade.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Em um cenário geral, considerando as classes alta e muito alta fragilidade, que seriam as classes prioritárias para manejo, utilizando o mapa de material inconsolidado, estas áreas ocupam cerca de 60% da área de estudo, enquanto que com a análise da pedologia 37% , as quais foram representativas nas áreas de ocorrência da Formação Piramboia que, em função das suas características mais arenosas, são mais propensas a erosão hídrica laminar e linear . Isso demonstra que uma escala mais detalhada utilizada nas análises retratou de maneira mais fiel às condições ambientais in situ.

Mesmo com presença de vegetação nativa, essas áreas requerem maior atenção, pois são áreas fisicamente vulneráveis e interferem diretamente na disponibilidade e qualidade hídrica da região, uma vez que correspondem às áreas de nascentes (mananciais) e de maior contribuição na produção de sedimentos, podendo ocasionar grandes assoreamentos nos cursos d'água.

A presença de cobertura vegetal, ainda que proveniente de agricultura, contribuiu para um perfil de fragilidade mais desfavorável pois geralmente ameniza a vulnerabilidade do sistema em relação à estabilidade ou não do terreno. A metodologia utilizada neste trabalho mostra-se satisfatória como subsidio no planejamento da expansão urbana e de práticas agrícolas, uma vez que permite uma análise integrada dos diversos atributos do



meio físico, agilizando o processo de tomada de decisões, respeitando-se o plano de manejo da unidade de conservação.

O perfil de média a alta fragilidade, apresentada pela área de estudo, reforça a importância de preservação ambiental das bacias envolvidas para que não haja aumento das áreas de alto grau e surgimento de novas áreas de fragilidade muito alta.

Os dados obtidos pelo modelo podem ser uma contribuição útil para o planejamento mais eficaz das atividades dentro das áreas naturais protegidas, auxiliando na elaboração de novas políticas públicas para a preservação dos ambientes naturais em cidades de médio e grande porte, bem como o estabelecimento (zoneamento) de novas áreas específicas de conservação, trazendo benefícios econômicos e ecológicos.

Em se tratando de uma Área de Proteção Ambiental, recomenda-se que novas formas de ordenamento e manejo conservacionistas precisam ser aplicadas, sobretudo em áreas de atividades agrícolas e de expansão urbana, em que predominam valores de fragilidade alta e muito alta, a fim de resguardar sua qualidade ambiental, uma vez que o objetivo de uma APA é garantir “proteção da diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais” (BRASIL, 2000).

Uma eventual ocupação ou utilização dessas áreas deve ser baseada no desenvolvimento de um planejamento estratégico, que leve em consideração sua alta fragilidade (vulnerabilidade) aos processos erosivos, do qual devem ser precedidos de rigorosos estudos e diagnósticos de impacto ambiental, a fim de que as políticas de conservação sejam voltadas para as áreas de contribuição de recarga de reservatórios superficiais e subterrâneos.

## REFERÊNCIAS

AGEITEC. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Arvore do Conhecimento – Solos Tropicais**, 2016. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/Abertura.html#](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/Abertura.html#)

BASTOS, R.A.B. **Áreas de fragilidade ambiental: uma abordagem metodológica para áreas de expansão urbana com risco potencial de erosão. Estudo de caso: Bairro Urbanova São José dos Campos/SP**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 154pp, 2006.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. Ícone, São Paulo, 355pp, 2012.

BORDALLO, C.L.A. **A Bacia Hidrográfica como Unidade de Planejamento dos Recursos Hídricos**. Belém: NUMA/UFPA, 1995.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético 2013: ano base 2012**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF, 2013.

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

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2000.

BUZELLI, G.M; CUNHA-SANTINO, M.B. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP). **Ambi-Agua**, Taubaté, 8: (1), pp 186-205, 2013. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.930>

CÂMARA, G; MEDEIROS, J.S. Geoprocessamento para projetos ambientais. In CÂMARA, G; DAVIS, C; MONTEIRO, A.M.V. (Orgs.). **Introdução à ciência da geoinformação**. INPE, 10: 1-36, 2001. Disponível em: [www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap10-aplicacoesambientais.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap10-aplicacoesambientais.pdf)

CARPI JUNIOR, S. **Técnicas cartográficas aplicadas à dinâmica da Bacia do Ribeirão Araquá - São Pedro (SP)**. Dissertação de Mestrado. IGCE, UNESP. Rio Claro, 188 pp, 1996.

CEPAGRI. **Centro de pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipiospaulistas.htm>.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de Fragilidade Ambiental com Métodos Multicritério - críticas e proposta metodológica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 147 pp, 2011.

CORVALÁN, S. **Zoneamento Ambiental da APA Corumbataí (SP) de acordo com critérios de Vulnerabilidade Ambiental**. Tese de Doutorado. IGCE-UNESP, Rio Claro, 170 pp, 2009.

COSTA, C.W.; PIGA, F.G; MORAES, M.C.P; DORICI, M; SANGUINETTO, E.C; LOLLO, J.A; MOSCHINI, L.E; LORANDI, R; OLIVEIRA, L.J. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras - Araras, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 20(4): 946-958, 2015. doi: 10.21168/rbrh.v20n4.p946-958

COSTA, N.M.C; COSTA, V.C; SANTOS, J.P.C. Definição e Caracterização de áreas de fragilidade ambiental, com base em Análise Multicritério, em Zona de Amortecimento de

Unidades de Conservação. In: **12º Encuentro de Geógrafos de América Latina – EGAL – Caminando en una América Latina en transformación**, Montevideo, Uruguai, 2009.

DAEE. Departamento de Agua e Energia Elétrica 2017a. **Banco de Dados Hidrológicos**. Disponível em: <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>

DAEE. Departamento de Agua e Energia Elétrica 2017b. **Apoio ao Município**. Disponível em: [http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com\\_contentview=articleid=76:apoio-ao-municipiocatid=46:apoio-ao-municipio](http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_contentview=articleid=76:apoio-ao-municipiocatid=46:apoio-ao-municipio)

DANTAS-FERREIRA, M. 2004. **Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação - córrego do Tucum (São Pedro/SP)**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 172p, 2004.

DANTAS-FERREIRA, M.D. **Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 454 pp, 2008.

DANTAS-FERREIRA, M.; PEJON, O. Erosion inventory in the region of São Pedro and Barra Bonita cities, state of São Paulo, Brazil. In: **10th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE IAEG (INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT)**. Nottingham (Inglaterra), 2006.

DORICI, M; COSTA, C.W; MORAES, M.C.P; PIGA, F.G; LORANDI, R; LOLLO, J.A; MOSCHINI, L.E. Accelerated erosion in a watershed in the southeastern region of Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 75(19): 1301, 2016.

ESCALADA, M.I.S. **Aplicação de técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o zoneamento ecológico econômico (ZEE)**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 26p, 1998.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS for the desktop 10.2**, 2013.

EASTMAN, J.R. Decision Support: Decision Strategy Analysis. In: Clark University (Ed.). **IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark Labs, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 83 pp, 1979.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Classificação de Solos do Estado de São Paulo**. 1999.

FRANCO, G.B. **Fragilidade Ambiental e qualidade da água na Bacia do Rio Almada – Bahia**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 345 pp, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufv.br/handle/123456789/823>

FUJIHARA, A.K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. doi:10.11606/D.11.2002.tde-12112002-141046.

FUSHITA, A.T; CAMARGO-BORTOLIN, L.H.G; ARANTES, E.M; MOREIRA, M.A.A; CANÇADO, C.J; LORANDI, R. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, (63/4): 477-488, 2010.

GUAPYASSÚ, M.S; HARDT, L.P.A. Avaliação de fragilidade ambiental: uma nova abordagem metodológica para unidades de conservação de uso indireto em áreas urbanas. **Floresta e Ambiente**, 5(1): 55-77, 1998.

IAC. Instituto Agrônomo de Campinas. **Solos do Estado de São Paulo**, 2016. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp>

IPT. Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo. **Mapa geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:500 000**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981.

IPT. Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981.

INPE. Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. **TOPODATA, banco de dados geomorfométricos do Brasil**. 2017. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>.

JAIN, S.K; GOEL, M.K. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS, **Hydrological Sciences Journal**, 47(1): 31-40, 2002. doi: 10.1080/02626660209492905

JINNO, K; TSUTSUMI, A; ALKAEED, O; SAITA, S; BERNDTSSON, R. Effects of land-use change on groundwater recharge model parameters. **Hydrological Sciences Journal**, 54(2): 300-315, 2009.

KAWAKUBO, F.S; MORATO, R.G; CAMPOS, K.C; LUCHIARI, A; ROSS, J.L.S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, p. 16-21, 2005.

LEE, D; CHOE, H. Estimating the Impacts of Urban Expansion on Landscape Ecology: Forestland Perspective in the Greater Seoul Metropolitan Area. **J. Urban Plann. Dev. (ASCE)**, 137(4): 425-437, 2011. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000090>

LEME, S.M. **Relevo, processos geocológicos e sócio/reprodutores e a fragilidade ambiental da bacia do ribeirão Piracicamirim/SP**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 196 pp, 2007. doi:10.11606/T.8.2007.tde-18022008-110758.

LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 216 pp, 2010.

MACIEL, M.A. Unidades de Conservação: breve histórico e relevância para a efetividade do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. In: **Âmbito Jurídico**, XIV, n. 90, Rio Grande, 2011. Disponível em: [www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n\\_link=revista\\_artigos\\_leituraeartigo\\_id=9870](http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leituraeartigo_id=9870).

MINOTI, R.T. **Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Microbacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

OLIVEIRA, J.B; CAMARGO, M.N; ROSSI, M; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPA-Solos. Campinas, 64 pp, 1999.

PAULA, E.M.S.; SOUZA, M.J.N. Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 13, 2007, Florianópolis. Anais.. Florianópolis: Instituto de Pesquisas Espaciais / INPE, 2007, p. 2979-2984.

PRADO, R.B. **Geotecnologias aplicadas à análise espaço temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 172 pp, 2004.

ROSS, J.L.S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia – DG-FFLCH-USP**. São Paulo, 8: 63-74, 1994. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/viewFile/47327/51063>.

ROSS, J.L.S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume Especial 30 Anos, p. 38-51, 2012. Disponível em:

<file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Meus%20documentos/Downloads/53841-67582-1-PB.pdf>.

RUHOFF, A.L. **Gerenciamento de Recursos Hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 93 pp, 2004.

SILVEIRA, T; REGO, N.A.C; DOS SANTOS, J.W.B; DE ARAÚJO, M.D.S.B. Qualidade da Água e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Superficiais na Definição das Fragilidades Potencial e Ambiental de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 7(4): 643-652, 2014.

TOMCZYK, A.M. A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: The case of Gorce National Park, Poland. **Applied geography**, 31(1): 339-351, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.07.006>

TROMBETA, L.R; GARCIA, R.M; NUNES, R.S; GOUVEIA, I.C.M.C; LEAL, A.C; GOUVEIA, J.M.C. Análise da fragilidade potencial e emergente do relevo da unidade de gerenciamento de recursos hídricos pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, (36): 159-173, 2014. Disponível em: <http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3178/2664>

TUCCI, C.E.M; COLLISCHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: TUCCI, C.E.M e MARQUES, D.M.L.M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Ed. Universidade, Porto Alegre, pp. 119 – 127, 1998.

VALERIANO, M.M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE-15318-RPQ/818, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: PEREIRA, V.P; FERREIRA, M.V; CRUZ, M.C.P. (Ed.), **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: FCAV/UNESP/SBCS, p. 223-242, 1994.

VALLE, I.C; FRANCELINO, M.R; PINHEIRO, H.S.K. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, 23(2): 295-308, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.107714>

WARD, A.D; TRIMBLE, W.S. **Environmental hydrology**. 2ª ed. Lewis Publishers, Boca Raton, 475 pp, 2004.

### 3. CONCLUSÕES

O uso de técnicas de geoprocessamento tem contribuído para a análise integrada do meio ambiente. Através dessa ferramenta, pode-se realizar um panorama da qualidade ambiental em que a área de estudo se encontra, permitindo uma análise temporal das intervenções que o ambiente vem sofrendo ao longo dos anos, assim como, os que ainda podem sofrer.

Neste intuito, as metodologias aqui aplicadas se mostraram uteis para o propósito da pesquisa, definindo as áreas que necessitam maiores estudos e cuidados. Em função do exposto, é necessário que se tomem medidas de caráter urgente nas áreas onde são críticas a fragilidade ambiental e a situação de perda de solo, além da adoção de políticas de manejo e conservação de solos, que permitam uma cultura conservacionista e planejadora do meio ambiente.

No entanto, vale ressaltar que para a aplicação dessas metodologias serem efetivas, é imprescindível o conhecimento prévio das características da área a ser estudada, uma vez que cada região possui um caráter e comportamento particular, não podendo, esses índices e pesos serem considerados como um padrão.

Mesmo com suas limitações, a USLE mostrou-se de grande valia como modelo de predição de perdas de solos pela sua simplicidade e cálculos rápidos e de baixos custos. A metodologia utilizada neste trabalho torna-se apropriada para estudos iniciais de planejamento ambiental em escala de bacias hidrográficas.

Um entrave encontrado nesse estudo, em relação ao modelo SWAT, foi a carência de informações pedológicas (para toda a extensão da área de estudo) e climáticas mais detalhadas, uma vez que tal modelo exige uma gama de dados específicos. Contudo, foi possível simular de forma satisfatória. No entanto, dados e escalas mais detalhados, permitem avaliar melhor os processos de perdas de solo e vulnerabilidade do ambiente, uma vez que a particularidade de dados permite a geração de informações mais específicas, contribuindo para técnicas de conservação mais adequadas.

Nesse sentido, cabe salientar que além dos dados produzidos por esta pesquisa, são necessárias pesquisas complementares que englobem os aspectos socioeconômicos e

culturais, visto que há uma propensão da perda da qualidade ambiental, com a expansão das fronteiras agrícolas e ocupação urbana, as quais contribuem com o comprometimento do grau de fragilidade ambiental do ambiente, interferindo diretamente na conservação e manutenção dos serviços ambientais proporcionados pelo ecossistema.

Com isto, pode-se afirmar que o objetivo deste trabalho foi atingido, visto que foi possível verificar que além da susceptibilidade natural à erosão, as alterações relacionadas às atividades antrópicas afetam diretamente a dinâmica do meio ambiente, sendo possível delimitar as áreas que necessitam de manejo mais eficaz, assim como áreas mais propícias a expansão urbana e de atividades agrícolas, servindo como subsidio nas decisões do planejamento territorial estratégico.